



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TAGUCHI PARA  
DETERMINAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN  
ENSAYOS DE CORROSIÓN PARA ACERO ESTRUCTURAL**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR:**

**DANIEL ARTURO MERINO ZEVALLOS**

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TAGUCHI PARA  
DETERMINAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN  
ENSAYOS DE CORROSIÓN PARA ACERO ESTRUCTURAL**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR: DANIEL ARTURO MERINO ZEVALLOS**

**DIRECTOR: ING. CÉSAR MARCELO GALLEGOS LONDOÑO**

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Daniel Arturo Merino Zevallos

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Daniel Arturo Merino Zevallos, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 6 de diciembre del 2023



**Daniel Arturo Merino Zevallos**  
**160056516-0**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TAGUCHI PARA DETERMINAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN ENSAYOS DE CORROSIÓN PARA ACERO ESTRUCTURAL**, realizado por el señor: **DANIEL ARTURO MERINO ZEVALLOS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

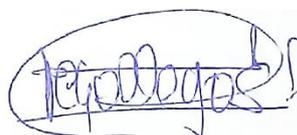
**FIRMA**

**FECHA**



Dr. Marco Antonio Medina Haro  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

2023-12-6



Ing. César Marcelo Gallegos Londoño  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

2023-12-6



Ing. Félix Antonio García Mora  
**ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

2023-12-6

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, quien me ha permitido cumplir una meta más en mi vida, permitiéndome ser parte de una maravillosa familia quien me han inculcado el valor de la constancia y perseverancia, a mi abuelita Zoila por su cariño, afecto y sonrisa de ánimo que siempre me supo dar, a mis padres que día a día lucharon juntos para verme triunfar en mi vida profesional inculcándome valores éticos y morales, a mi querida esposa “Joselyn “que en estos últimos años se ha convertido en mi pilar fundamental para culminar mis sueños, quien ha estado en las buenas y en las malas junto a sus padres, dándome una razón más para seguir dando lo mejor de mí.

Daniel

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios por permitirme dar un gran paso en mi vida profesional, a mi esposa por todo el apoyo incondicional y esfuerzo que día tras día realiza, a toda mi familia por saberme apoyar y guiar en cada una de las dificultades que la vida me ha puesto y a los padres de mi esposa por cada consejo y apoyo que me han sabido brindar.

Agradezco también a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la carrera Mantenimiento Industrial, por haberme permitido realizar y culminar mis estudios, adquiriendo los conocimientos que estarán siempre en mi vida profesional.

Daniel

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY / ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Limitaciones y delimitaciones .....	2
1.3. Problema general de investigación .....	2
1.4. Problemas específicos de investigación .....	3
1.5. Objetivos.....	3
1.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	3
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.6. Justificación.....	3
1.6.1. <i>Justificación teórica</i> .....	3
1.6.2. <i>Justificación metodológica</i> .....	4
1.6.3. <i>Justificación práctica</i> .....	4
1.7. Hipótesis .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Antecedentes de investigación .....	5
2.2. Acero estructural .....	6
2.2.1. <i>Propiedades del acero estructural</i> .....	6
2.3. Corrosión.....	7
2.3.1. <i>Fundamentos de la corrosión</i> .....	8
2.3.2. <i>Corrosión en materiales metálicos</i> .....	9
2.3.3. <i>Tasa de corrosión</i> .....	10

2.3.4.	<i>Corrosión en acero estructural</i> .....	10
2.4.	<b>Factores que propician la corrosión</b> .....	12
2.4.1.	<i>pH</i> .....	12
2.4.2.	<i>Humedad</i> .....	12
2.4.3.	<i>Temperatura</i> .....	13
2.4.4.	<i>Presión</i> .....	13
2.5.	<b>Método experimental</b> .....	14
2.5.1.	<i>Definiciones básicas</i> .....	14
2.5.2.	<i>Clasificación y selección de los diseños experimentales</i> .....	15
2.6.	<b>Planeación del experimento</b> .....	16
2.6.1.	<i>Estructura del método experimental</i> .....	16
2.6.1.1.	<i>Estructura de tratamiento</i> .....	16
2.6.2.	<i>Variación experimental</i> .....	18
2.6.3.	<i>Análisis de varianza</i> .....	19
2.6.3.1.	<i>Procedimiento para realizar un ANOVA</i> .....	19
2.6.4.	<i>Coefficiente de modelos estimados</i> .....	21
2.6.5.	<i>Inferencia estadística y práctica</i> .....	22
2.7.	<b>Diseño estadístico de experimentos</b> .....	22
2.7.1.	<i>Tipos de técnicas estadísticas</i> .....	23
2.7.2.	<i>Método de Taguchi</i> .....	23
2.7.2.1.	<i>Filosofía de Taguchi</i> .....	24
2.7.2.2.	<i>Arreglos ortogonales</i> .....	25
2.8.	<b>Diseño factorial</b> .....	29
2.8.1.	<i>Factor con dos niveles</i> .....	29
2.8.2.	<i>Un factor con K mayor igual a dos niveles</i> .....	31
2.8.3.	<i>Aspecto a considerar para la experimentación de la tasa de corrosión</i> .....	32
2.9.	<b>Manual de usuario guía</b> .....	33
2.9.1.	<i>Estructura de un manual de usuario guía</i> .....	33

### CAPÍTULO III

3.	<b>ESTUDIO DE VARIABLES INTERVINIENTES EN LA TASA CORROSIÓN</b>	35
3.1.	<b>Selección del software estadístico</b> .....	35
3.2.	<b>Enfoque de investigación</b> .....	36
3.3.	<b>Nivel de investigación</b> .....	37
3.4.	<b>Diseño de la experimentación</b> .....	37

3.4.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i> .....	37
3.4.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i> .....	38
3.4.3.	<i>Tipo de estudio</i> .....	38
3.4.4.	<i>Creación de la matriz ortogonal de Taguchi</i> .....	39
3.4.5.	<i>Selección de las variables que intervienen en los ensayos de corrosión</i> .....	41
3.5.	<b>Tipos de acero estructural como objeto de estudio</b> .....	42
3.6.	<b>Aplicación de la matriz de Taguchi en función a las variables intervinientes</b> .....	44
3.6.1.	<i>Selección de factores y niveles</i> .....	44
3.6.2.	<i>Arreglo ortogonal para los respectivos tipos de aceros</i> .....	45
3.6.2.1.	<i>Arreglo ortogonal para el acero estructural A36</i> .....	48
3.7.	<b>Obtención de datos experimentales para las matrices ortogonales de Taguchi</b> ...	50
3.7.1.	<i>Obtención de datos para las matrices ortogonales planteadas</i> .....	51
3.7.2.	<i>Obtención de datos experimentales para matriz ortogonal del acero A36</i> .....	52
3.8.	<b>Análisis de varianza y modelos estimados mediante el software Minitab</b> .....	53
3.8.1.	<i>Procedimiento para ingresar los datos en el software estadístico Minitab</i> .....	55
3.9.	<b>Manual de usuario para obtener el número adecuado de experimentos</b> .....	62

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	63
4.1.	<b>Probabilidad estadística y número de probetas en la tasa de corrosión</b> .....	63
4.2.	<b>Recolección y procesamiento de datos experimentales</b> .....	64
4.3.	<b>Análisis de estadística descriptiva y estadística inferencial</b> .....	68
4.4.	<b>Constatación de la hipótesis</b> .....	71
4.4.1.	<i>Planteamiento de hipótesis</i> .....	71
4.4.1.1.	<i>Prueba F</i> .....	71
4.4.2.	<i>Criterio</i> .....	72
4.4.3.	<i>Prueba de hipótesis</i> .....	72

## CAPITULO V

5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	74
5.1.	<b>Conclusiones</b> .....	74
5.2.	<b>Recomendaciones</b> .....	76

**GLOSARIO**  
**BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Riesgo de corrosión, según de la densidad de corriente de corrosión.....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Descripción del arreglo ortogonal $AO_8 (2^7)$ .....	26
<b>Tabla 2-3:</b> Tabla de iteraciones para 11 factores .....	27
<b>Tabla 2-4:</b> Razón señal/ruido para diferentes variables de respuesta .....	28
<b>Tabla 3-1:</b> Análisis de factores para la selección del software estadístico apropiado. ....	35
<b>Tabla 3-2:</b> Tabla de niveles y factores para un arreglo ortogonal $AO_9(3^3)$ .....	39
<b>Tabla 3-3:</b> Combinaciones para un arreglo ortogonal $AO_{27} (3^3)$ .....	40
<b>Tabla 3-4:</b> Combinaciones para un arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ .....	41
<b>Tabla 3-5:</b> Factores y niveles utilizados en la experimentación para la probeta PA .....	44
<b>Tabla 3-6:</b> Combinaciones para un arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ del acero negro sin protección	45
<b>Tabla 3-7:</b> Configuración del arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ con el número de probetas .....	46
<b>Tabla 3-8:</b> Factores y niveles utilizados en la experimentación para la probeta PB.....	47
<b>Tabla 3-9:</b> Arreglo ortogonal $AO^9 (3^3)$ con los datos experimentales para la probeta “PB” .....	47
<b>Tabla 3-10:</b> Factores y niveles utilizados en la experimentación.....	49
<b>Tabla 3-11:</b> Configuración del arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ para el caso del estudio .....	49
<b>Tabla 3-12:</b> Arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ con los datos experimentales para la probeta “PA” ....	52
<b>Tabla 3-13:</b> Combinaciones del arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ con los datos experimentales .....	53
<b>Tabla 3-14:</b> Análisis de las varianzas SN y medias.....	55
<b>Tabla 4-1:</b> Coeficientes de Modelos Estimados para relaciones señal-ruido .....	65
<b>Tabla 4-2:</b> Análisis de Varianza de Relaciones señal ruido .....	66
<b>Tabla 4-3:</b> Análisis de Varianza de Medias .....	67

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Representación de los tipos de corrosión.....	7
<b>Ilustración 2-2:</b> Reacciones presentes en la corrosión.....	8
<b>Ilustración 2-3:</b> Acero estructural Corroído .....	11
<b>Ilustración 2-4:</b> Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto .....	23
<b>Ilustración 2-5:</b> Graficas lineales de una configuración ortogonal $AO_8 (2^7)$ .....	26
<b>Ilustración 2-6:</b> Diseño con arreglo interno y externo.....	28
<b>Ilustración 3-1:</b> Configuración ortogonal del acero negro sin protección .....	51
<b>Ilustración 3-2:</b> Definición de la relación de señal a ruido en Minitab .....	55
<b>Ilustración 3-3:</b> Pasos para crear el diseño ortogonal de Taguchi en Minitab .....	56
<b>Ilustración 3-4:</b> Selección del diseño de 3 factores y 3 niveles.....	56
<b>Ilustración 3-5:</b> Selección del número de corridas para el diseño ortogonal.....	57
<b>Ilustración 3-6:</b> Ingreso de factores y sus niveles correspondientes.....	57
<b>Ilustración 3-7:</b> Matriz ortogonal para ingresar datos de los experimentos .....	58
<b>Ilustración 3-8:</b> Pasos de selección de características de la matriz ortogonal .....	58
<b>Ilustración 3-9:</b> Selección de factores del proceso de corrosión .....	59
<b>Ilustración 3-10:</b> Pasos para seleccionar el tipo de análisis experimental.....	59
<b>Ilustración 3-11:</b> Selección de la variable respuesta.....	60
<b>Ilustración 3-12:</b> Selección del tipo de grafica.....	60
<b>Ilustración 3-13:</b> Selección de las tablas de respuesta.....	61
<b>Ilustración 3-14:</b> Selección del tipo de señal ruido .....	61
<b>Ilustración 4-1:</b> Combinaciones del arreglo ortogonal $AO_9 (3^3)$ .....	65
<b>Ilustración 4-2:</b> Graficas de efectos principales para Relaciones sin ruido.....	68
<b>Ilustración 4-3:</b> Graficas de efectos principales para medias .....	70
<b>Ilustración 4-4:</b> Distribución F ( $\alpha = 0,05$ en la cola a la derecha).....	72

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** CONFIGURACIÓN ORTOGONAL PARA UNA PROBETA DE ACERO NEGRO SIN PROTECCIÓN

**ANEXO B:** COMBINACIONES PARA EL ARREGLO ORTOGONAL DE TAGUCHI EN FUNCIÓN AL NÚMERO DE PROBETAS

**ANEXO C:** COMBINACIONES PARA EL ARREGLO ORTOGONAL EN FUNCIÓN AL TIPO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL

**ANEXO D:** COEFICIENTES DE MODELOS ESTIMADOS PARA RELACIONES SIN RUIDO EN MINITAB

**ANEXO E:** ANÁLISIS DE VARIANZA DE RELACIONES SIN RUIDO EN MINITAB

**ANEXO F:** ANÁLISIS DE VARIANZA DE MEDIAS EN MINITAB

**ANEXO G:** GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA RELACIONES SN

**ANEXO H:** GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA MEDIAS

**ANEXO I:** DISEÑO ORTOGONAL DE TAGUCHI AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) PARA PROBETAS DE ACERO GALVANIZADO

**ANEXO J:** DISEÑO ORTOGONAL DE TAGUCHI AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) PARA PROBETAS DE ACERO GALVANIZADO CON PROTECCIÓN CATÓDICA

**ANEXO K:** MANUAL DE USUARIO PARA DETERMINAR LAS VARIABLES INTERVINIENTES EN CUATRO TIPOS DE ACERO

**ANEXO L:** TASA DE CORROSIÓN DEL ACERO A36 OBTENIDA DE LA BUSQUEDA CIENTÍFICA

## RESUMEN

Mediante este trabajo investigativo, se estableció el método de Taguchi, el tipo de probetas a analizar; “las cuales estuvieron en función de variables que interviene con los ensayos de corrosión”, de igual forma se habló sobre el método factorial de un solo factor con dos niveles y un factor K mayor igual a dos niveles, los cuales formaron bases fundamentales para el diseño experimental; a pesar que, el método factorial manipula varios factores simultáneamente a diferentes niveles para evaluar el grado de afectación sobre la respuesta, Taguchi manipula los factores de manera secuencial y ordenada para minimizar los efectos de ruido y maximizar la robustez del proceso, mediante matrices ortogonales, por tal razón esta investigación desarrolló a profundidad el método de Taguchi; es importante mencionar que para el diseño experimental se empleó la norma para ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio “ASTM G31”; es por eso que se analizaron las variables que intervienen directamente sobre los ensayos de corrosión, para posteriormente estudiar los datos recopilados del experimento mediante técnicas estadísticas apropiadas para sacar conclusiones significativas de los datos de corrosión; en este caso los datos fueron analizados a través de un análisis de varianza con la utilización del software Minitab, el cual determinó la relación entre la tasa de corrosión y la variable interviniente “tipo de limpieza”, por lo tanto, con la aplicación del método de Taguchi se estableció el grado de afectación de un determinado factor sobre la tasa de corrosión; tales como tiempo de exposición, tipo de acabado superficial y tipo de limpieza aplicada a probetas de acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado, acero galvanizado con protección catódica y al acero ASTM A36, finalmente se estableció las matrices ortogonales que plantean un número adecuado de probetas para los ensayos.

**Palabras clave:** <DISEÑO EXPERIMENTAL> < MÉTODO DE TAGUCHI> <MATRIZ ORTOGONAL> <ACERO ESTRUCTURAL> <TASA DE CORROSIÓN>.

0244-DBRA-UPT-2024



## SUMMARY / ABSTRACT

Through this research work, the Taguchi method was established, the type of specimens to be analyzed, "which were a function of variables involved in the corrosion tests", as well as the factorial method of a single factor with two levels and a factor K greater than two levels, which formed the fundamental basis for the experimental design; although the factorial method manipulates several factors simultaneously at different levels to evaluate the degree of affectation on the response, Taguchi manipulates the factors in a sequential and ordered manner to minimize the effects of noise and maximize the robustness of the process, by means of orthogonal matrices, for this reason this research developed Taguchi's method in depth; It is important to mention that for the experimental design the standard for immersion corrosion tests in the laboratory "ASTM G31" was used; that is why the variables that intervene directly on the corrosion tests were analyzed, to later study the data collected from the experiment by means of appropriate statistical techniques to draw significant conclusions from the corrosion data.; In this case, the data were analyzed through an variance analysis with the use of Minitab software, which determined the relationship between the corrosion rate and the intervening variable "type of cleaning". Therefore, with the application of Taguchi's method, the degree of affectation of a certain factor on the corrosion rate was established; The Taguchi method was used to establish the degree of affectation of a certain factor on the corrosion rate, such as exposure time, type of surface finish and type of cleaning applied to specimens of black steel without protection, black steel with surface coating, galvanized steel, galvanized steel with cathodic protection and ASTM A36 steel. Finally, the orthogonal matrices were established to raise an adequate number of specimens for the tests.

**Keywords:** <EXPERIMENTAL DESIGN> <TAGUCHI METHOD> <ORTHOGONAL MATRIX> <STRUCTURAL STEEL> <CORROSION RATE>.



Lic. Sandra Paulina Porrás Pumalema MSc.

C.I. 0603357062

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el acero estructural se ha convertido en un material mayormente empleado en fines estructurales, gracias a las propiedades que posee, tales como alta resistencia, tensión, compresión y elasticidad, entre otras, por lo tanto, con el transcurrir de los años han generado seguridad y una gran ayuda al momento de la construcción de puentes, edificios, torres y equipos industriales, sin embargo, uno de los mayores problemas que tiene este acero, es la corrosión.

Como sabemos, la corrosión es un fenómeno químico que ataca a un determinado metal, en el que la velocidad y los efectos que estos tengan a largo o corto plazo, estarán en función de variables ambientales y el tipo de elemento afectado, puesto que la corrosión ocasiona que un metal regrese a su forma iónica; pues, al entrar en contacto el acero con el agua y aire, este afectará al mismo de manera ininterrumpida; pero si el acero ya en proceso de corrosión por factores como el agua y aire, entrara en contacto con otras variables considerables como la humedad, salinidad o contaminantes ácidos, la tasa de corrosión será mayor y la vida útil del acero disminuirá considerablemente. Por tal razón en un acero al encontrar los primeros signos de corrosión es de gran importancia tomar medidas que ayuden a prevenir dicho fenómeno, como, por ejemplo, eliminando del ambiente todo tipo de agente corrosivo, comprobando que los alrededores se encuentren secos y libres de humedad, e inclusive aplicando un adecuado tratamiento superficial.

Considerando también que el diseño experimental basado en los métodos de Taguchi, son ideales para investigaciones de ingeniería y estadística, puesto que el enfoque de Taguchi busca encontrar una apropiada selección de niveles y variables de control, para lograr minimizar la variabilidad que transmiten los elementos de ruido y así lograr un resultado óptimo, por tal razón el presente trabajo de investigación se centrará en dicha metodología para establecer las variables que se involucran con el proceso de corrosión de los aceros estructurales, y para plantear el número de experimentos requeridos para alcanzar resultado óptimos sobre la tasa de corrosión en el acero de construcción; sin embargo también se habla un poco sobre el diseño experimental mediante el método factorial, puesto que esta técnica permite analizar las consecuencias de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente. En un diseño factorial, las variables independientes se combinan en todas las posibles iteraciones, lo que permite determinar cómo cada variable influye en la variable dependiente individualmente y en conjunto. Por ejemplo, si se desea estudiar cómo la temperatura y la humedad afectan el crecimiento de las plantas, se pueden realizar experimentos donde se varíe la temperatura y la humedad de manera independiente y en combinación.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad el efecto de la corrosión se encuentra en muchos de los procesos industriales e inclusive en la comodidad de nuestros hogares; sin embargo, el grado de afectación que este ocasione en un determinado elemento, equipo o proceso, dependerá de la función requerida o función inherente; no obstante, a nivel industrial los efectos serán cuantiosos; es importante recalcar, que hoy en día existe una carencia de diferentes métodos estadísticos que permitan controlar la tasa de corrosión, mediante un análisis de las variables inmiscuidas en el proceso; ya sea por falta de interés en prevención de la corrosión por parte de las industrias , o por falta de infraestructura para la realización de las investigaciones. Es por esto que se debe estudiar a profundidad los fundamentos de la corrosión para realizar correctamente un determinado método experimental y obtener datos que nos ayude a controlar la corrosión para lograr captar el interés estudiantil e industrial; en aspectos de diseños estadísticos para diferentes temas de investigación y control de la tasa de corrosión, respectivamente, por ende, también se debe establecer un procedimiento óptimo para llevar a cabo los métodos experimentales que se esté por desarrollar.

### 1.2. Limitaciones y delimitaciones

Para el desarrollo del presente trabajo de integración curricular nos centraremos en los aceros como: “acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica”, para posteriormente considerar los factores que intervienen en los ensayos de corrosión; teniendo presente que se trabaja bajo un ambiente corrosivo controlable, para que finalmente se analice estadísticamente las variables presentes en el proceso de corrosión mediante herramientas informáticas como Minitab, teniendo presente que la única manera de obtener la información es mediante revistas científicas de alto impacto, trabajos de titulación y libros; todo este trabajo se realizará en un tiempo aproximado de 5 meses.

### 1.3. Problema general de investigación

¿Actualmente existen métodos estadísticos que determinen las variables que reducen o aumentan la tasa de corrosión en el acero estructural?

## **1.4. Problemas específicos de investigación**

¿La metodología de Taguchi permite determinar las variables que tienen mayor impacto en la tasa de corrosión?

¿Existe el interés por la prevención de la corrosión en el acero estructural a nivel laboral, mediante alguna herramienta estadística?

¿Se realizan investigaciones sobre los factores que intervienen considerablemente en la tasa de corrosión de los aceros estructurales?

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Aplicar la metodología de Taguchi para determinar las variables que intervienen en los ensayos de corrosión.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

Crear las matrices ortogonales de Taguchi en función al número adecuado de experimentos.

Determinar las variables que intervienen en los ensayos de corrosión del acero estructural.

Aplicar el análisis de varianza y coeficiente de modelos estimados en el arreglo ortogonal de Taguchi.

Elaborar un manual de usuario guía para proporcionar el número adecuado de experimentos.

## **1.6. Justificación**

### ***1.6.1. Justificación teórica***

Puesto que hoy en día, el bajo conocimiento sobre las variables estructurales y ambientales que afectan la corrosión en un acero; para lograr determinar la combinación más óptima de factores que controlen la tasa de corrosión mediante algún método estadístico, son bajas; con este trabajo

se pretende determinar dichas variables que intervienen en la corrosión de un metal, para lograr captar el interés por muchos profesionales, con el propósito de que a futuro se siga proponiendo estrategias efectivas que logren bajar o controlar la tasa de corrosión en un acero estructural.

### **1.6.2. *Justificación metodológica***

Considerando que en la actualidad no se encuentran muchos métodos estadísticos que establecen los factores, que aumentan o bajan la tasa de corrosión en un acero; en función a variables de manufactura, para obtener un valor de corrosión lo más bajo posible, se pretende establecer un método estadístico que podrá ser aplicado para futuras investigaciones e inclusive puede ser llevado al ámbito laboral, con el propósito de tomar medidas que favorezcan la mejora de las utilidades y vida útil de cada elemento estructural.

### **1.6.3. *Justificación práctica***

Con el método estadístico que permite establecer las variables que reducen o aumentan la corrosión mediante ensayos por inmersión en el laboratorio; en el ámbito laboral nos permitirá elaborar un plan que ayude a reducir o controlar las variables que afectan significativamente a la corrosión de un acero, como por ejemplo el tipo de limpieza aplicada a un acero, de manera que, al aplicar un limpieza adecuada, la velocidad de corrosión disminuirá, dando como resultado una mayor vida útil de elementos de maquinaria o edificaciones, y como consecuencia favorable, las ganancias de la empresa aumentarán; en el caso de los elementos de las máquinas, otro beneficio que se puede tener presente, es que la probabilidad de que un elemento falle por corrosión sea baja.

## **1.7. Hipótesis**

Taguchi permite obtener las variables que tienen más impacto en la medida de tasa de corrosión.

### **Variable dependiente:**

Tasa de corrosión.

### **Variable independiente:**

Número de variables.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

Actualmente la corrosión es un proceso que afecta a toda la industria e inclusive a cada uno de nosotros en nuestro diario vivir, pues este efecto está presente en todos los metales e inclusive en la misma naturaleza; por tanto, la corrosión es un fenómeno que hace mención a la reacción química y electroquímica presente en un metal o una aleación metálica y su entorno, haciendo que vuelva a un estado de energía bajo (Puerto, 2022, p.11).

Para entender mejor el proceso de la corrosión, haremos énfasis en lo que Cabrera menciona:

*La corrosión se produce cuando un metal libre regresa a su estado de más baja energía, es decir a su forma combinada (productos de corrosión), siendo el estado más estable para un metal, se puede decir que cuanto mayor sea la cantidad de energía empleada para la obtención de un metal desde su forma mineral, mayor será su tendencia para volver a su estado combinado y así estabilizarse. (Cabrera Artieda, 2022, p.9)*

Prácticamente, desde el punto de vista químico, se determina que la corrosión es el tránsito de un metal que parte desde su forma elemental hasta la forma iónica, como producto del contacto con el ambiente, lo cual producirá óxidos, hidróxidos entre otros (Rojas, 2021, p.1).

Actualmente las industrias son las más afectadas por esta problemática, pues las consecuencias dependerán del proceso; por ejemplo, en tuberías que transporten un fluido inflamable, al empezar a esparcirse por el ambiente, pueden traer consecuencias como un incendio de gran magnitud e intoxicación del personal que se encuentre dentro del área, tales consecuencias se pueden evitar controlando el nivel de humedad, temperatura y Ph del suelo, puesto que un ambiente lleno de humedad, presentará una mayor tasa de corrosión debido a la presencia de agua evaporada presente en los metales (Cabrera Artieda, 2022, pp.10-11).

Como sabemos, la corrosión tarde o temprano terminará con la vida útil de un metal, sin embargo, los esfuerzos por lograr que la corrosión no consuma rápidamente los elementos y estructuras metálicas son bajos, ya sea por bajo interés o por mala realización del diseño experimental; como

un incorrecto diseño estadístico para garantizar su eficiencia con menor recurso de tiempo y materiales, mala planeación del diseño experimental o mala selección de las variables al momento de estructurar el método experimental (Dominguez y Castaño 2010, p.2).

## **2.2. Acero estructural**

El acero estructural es una clase de acero fundido que es diseñado y fabricado específicamente para uso en la construcción de estructuras y edificios. Este material presenta elevada resistencia y durabilidad, por tal razón soporta cargas extremas y mantiene su integridad estructural durante décadas. El acero estructural se fabrica mediante la adición de otros elementos, como el carbono, el manganeso, el silicio, entre otros, para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Además, se pueden aplicar diferentes procesos de fabricación, como el laminado en caliente o en frío, para lograr diferentes formas y tamaños. Por ejemplo, el acero ASTM A572 es un acero estructural que se encuentra en el grupo de alta resistencia y baja aleación, puesto que está aleado con Niobio y Vanadio, dichos elementos antes mencionados le brindan calidad a la estructura; este acero presenta ductilidad, facilidad al rolado y soldado, también presenta resistencia a la fatiga, por lo tanto, cumple con varias normas internacionales (Barragán y Llive 2019, p.3).

Entre las ventajas del acero estructural se encuentran su alta resistencia y rigidez, su resistencia al fuego, la posibilidad de prefabricación de elementos y componentes para una fácil y rápida instalación, su capacidad de adaptarse a diferentes diseños y su facilidad de mantenimiento y reparación. Este acero es empleado en la construcción de una gran variedad de estructuras que van desde puentes y rascacielos, hasta edificios industriales y residenciales; como sabemos este acero es un material clave en la ingeniería civil y la arquitectura moderna.

### **2.2.1. Propiedades del acero estructural**

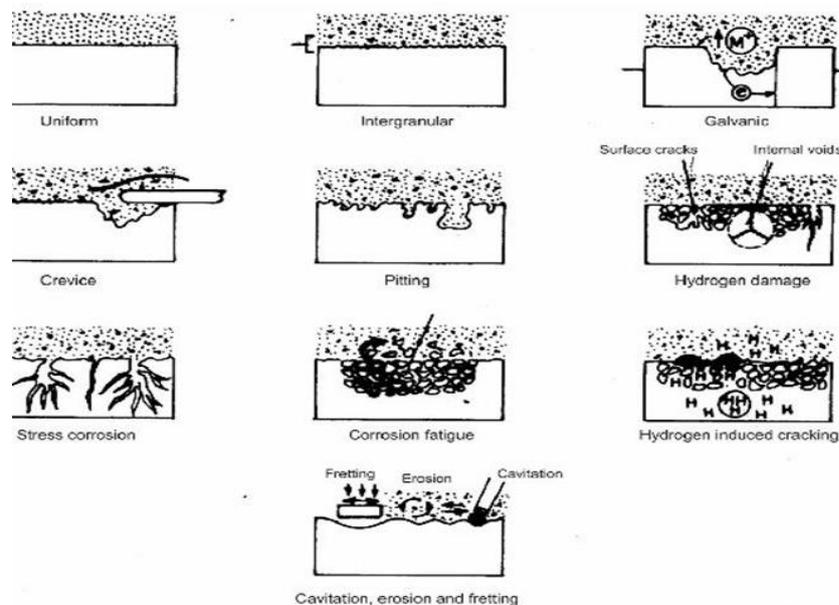
El acero estructural es conocido por tener un conjunto de propiedades que lo hacen único en la elaboración de estructuras y construcción de edificios. A continuación, se habla de algunas propiedades importantes:

- **Esfuerzo de fluencia.** – El esfuerzo de fluencia se refiere al nivel de tensión al que el acero comienza a deformarse permanentemente. El esfuerzo de fluencia del acero estructural depende de su grado y composición química. Por ejemplo, el acero de alta resistencia y baja influencia (HSLA) tiene un esfuerzo de fluencia más alto que el acero al carbono común.

- **Resistencia a la tracción.** – Se conoce como resistencia a la tracción al valor que tiene un material para resistir las tensiones de tracción sin que este se fracture. En el caso del acero, dicha resistencia hace referencia al nivel máximo de tensión que puede soportar antes de fracturarse.
- **Elongación.** - La elongación en el acero estructural hace referencia a la capacidad del material para deformarse antes de fracturarse bajo fuerzas de tracción. Se expresa en porcentaje y se define como el cambio en la longitud original del material dividido por la longitud original, multiplicado por 100.

### 2.3. Corrosión

Como sabemos la corrosión es un proceso químico que está presente en el material, cuando se deteriora o se degrada debido a la interacción con su entorno y representa un problema común en materiales metálicos; como el acero, y son ocasionados por diferentes factores, como la humedad, la exposición a productos químicos, la exposición al aire, el nivel de pH, la temperatura y al agua, entre otros. Este fenómeno logra perturbar la apariencia y la integridad de los metales, y en algunos casos, puede hacerlos peligrosos o inútiles. Por ejemplo, la corrosión de las tuberías puede causar fugas, mientras que la corrosión de las estructuras metálicas puede hacer que se debiliten y eventualmente colapsen.



**Ilustración 2-1:** Representación de los tipos de corrosión

Fuente: (Barragán y Llive, 2019)

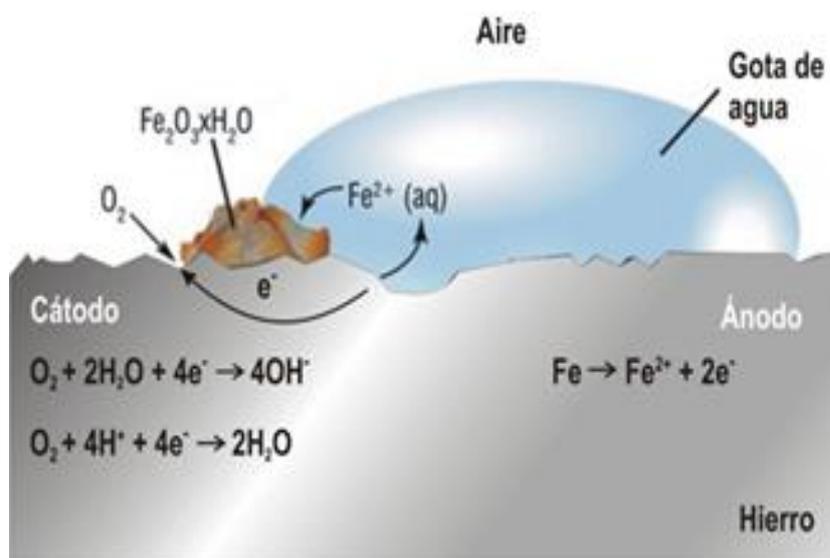
Barragán y Llive definen a este fenómeno de la siguiente manera:

*El deterioro de un metal que reacciona químicamente al ambiente expuesto se puede definir como corrosión, la corrosión en los metales es muy común ya que tienen electrones libres y estos pueden establecer dentro de su estructura celdas electroquímicas, la velocidad a la que se da la corrosión depende de factores como la temperatura, el medio, las concentraciones de productos y reactivos. (Barragán y Llive 2019, p.11).*

Existen diferentes formas de corrosión, como la corrosión uniforme, que se extiende de forma similar por toda la zona del metal, y la corrosión por picadura, que se presenta como pequeñas depresiones o agujeros en la superficie del metal. También existen otras formas de corrosión, como la corrosión galvánica, la corrosión por erosión, entre otras; Ilustración 2-1.

Para prevenir o controlar este proceso químico, se pueden utilizar diferentes técnicas, como el revestimiento de los materiales con capas protectoras, la aplicación de productos químicos inhibidores de la corrosión y con la instalación de técnicas de monitoreo que permitan detectar tempranamente la corrosión, entre otras.

### 2.3.1. Fundamentos de la corrosión



**Ilustración 2-2:** Reacciones presentes en la corrosión

Fuente: (Wright, 2013)

El fundamento de la corrosión se basa en la reacción química entre un material metálico y su entorno, que conduce a la degradación y el deterioro del material. La corrosión es causada por la

transferencia de electrones, que van desde el metal hacia el medio ambiente, lo que puede ser acelerado por diversos factores, como la humedad, la presencia de productos químicos, la exposición al aire y al agua, entre otros. Para comprender un poco sobre el proceso químico de la corrosión tenemos un elemento que está en contacto con el ambiente y una partícula de agua; Ilustración 2-2, si el Ph es menor que 4, la corrosión es intensa justamente por los iones de hidrógeno presentes en el cátodo; donde al estar en presencia con el oxígeno, se da una reacción química en el que se obtiene H<sub>2</sub>O.

La comprensión de los fundamentos de la corrosión es esencial para desarrollar estrategias de prevención y mitigación, que admitan prolongar el tiempo de vida de los materiales y evitar costosas reparaciones y reemplazos. En este sentido, el estudio científico de la corrosión sigue siendo un tema de mayor atracción e interés hoy en día.

### **2.3.2. Corrosión en materiales metálicos**

“La corrosión en materiales metálicos es un proceso electroquímico complejo que tiende a acelerarse cuando se exponen con agentes contaminantes y factores ambientales adversos” (Córdova, 2017, p.21), pues la corrosión deteriora gradualmente al metal debido a la exposición con su entorno. La corrosión tiene su origen mediante factores como humedad, la exposición a productos químicos corrosivos, la presencia de microorganismos, entre otros. En la corrosión, los átomos de metal pierden electrones, lo que se llama oxidación, y se disuelven en el líquido o en el aire. Este proceso puede resultar en creación de capas conformadas por óxido sobre la superficie metálica, que a su vez puede debilitar el metal y reducir su vida útil.

Como se mencionó anteriormente, la corrosión en los metales se puede clasificar en varios tipos, como la corrosión uniforme, la corrosión por picadura, la corrosión galvánica, la corrosión por erosión, la corrosión por tensión, etc., de manera que cada tipo de corrosión presenta diferentes características que pueden afectar a los metales de manera diferente, sin embargo existe la posibilidad de prevenir dicho efecto mediante algunas técnicas como: el uso de aleaciones que brinden al metal una mejor resistencia a corroerse, la utilización de materiales fuertes para la corrosión en aplicaciones específicas, e inclusive se puede prevenir mediante un mantenimiento adecuado, para detectar y tratar la corrosión antes de que cause daños significativos; para Lema y Gavilán (2020, p.18), la corrosión puede ser mitigada mediante la aplicación de técnicas de protección superficial, tales como el uso de recubrimientos protectores y la implementación de sistemas de protección catódica.

### 2.3.3. Tasa de corrosión

La tasa de corrosión se puede definir como una medida importante para evaluar la eficacia de los tratamientos anticorrosivos y los recubrimientos protectores en los materiales metálicos; de manera que, se puede definir como la velocidad a la que un material metálico empieza a corroerse dentro de un ambiente particular, en unidades de milímetros por año, representando la cantidad de material perdido por unidad de tiempo; por tal razón, la tasa de corrosión es un valor de medida necesario al momento de valorar la vida útil de un material metálico en un ambiente corrosivo.

“La velocidad en que se corroe el acero, puede ser expresada como la velocidad en que un material pierde progresivamente su espesor inicial, el que se transformará en óxido y será expresado en unidad de tiempo ( $\frac{\mu m}{año}$ ), dicha medida también puede ser presentada en unidades electroquímicas, tales como  $\frac{mA}{m^2}$  ó  $\frac{\mu A}{cm^2}$ ” (Garcés et al. 2020, p.1).

El riesgo de corrosión se divide en cuatro categorías en función a la densidad de corriente de corrosión, Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Riesgo de corrosión, según de la densidad de corriente de corrosión

Densidad corriente de corrosión, $i_{corr}$ ( $\frac{\mu A}{cm^2}$ )	Categoría del riesgo de corrosión
<0,1	Despreciable
0,1 a 0,5	Moderado
0,5 a 1	Elevado
>1	Muy elevado

Fuente: Garcés, 2020

### 2.3.4. Corrosión en acero estructural

El fenómeno de la corrosión se ve involucrado en todos los metales, y por ende el acero estructural no es una excepción. La corrosión en el acero estructural puede ser causada por varios factores, incluyendo la exposición al aire, la humedad y los agentes químicos corrosivos. Este proceso genera una disminución significativa de la resistencia y la durabilidad del acero, lo que puede ser particularmente problemático en estructuras de construcción y puentes; según una tesis de maestría realizada por García (2020, pp.6-8), la corrosión en el acero estructural es un proceso complejo donde se relaciona con la interacción de factores ambientales y físico-químicos; tales como la aparición de cloruros, humedad, pH y temperatura. Por ejemplo, la presencia de cloruros, representa un factor sustancial en la corrosión del acero estructural, ya que puede provocar la

ruptura de la película inerte “película pasivante” en las paredes del acero, lo que acelera la corrosión. Además, la presencia de partículas contaminantes en el ambiente, como gases y partículas, puede aumentar la corrosión del acero estructural.

En un trabajo de investigación de Valcare y Vázquez (2016, pp.10-18), aborda el problema de la corrosión en el acero estructural en ambientes marinos, y dice que, la exposición de un determinado al aire salino y la humedad en los ambientes marinos constituyen un componente importante en la corrosión del acero estructural, y puede resultar en una pérdida significativa de espesor del material. Además, el incremento de temperatura, la disposición de microorganismos y sales en el agua de mar, pueden acelerar la corrosión del acero estructural.

La corrosión en el acero estructural puede ser mitigada mediante la aplicación de tratamientos anticorrosivos, a través del personal especializado en el área de materiales. Según una tesis de Carpio (2013, pp.60-80), la aplicación de recubrimientos protectores puede reducir significativamente la corrosión en el acero estructural en ambientes corrosivos, además, la implementación de sistemas de protección catódica también puede ayudar a prevenir la corrosión en el acero estructural. Estos sistemas funcionan mediante la aplicación de una corriente eléctrica externa que induce una reacción catódica en la superficie del acero, para proteger la estructura de la corrosión.



**Ilustración 2-3:** Acero estructural Corroído

Fuente: (Parra, 2018)

En conclusión, la corrosión en el acero estructural representa un problema de gran impacto en la actualidad, puesto que presenta un impacto significativo en la resistencia de la estructura y por

ende en la vida útil del elemento, Ilustración 2-3. La presencia de factores ambientales, físico-químicos y la exposición a ambientes corrosivos son factores importantes en la corrosión del acero estructural, sin embargo, la aplicación de tratamientos anticorrosivos y técnicos de protección puede ayudar a reducir la corrosión y mejorar la durabilidad y resistencia del acero estructural.

## **2.4. Factores que propician la corrosión**

Como sabemos, la corrosión en materiales metálicos es una transformación electroquímica compleja que se origina por una combinación de factores, tales como el ambiente corrosivo, el tipo de metal, la presencia de microorganismos, la temperatura y la humedad, entre otros. En el trabajo de (Puerto, 2022, pp.17-20) "*Métodos de control de corrosión, aplicados a nivel industrial en la protección de estructuras metálicas*" se detallan algunos de los factores que influyen en la corrosión de los metales, para lo cual, en los siguientes apartados se hablará de algunas variables, y del cómo estos intervienen en la corrosión:

### **2.4.1. pH**

El pH representa un valor de acidez o alcalinidad dentro de un medio acuoso; porque es conceptualizado como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en el medio. Comúnmente el pH es medido en un rango que oscila entre 0 a 14, donde se considera que un pH de 7 es un valor neutral, un pH menor que 7 representa acidez, mientras que un pH superior a 7, hace mención a una solución alcalinidad. El pH es una variable transcendental para la mayoría de los procedimientos químicos y biológicos, ya que puede afectar la solubilidad, la reactividad y la estabilidad de los compuestos en solución. Por lo tanto, es importante controlar y ajustar el pH en muchos campos, como la química, la biología y la ingeniería.

En términos de ingeniería de materiales, el pH es un componente clave en el proceso de corrosión, ya que puede influir en la formación y estabilidad de partículas de corrosión en una superficie metálica. La corrosión ácida se produce cuando el pH disminuye, mientras que la corrosión alcalina se produce cuando el pH aumenta. Además, el pH puede afectar la velocidad de corrosión y la capacidad de protección de películas de óxido.

### **2.4.2. Humedad**

Como sabemos, la humedad hace énfasis a la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire o en una determinada solución. En términos más específicos, se trata de la masa de agua en

forma de gas que se encuentra en una determinada cantidad de aire o en una superficie. Esta variable se mide en porcentaje, de tal manera que se exprese la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire, en relación con el valor máximo que el ambiente puede retener dicho vapor de agua, a temperatura y presión específica determinada. La humedad puede tener un impacto significativo, en la calidad de los materiales y por ende en los procesos industrializados.

Según la investigación de Bruno et al. (2021, pp.22-25), la presencia de agua y la humedad relativa pueden acelerar significativamente la velocidad de corrosión de materiales metálicos. Los autores indican que la humedad puede aumentar la conductividad eléctrica de los electrolitos, dando como consecuencia el incremento sobre la velocidad de reacción, en la corrosión electroquímica.

#### **2.4.3. Temperatura**

La temperatura es un valor de energía térmica contenida en un objeto, que se relaciona con la velocidad promedio de las moléculas que lo componen y tiene una gran importancia en numerosos procesos, tanto naturales como tecnológicos. Salazar en su artículo científico, dice que la velocidad de corrosión asciende al aumentar de la temperatura, justamente por la rápida expansión del oxígeno del ambiente en el material corroído (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2008, p.134).

#### **2.4.4. Presión**

La presión es una variable importante en la corrosión, ya que puede tener un resultado significativo en la velocidad y el mecanismo de corrosión en los materiales metálicos. En ambientes de alta presión, como los que se encuentran en sistemas de tuberías o en aplicaciones marinas, se pueden generar corrientes de flujo que pueden acelerar la corrosión por erosión o por cavitación. La cavitación se refiere a la formación de burbujas en un líquido que implosionan cuando se encuentran con una superficie metálica, lo que puede generar picaduras y agujeros en el material. Según la investigación de Sharma, la corrosión bajo tensión puede ser un resultado directo de la presión aplicada a una estructura metálica, como tuberías o recipientes a presión (López, 2013, pp.39-45).

Una vez explicado los tipos de corrosión, la manera en que estos afectan a los materiales y en especial al acero estructural, y comprendiendo los factores que están involucrados en la corrosión; procederé a exponer sobre el método experimental, el cual nos servirá como complemento para poder alcanzar el objetivo de esta investigación, el cual es cuantificar el número de muestras necesarias para medir la tasa de corrosión.

## 2.5. Método experimental

Un método experimental es una orientación a alcanzar determinados objetivos, por lo tanto, es utilizado en la investigación científica para indagar la conexión entre dos o más variables, a través del manejo de variables independientes y medición de los efectos resultantes en las variables dependientes. En general, el método experimental implica la creación de un entorno controlado en el que se pueden medir los efectos de las variables manipuladas. Los experimentos se pueden llevar a cabo en diferentes campos científicos, como la física, la química, la biología, la psicología, la ingeniería, entre otros. En un experimento típico, se altera una variable independiente, mientras se controlan otras posibles variables que podrían influir en el resultado. Luego, se mide el efecto de la variable independiente sobre las variables dependientes.

Los experimentos se pueden diseñar de diferentes maneras, como experimentos simples, experimento doble ciego, experimentos controlados con placebo, entre otros. El diseño del experimento depende del objetivo del estudio, de las variables a manipular y los recursos disponibles. El método experimental se considera uno de los métodos más rigurosos y confiables para establecer relaciones causales entre variables. La experimentación controlada es un medio para evaluar la hipótesis científica y aumentar la comprensión del mundo natural y los procesos que lo conforman. Para poder entender el tema que trataremos de aquí en adelante, se definirá algunos conceptos básicos que son indispensables en el método experimental:

### 2.5.1. Definiciones básicas

- **Experimento.** - En un experimento, el investigador controla cuidadosamente las condiciones bajo las cuales se realizan las medidas para poder determinar con precisión los efectos que produce la variable independiente sobre la variable dependiente, por lo tanto, se puede definir como un cambio del escenario de operación dentro de un sistema, cuyo objetivo es medir los efectos que genera el cambio de las condiciones sobre una o más propiedades relacionadas a la respuesta obtenida.
- **Unidad experimental.** - La unidad experimental puede ser cualquier entidad que se ajuste a las características de los sujetos o elementos del estudio, como individuos, animales, plantas, parcelas, regiones geográficas, entre otros. La selección de la unidad experimental depende del objetivo del estudio y de las variables que se están manipulando y midiendo.

- **Variabes.** - Una variable se refiere a cualquier característica, condición o evento que se puede medir, manipular o controlar y que puede intervenir en los datos experimentales.

Existen dos tipos de variables en el diseño experimental: las variables independientes y las variables dependientes.

- Las variables independientes son aquellas que se manipulan o se controlan en el experimento para evaluar su efecto sobre la variable dependiente. Son las causas o factores que se están estudiando y se seleccionan antes del experimento.
- La variable dependiente es aquella que se mide y registra para evaluar el efecto de la variable independiente, con esta variable dependiente, se espera que sea influenciada por el manejo de la variable independiente y es el resultado o respuesta que se mide para determinar si existe una relación causal entre la variable independiente y la variable dependiente.

### **2.5.2. Clasificación y selección de los diseños experimentales**

En la actualidad se cuenta con una alta variedad de diseños experimentales que permiten estudiar una infinidad de dificultades que se van suscitando en la vida práctica, por lo tanto, es importante elegir correctamente un diseño óptimo bajo la visión del objetivo principal de la investigación, no obstante, necesario saber cómo se clasifican los diseños en función de los objetivos, el alcance y según la forma en que se asignan los sujetos o las unidades experimentales en los diferentes grupos de tratamientos; sin embargo para una correcta selección del diseño se debe considerar los aspectos que influyen en la selección del experimento, considerando en que si uno de esos aspectos cambia, el diseño también cambia.

A continuación, se detallan 5 aspectos a considerar al momento seleccionar un diseño:

- Objetivo del experimento.
- Cantidad de factores que se analizan.
- Número de niveles que contiene cada factor.
- Efectos que buscamos investigar.
- Costo, tiempo y precisión del experimento.

Para esta investigación haremos énfasis en la clasificación de experimentos en función de los objetivos:

- Diseños que comparan dos o más variables dentro un mismo ambiente experimental.
- Diseños que estudian las consecuencias de varios factores que intervienen directamente en la respuesta experimental.
- Diseños que determinan el punto óptimo de trabajo dentro de un determinado proceso.
- Diseños que permiten optimizar una mezcla dentro de un proceso.
- Diseños para obtener productos y generar procesos que sean tolerables a factores no controlables.

## **2.6. Planeación del experimento**

En este apartado se pretende establecer las pautas para diseñar el experimento, considerando que en la planeación del experimento se requiere eficiencia y efectividad en el trabajo mediante un correcto diseño estadístico, que garantice la eficiencia con la utilización de una menor cantidad de materiales y tiempo. El diseño estadístico en el experimento, es empleado para planear estrategias que nos permitan elegir, intervenir, estudiar y descifrar diferentes fenómenos de forma objetiva y sistemática (Dominguez y Castaño, 2010, p.1). Para establecer un buen diseño experimental es importante conocer el propósito del diseño; puesto que, el método experimental busca cuantificar y entender los efectos de situaciones escogidas y tratadas. Un enfoque sobre la estructura del experimento, que nos permite planear y realizar el diseño de experimentos es:

- Planteamiento del problema.
- Selección de factores y señalar los niveles.
- Elección de la variable respuesta.
- Diseñar y ejecutar el experimento.
- Analizar los datos extraídos.
- Exponer las conclusiones y recomendaciones.

### **2.6.1. Estructura del método experimental**

#### **2.6.1.1. Estructura de tratamiento**

Los elementos que conforman el tratamiento en un diseño experimental son:

- **Factor.** - Es una variable que se manipula intencionalmente para ver cómo afecta el resultado del experimento en una o más respuestas.
- **Nivel.** -El nivel se refiere al valor específico que toma un factor en un experimento. Por ejemplo, en un estudio de la tasa de estudiantes universitarios retirados en el último año de una determinada carrera es el factor, y las razones por las cual se retira como por ejemplo falta de presupuesto o pérdida de gratuidad, vendrían a ser los niveles y se establece que dicho facto presenta dos niveles.
- **Tratamiento.** - Hace referencia al número posible de combinaciones entre los niveles de los factores.
- **Efecto principal.** - Estos efectos se interpretan como el grado de importancia que causa el factor en la respuesta.
- **Iteración.** - Representa el enlace de dependencia entre los efectos que tienen dos o más factores; es decir que, si se tiene dos factores que presentan interacción entre sí, el efecto que tenga sobre la respuesta uno de estos factores, estará en función al nivel del otro factor.

#### 2.6.1.2. Estructura de diseño

En este apartado es necesario considerar los ruidos presentes en el diseño experimental, pues para (Domínguez y Castaño, 2010, p.4), el ruido tiene su origen a través de tres aspectos: el error de experimentación, de medición y error ambiental, considerando que en el sistema experimental siempre existen ruidos circundantes, pues dicho ruido se ve reflejado en la unidad experimental (UE), que está conformado por individuo y objeto al que se le impone de forma libre un tratamiento.

- **Error experimental.** -Es un error en el que cada diseño experimental genera de forma natural en un determinado estudio, este error no es observable, sin embargo, se presenta al comparar dos o más unidades experimentales que han sido tratadas por igual, justamente por la diferencia entre el resultado obtenido en cada experimento.
- **Error de medición.** – Este error es parte del error experimental y hace referencia a la variación aleatoria que ocurre cuando se realiza la medición de una variable en un

experimento. Este tipo de error puede ocurrir por diversas razones, como errores de calibración de instrumentos, errores humanos en la lectura de medición, variaciones en las condiciones ambientales, entre otras.

- **Error ambiental.** – Estos errores son variaciones aleatorias que pueden afectar los resultados en los resultados del experimento y se deben a condiciones externas que se encuentran fuera de los límites de control por parte del investigador. Estos errores pueden incluir variaciones en las condiciones ambientales, como cambios de temperatura, humedad, luz, ruido, vibraciones, entre otros. Los efectos de estos tipos de errores se logran evitar mediante la aleatorización de tratamientos.

### 2.6.1.3. *Aleatorización de tratamientos*

El propósito de la experimentación es entender las causas del por qué un fenómeno varía, y es aquí donde la aleatorización de tratamientos tiene un rol importante, puesto que dicha aleatorización permite identificar si los cambios presentes se deben a un error de experimentación o a los efectos de los factores de control dentro del ambiente experimental, sin embargo, en caso de que el diseño no cuente con la aleatorización de tratamientos, puede causar interpretaciones de variaciones erróneas. En cuanto a los efectos potenciales que producen los factores de control y el error experimental, dentro del sistema experimental, se debe tener presente el no mezclar dichos efectos al momento de analizar la manera en que afectan los factores de control en el sistema, por tal razón se creó la aleatorización de tratamientos. Si consideramos que en nuestro diseño experimental existe un significativo ruido ambiental que supera al error experimental, es necesario controlar dicho ruido ambiental “error ambiental”, mediante estrategias eficientes, Domínguez y Castaño en su libro “*Diseño de experimentos*” proponen dos formas de manejar el ruido ambiental, las cuales son:

- Tener presente los efectos no deseados, mediante la agrupación de unidades experimentales para bloquearlos antes de que estos sean tratados o a su vez midiendo covariables.
- Empleando dicho error ambiental con fines de robustificación.

### 2.6.2. *Variación experimental*

Considerando el ejemplo de Domínguez y Castaño en su libro “*Diseño de Experimentos*”, donde se tiene una variable respuesta expresada por  $Y$ , y cuyo objetivo experimental es observar las

diferencias entre  $k$  tratamientos, a través de los efectos que estos producen sobre la media de la variable respuesta; se desea comprobar si la respuesta experimental varía por cada tratamiento, por lo que, se debe realizar un experimento denotada por  $y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}, \dots, y_{n1}, y_{n2}, y_{n3}, \dots, y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn}$ , donde  $y_{ij}$  representa la respuesta en un tratamiento  $i$  dentro de la unidad experimental (UE)  $j$  que recibió la respuesta, sin embargo se debe considerar que las UE son homogéneas en las respuestas antes de recibir algún tratamiento (Domínguez y Castaño, 2010, p.2). En conclusión, se debe establecer si los tratamientos aplicados difieren entre sí; estadísticamente ablando, median un análisis estadístico sobre la variable respuesta; por ejemplo, el Test de Análisis de la Varianza “ANOVA”

### 2.6.3. *Análisis de varianza*

“El análisis de varianza, conocido como ANOVA, es considerada como una técnica estadística empleada para el análisis de la variabilidad de datos, ya que permite establecer si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos” (Pincha y Pillajo, 2019, p.25); pues, el objetivo principal de esta técnica es descomponer la variabilidad total de los datos que se obtiene de diferentes fuentes, como la variabilidad dentro de grupos y entre grupos, para determinar si las diferencias observadas entre grupos son estadísticamente significativas o simplemente podría haber ocurrido debido al azar (Dagnino, 2014, p.306). Existen diferentes tipos de análisis de varianza; donde cada tipo de ANOVA, estará en función de la naturaleza del estudio, de los cuales tenemos un ANOVA de un solo factor, de dos factores y ANOVA de medidas repetidas “cuando las unidades experimentales se emplean en diferentes condiciones”; es importante recalcar que este análisis de varianza se emplea comúnmente en investigaciones experimentales y estudios donde se compraran múltiples tratamientos o grupos.

#### 2.6.3.1. *Procedimiento para realizar un ANOVA*

- **Planteamiento de Hipótesis.** - Es importante establecer una hipótesis nula ( $H_0$ ) donde generalmente asume que no hay significancia entre los grupos, y alternativa ( $H_1$ ), donde si establece que hay diferencias significativas, de los cuales, en función al nivel de significancia y a los datos obtenidos previo al análisis de varianza, se aceptará o no la hipótesis alternativa; es decir, considerando un nivel de significancia del 0.05, y que los datos arrojan un significancia menor a dicho valor, se asume que si existe diferencias entre los datos obtenidos, y caso contrario, sin son mayores a 0.05, se establece que no hay significancia entre los datos, y por ende se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

- **Recopilación de datos.** - Es importante adquirir los datos de los diferentes grupos a analizar, para lo cual es necesario que los datos estén distribuidos normalmente.
- **Identificación de variables.** - En función al tipo de estudio, es necesario definir las variables dependientes e independientes.
- **Cálculo de medias y varianza.** - En el análisis de varianza, se calcula las medias y varianza de cada grupo o factor, también es útil calcular la suma total de los cuadrados y la suma de cuadrados entre y dentro de los grupos, donde; para el cálculo de medias se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$  es la media.

$x_i$  es la suma de los valores individuales en el conjunto de datos.

$n$  es el número total de elementos en el conjunto de datos.

Para el cálculo de varianza muestral en el test ANOVA se emplea la siguiente expresión:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Donde:

$s^2$  es la varianza muestral.

$X_i$  son los valores individuales en el conjunto de datos.

$\bar{X}$  es la media.

$n$  es el conjunto de datos.

- **Determinar los grados de libertad.** - Es importante determinar los grados de libertad para cada fuente de variación entre grupos y dentro de los grupos, ya que son una medida de la cantidad de libertad que se tiene al hacer inferencias estadísticas.

Es sustancial recalcar que, para el análisis de varianza, existen grados de libertad para el numerador y denominador; los grados de libertad del numerador se relacionan con las diferencias entre las medias de los grupos y miden la variabilidad entre los grupos. En un diseño de ANOVA, los grados de libertad del numerador son iguales al número de grupos menos uno ( $k-1$ ), donde  $k$  es el número de grupos o niveles del factor que estás estudiando, mientras que los grados de libertad del denominador, están asociados con la variabilidad dentro de cada grupo y miden la variabilidad que no puede atribuirse a las diferencias entre los grupos. Los grados de libertad del denominador se calculan restando el número total de observaciones menos el número total de grupos ( $N-k$ ).

- **Cálculo de la estadística de prueba F.-** El estadístico F compara la variabilidad entre los grupos con la variabilidad dentro de los grupos, para lo cual se utilizan los grados de libertad.
- **Cálculo del nivel crítico de F.-** Teniendo presente los grados de libertad del numerado y denominador, y el nivel de significancia del estudio que se esté realizando, se puede determinar el nivel crítico de F en función a la tabla de distribución F o inclusive se puede determinar mediante algún software estadístico.
- **Interpretación de resultados.** - Si el valor calculado del estadístico F es mayor que el valor crítico F, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay diferencias significativas entre los grupos; de lo contrario, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula; para lo cual, se debe realizar una prueba de hipótesis utilizando la estadística F y un valor crítico de F, para un determinado nivel de significancia; por ejemplo (0,05).

#### **2.6.4. Coeficiente de modelos estimados**

Los coeficientes estimados en modelos estadísticos para diseños experimentales, brindan información de la relación cuantitativa entre las variables que pueden combinarse para obtener una comprensión más completa de los datos, en función al objetivo y naturaleza de la investigación. En el análisis de varianza, el coeficiente de modelos estimados, hace mención a los parámetros que se estiman al ajustar un modelo ANOVA a los datos, considerando que en algunos casos se puede expresar los resultados del análisis de varianza en términos de coeficientes para entender las diferencias dentro de los grupos o factores y poder predecir la relación entre variables y niveles con mayor seguridad.

### **2.6.5. Inferencia estadística y práctica**

En trabajos experimentales se resaltan dos tipos de inferencias o también conocido como generalizaciones; los cuales, son de gran importancia en dichos trabajos, estas inferencias son la estadística y práctica. La inferencia estadística describe la manera de emplear los datos muestrales para hacer afirmaciones o inferencias sobre la población interesada, esto se logra mediante el uso de técnicas estadísticas como la estimación de intervalos de confianza y la aplicación de pruebas de hipótesis. La inferencia estadística es esencial para validar las conclusiones obtenidas a partir de un experimento o estudio, e inclusive permite establecer si la información obtenida es estadísticamente significativa. Por otro lado, la inferencia práctica en el diseño experimental trata del proceso de diseñar y llevar a cabo experimentos de manera sistemática para obtener datos válidos y confiables. Esto implica definir adecuadamente el problema a investigar, seleccionar las variables relevantes, definir las condiciones de prueba, elegir una muestra representativa y aplicar correctamente las técnicas de medición y análisis de datos. La combinación de la inferencia estadística y la práctica en el diseño experimental, permite a los investigadores obtener resultados confiables y significativos; de manera que, permita tomar decisiones informadas basadas en evidencia. Al aplicar estas técnicas, es posible evitar errores comunes como la selección de muestras no representativas o la realización de pruebas estadísticas inapropiadas, lo que puede conducir a conclusiones erróneas y a una toma de decisiones equivocada. Una vez comprendido el objetivo del método experimental, su estructura y conceptos importantes para entender esta metodología, se procederá a explicar sobre el diseño estadístico de experimentos, ya que conforman la base fundamental de nuestra investigación.

### **2.7. Diseño estadístico de experimentos**

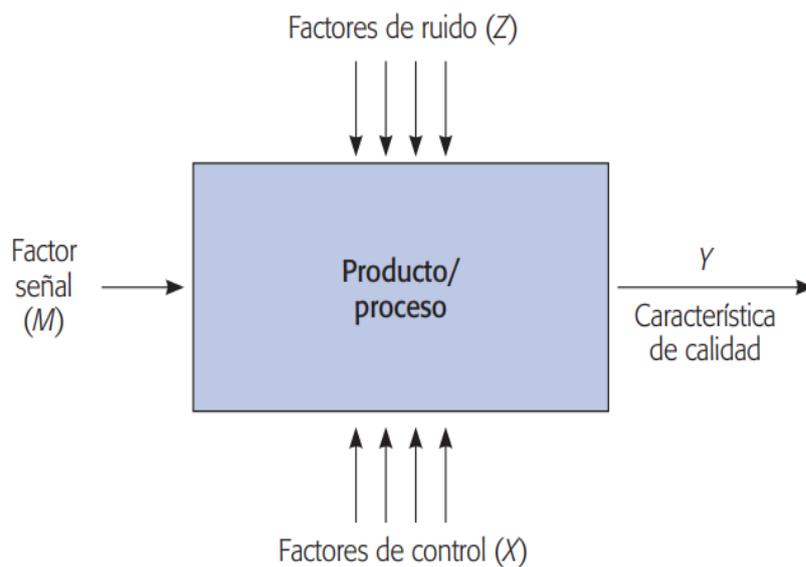
El diseño estadístico dentro de la experimentación, es considerado como una técnica empleada para planificar y realizar experimentos, cuyos objetivos sean los de alcanzar una máxima cantidad de datos experimentales, utilizando el menor número de observaciones posible. El diseño estadístico de experimento busca maximizar la exactitud y la confianza en los resultados experimentales, al mismo tiempo que minimiza el costo y el tiempo requerido para realizar el experimento. Para entender de mejor manera, “el diseño estadístico de experimentos hace mención a la programación de procedimientos que se deben ejecutar en función a un orden previamente establecido; para la recolección de información, y finalmente realizar un análisis de datos necesarios para estudiar un determinado problema investigativo” (Naranjo, 2019, p.5). El diseño estadístico de experimentos implica la identificación de variables relevantes que pueden afectar el resultado del experimento, la selección de niveles apropiados para cada variable y la

asignación de tratamientos a diferentes grupos de observación, también involucra la aplicación de técnicas estadísticas adecuadas para analizar los datos resultantes y extraer conclusiones significativas; “el diseño estadístico queda a criterio del investigador”. En consecuencia, el diseño estadístico de experimentación es reconocida como una técnica importante, para garantizar la validez y la fiabilidad de los resultados experimentales. Una vez entendido el tema del diseño estadístico experimental, se procederá a explicar algunas técnicas estadísticas que forman parte del diseño experimental, por lo tanto, servirán de fundamento en el desarrollo metodológico de la actual investigación.

### 2.7.1. Tipos de técnicas estadísticas

### 2.7.2. Método de Taguchi

El método de Taguchi es una técnica estadística desarrollada por el japonés Genichi Taguchi, que se utiliza para mejorar la calidad de productos y procesos mediante la identificación y reducción de la adquisición en el proceso de producción. El método de Taguchi se basa en la idea de que la variación en un proceso de producción puede ser controlada y reducida mediante el diseño adecuado. En lugar de cambiar un solo factor, Taguchi cambia múltiples factores para alcanzar la combinación óptima de factores que minimicen el proceso, Ilustración 2-4



**Ilustración 2-4:** Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto

Fuente: (Gutiérrez y Vara, 2008)

El método de Taguchi utiliza un enfoque de diseño de experimentos ortogonales, lo que significa que se seleccionan los niveles de los factores para cada experimento de manera que los efectos de los factores sean independientes entre sí. Naranjo en su tesis de “Diseños Experimentales de Taguchi fraccionados”, cataloga que esta metodología gira alrededor de la implementación de diseños ortogonales en el que dicho arreglo ortogonal involucrado con variables de control, se mezclan con un arreglo ortogonal que posee variables de ruido (Naranjo, 2019, p.23). Esto permite una evaluación eficiente de los efectos ocasionados por los factores, y una determinación rápida de la combinación óptima de factores. El método de Taguchi se utiliza en una amplia variedad de industrias, incluyendo la automotriz, electrónica, manufacturera y de servicios. Se ha demostrado que el método de Taguchi logra conseguir una óptima calidad en los productos a través de la mejor combinación de procedimientos, y así bajar los costos de fabricación y por ende mejorar la satisfacción del cliente.

En la tesis de Naranjo se mencionan 5 aspectos generales de esta metodología, los cuales son:

- Identificar el problema.
- Seleccionar factores.
- Seleccionar un determinado arreglo experimental para los factores manipulables y otro arreglo para factores de ruido.
- Combinar los arreglos en matrices externas e internas.
- Analizar los datos y conclusiones.

En conclusión, la metodología de Taguchi es una técnica utilizada en la elaboración de experimentos mediante matrices ortogonales que indican qué y cuantos experimentos se deben desarrollar, para determinados factores y niveles.

#### *2.7.2.1. Filosofía de Taguchi*

La filosofía de Taguchi se concentra en alcanzar la mejora continua de la calidad de los productos y procesos mediante el uso de la ingeniería estadística y el enfoque en el cliente. Esta filosofía se fundamenta en el pensamiento de que la calidad no debe ser una idea posterior al proceso de producción, sino que debe ser diseñada y construida en el proceso desde el principio. Según Taguchi, la calidad no es simplemente cumplir con los estándares y especificaciones, sino que la calidad busca alcanzar la satisfacción de requerimientos y posibilidades del cliente. Por lo tanto, el enfoque debe estar en la reducción de la preferencia en el proceso de producción para minimizar los defectos y aumentar la satisfacción del cliente.

A continuación, se presenta algunas de las aportaciones en el ámbito de la calidad, que ha proporcionado la metodología de Taguchi:

- **Calidad robusta:** Taguchi promueve el concepto de calidad robusta, que trata sobre la capacidad de un producto o proceso para ser resistente a las variaciones en las condiciones de funcionamiento y fabricación. El objetivo es crear productos y procesos que sean menos sensibles a las fuentes de suministro, lo que resulta en una mayor calidad y consistencia (Zambrano y Catota, 2020, p.10).
- **Diseño de experimentos (DOE):** Taguchi utiliza el diseño de experimentos con el propósito de buscar factores críticos que mejoren la eficacia de un bien o proceso, y así determinar las configuraciones óptimas de esos factores. El DOE se utiliza para hallar la combinación ideal de niveles y factores que minimice la variación y maximice el rendimiento.
- **Función de pérdida:** Taguchi introduce la noción de una función de pérdida, que cuantifica la reducción económica o de calidad asociada con el deseo de una característica del objetivo deseado. Al considerar las pérdidas asociadas con la preferencia y el rendimiento subóptimo, se busca minimizar las pérdidas a través de la optimización del diseño y el proceso.

En conclusión, la filosofía de Taguchi se centra en el pensamiento de que la calidad y la eficiencia se pueden mejorar al reducir la selección y optimizar el diseño y los procesos. Esta metodología se centra en el diseño de experimentos, la calidad robusta y la función de pérdida, para lograr mejoras significativas en cuanto a calidad de producto y eficiencia de procesos.

#### 2.7.2.2. Arreglos ortogonales

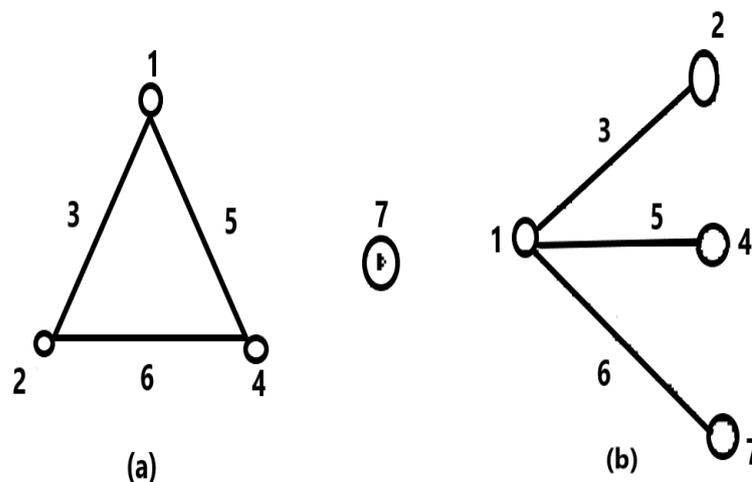
Un arreglo ortogonal son diseños expuestos por Taguchi; donde se dice, que el número de combinaciones de los niveles correspondientes a dos factores para un determinado caso, se vuelve a repetir en el diseño experimental. “Los arreglos ortogonales son un conjunto de tablas numéricas donde cada una puede ser usada para diseñar diversas situaciones experimentales” (Naranjo, 2019, p.19). Estos arreglos permiten establecer un número mínimo de experimentos para un determinado factor. Para comprender de mejor manera sobre los arreglos ortogonales, se utilizará como ejemplo un arreglo ortogonal  $AO_8(2^7)$ ; dicho ejemplo es extraído del libro “Diseños de experimentos” (Domínguez y Castaño, 2010, p.170).

**Tabla 2-2:** Descripción del arreglo ortogonal  $AO_8(2^7)$

Columnas (k)							
Tratamiento (p)	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fuente: (Dominguez; Castaño, 2010)

Los arreglos ortogonales de dos niveles están representados por la expresión  $AO_p(2^k)$ , donde  $p$  hace referencia al número de tratamientos; es decir el número de combinaciones posibles entre los niveles de un determinado factor, y  $k$  representa el número de factores. Estos arreglos ortogonales se expresan en tablas ya determinadas, mismas que están conformadas por  $k$  columnas y  $p$  renglones; se debe considerar que, dentro de la matriz ortogonal, los niveles que poseen los factores se expresan por números naturales en función del número de niveles; Tabla 2-2, donde solo se tiene dos niveles. Para un arreglo ortogonal  $AO_8(2^7)$ ; se establece que dicho arreglo está representado por 7 factores y dos niveles, y está en función a las combinaciones posibles entre niveles según del número de factores, Tabla 2-2.



**Ilustración 2-5:** Gráficas lineales de una configuración ortogonal  $AO_8(2^7)$

Fuente: (Dominguez; Castaño, 2010)

Generalmente los arreglos ortogonales cuentan con gráficas lineales y la tabla de iteraciones, Tabla 2-3, lo que nos permite establecer factores y combinaciones de interés en el arreglo, estas gráficas lineales representan la equivalencia de las matrices triangulares. Es importante considerar que gráfico lineal b), lustración 2-5, es utilizado en experimentos donde la interacción de uno o más factores son importantes, teniendo presente que los arreglos ortogonales trabajan con iteraciones en función al número de niveles y factores, Tabla 2-3. El arreglo  $AO_8 (2^7)$  cuenta con 8 tratamientos “corridas”, Tabla 2-2, y según el gráfico lineal, Ilustración 2-5, presenta 7 efectos como máximos, tal como se planteó en el arreglo ortogonal del ejemplo.

**Tabla 2-3:** Tabla de iteraciones para 11 factores

Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Fuente: (Dominguez; Castaño, 2010)

También es necesario considerar los factores de ruidos en caso de presentarse dentro del sistema experimental, tal como se ha explicado en el apartado 2.6.1.2, sobre los ruidos presentes en los diseños experimentales, estos ruidos son considerados como variables de ruido o variables no controlables; sin embargo, en el diseño de experimentos con Taguchi, no se busca eliminar el ruido; si no que, mediante el control de los factores con sus respectivos niveles, se desea busca un punto de equilibrio, con el objetivo de que el impacto de las variables de ruido o factores de ruido, sean muy bajos.

Es por esto que Taguchi emplea la razón señal/ruido en arreglos ortogonales, mediante un diseño experimental con arreglo interno y externo. De acuerdo con Navarrete (2012, p.17), la razón señal/ruido presenta un alto valor característico de eficacia para las corridas experimentales.

En diseños de experimentos, también es común encontrar matrices con un arreglo interno y externo, Ilustración 2-6, que son empleados para trabajar con variables de ruido. Para el diseño con arreglos internos y externos, Taguchi propone algunas expresiones estadísticas de razón señal/ruido, en función de la característica u objetivo buscado en la variable respuesta, Tabla 2-4.

		Arreglo externo												Media		Razón señal/ruido	
		Factores controlables							Factores de ruido								
		A	B	C	D	E	F	G	K	L	M	N					
Arreglo interno	1	1	1	1	1	1	1	y <sub>11</sub>	y <sub>12</sub>	•	•	•	y <sub>19</sub>	$\bar{y}_1$	S/R <sub>1</sub>		
	1	1	1	2	2	2	2	y <sub>21</sub>	y <sub>22</sub>	•	•	•	y <sub>29</sub>	$\bar{y}_2$	S/R <sub>2</sub>		
	1	2	2	1	1	2	2	•	•				•	$\bar{y}_3$	S/R <sub>3</sub>		
	1	2	2	2	2	1	1	•	•				•	$\bar{y}_4$	S/R <sub>4</sub>		
	2	1	2	1	2	1	2	•	•				•	$\bar{y}_5$	S/R <sub>5</sub>		
	2	1	2	2	1	2	1						•	$\bar{y}_6$	S/R <sub>6</sub>		
	2	2	1	1	2	2	1						•	$\bar{y}_7$	S/R <sub>7</sub>		
	2	2	1	2	1	1	2	y <sub>81</sub>	y <sub>82</sub>	•	•	•	y <sub>89</sub>	$\bar{y}_8$	S/R <sub>8</sub>		

**Ilustración 2-6:** Diseño con arreglo interno y externo

Fuente: (Núñez, 2021)

Realizado por: (Gutiérrez y Vara, 2008)

**Tabla 2-4:** Razón señal/ruido para diferentes variables de respuesta

Objetivo	Cociente señal/ruido
Diferencia del valor Objetivo	$\frac{S}{R} = (\bar{y} - T)^2$
Menor es mejor	$\frac{S}{R} = -10 \log_{10} \left( \frac{\sum y_i^2}{n} \right)$
Nominal es mejor	$\frac{S}{R} = 10 \log_{10} \left( \frac{\bar{y}}{S} \right)^2$
Mayor es mejor	$\frac{S}{R} = -10 \log_{10} \left( \frac{\sum \frac{1}{y_i^2}}{n} \right)$
Respuesta positiva o negativa	$\frac{S}{R} = -10 \log_{10}(S^2)$

Fuente: Domínguez; Castaño, 2010)

En conclusión, para el ejemplo planteado de 7 factores, el número de iteraciones son de 128; sin embargo, realizar 128 tratamientos resulta costo para una determinada entidad, es por esta razón que este diseño de Taguchi plantea realizar solamente pocos tratamientos; es decir 8 corridas, garantizando así la eficiencia de resultados en el diseño experimental.

## **2.8. Diseño factorial**

El diseño factorial es un tipo de experimentación donde se manipulan dos o más variables independientes al mismo tiempo para examinar sus efectos individuales y en conjunto dentro de la variable dependiente. En este tipo de diseño, cada variable independiente se llama factor, y cuenta con dos o más niveles. El diseño factorial consigue analizar las consecuencias más relevantes de cada factor y los efectos de interacción entre los factores. Los efectos principales representan las consecuencias individuales que tienen los factores en la variable dependiente, mientras que los efectos de interacción son los efectos conjuntos de dos o más factores en la variable dependiente. El análisis de los efectos de interacción puede revelar relaciones complejas entre las variables independiente y dependiente, que no han sido detectado mediante el análisis de un solo factor.

Dicho de otra manera, el diseño factorial es un método poderoso para examinar los efectos de múltiples variables, en la variable dependiente y puede proporcionar información valiosa sobre la conexión de las variables independientes y dependientes. En estos arreglos factoriales, la matriz del diseño es un conjunto de puntos experimentales o tratamientos, que se forman tomando en cuenta todas combinaciones posibles entre niveles de cada factor. Por ejemplo, si  $k$  tiene dos factores y cada factor presenta 2 niveles, el diseño factorial sería  $2^2 = 4$ , es decir de cuatro iteraciones o puntos experimentales, pero si el un factor tuviera tres niveles y el otro factor dos niveles, se obtiene una combinación de  $3 * 2$ , dando origen al diseño factorial  $3 \times 2$ . El diseño factorial, se clasifican en función de los niveles y sus factores, tal como veremos en los siguientes apartados; pues, para seleccionar un tipo de diseño factorial, se deberá examinar los objetivos y determinar las variables del diseño experimental, para posteriormente seleccionar el tipo de diseño factorial.

### **2.8.1. Factor con dos niveles**

Un diseño factorial con dos niveles es un tipo de diseño experimental en el que se manipulan dos variables independientes que presentan dos niveles. Este tipo de diseño se llama también diseño factorial  $2 \times 2$  porque implica dos factores, cada uno con dos niveles. Por ejemplo, en un estudio sobre el efecto del color y el tamaño de letra en la tasa de trabajos escritos en un sitio web, el color y el tamaño del botón son los factores, y cada uno tiene dos niveles (por ejemplo, rojo vs azul para el color, y grande vs pequeño para el tamaño).

En un diseño factorial 2x2, hay cuatro grupos de tratamiento: uno por cada posible combinación de los niveles de los dos factores. La variable dependiente se mide en cada grupo para evaluar los efectos de los dos factores y su interacción en la variable dependiente. En el análisis de un diseño factorial 2x2 implica el cálculo de los efectos primordiales presentes en los factores y el efecto de interacción entre los dos factores. El efecto principal de cada factor se refiere a la diferencia en la variable dependiente entre los dos niveles del factor, mientras que el efecto de interacción se refiere a cómo los dos factores interactúan entre sí para afectar la variable dependiente. Prácticamente el diseño factorial de dos niveles es un diseño experimental que presenta dos factores con dos niveles cada uno, el cual nos permite evaluar los efectos principales y los efectos de los dos factores.

Este diseño factorial es empleado en la investigación experimental para analizar el grado de afectación y las consecuencias de dos variables independientes, sobre la única variable dependiente.

A continuación, se describen algunas ventajas y desventajas asociadas con este tipo de diseño:

**Ventajas:**

- Permite evaluar los efectos independientes y conjuntos de dos variables independientes en una variable dependiente.
- Ayuda a identificar posibles interacciones entre las variables independientes, lo que puede proporcionar información adicional sobre el proceso subyacente.
- Aumenta la eficiencia del estudio al permitir la evaluación de dos variables independientes en un solo experimento.
- Proporciona un mayor control experimental al permitir la manipulación precisa de dos variables independientes.
- Proporciona una mayor generalización de los resultados al permitir la evaluación de la incidencia que presenta dos variables independientes sobre una dependiente.

**Desventajas:**

- Puede ser más costoso, complejo de diseñar y ejecutar.
- Puede necesitar un mayor número de participantes para proporcionar una muestra adecuada por cada combinación de niveles de los factores.

### 2.8.2. *Un factor con K mayor igual a dos niveles*

El diseño factorial con un factor con K mayor igual a dos niveles se refiere a un tipo de diseño experimental donde se estudia las consecuencias de un factor con dos niveles ( $K=2$ ), junto con otro factor independiente que también puede tener dos o más niveles; entre sus características tenemos:

#### **Características:**

- Permite el estudio de las consecuencias que acarrea un factor que presenta dos niveles.
- También se analiza el resultado de otro factor independiente que puede tener dos o más niveles.
- Es un diseño sencillo y eficiente que permite evaluar los impactos importantes y la relación entre los factores.

#### **Posibles aplicaciones:**

- **Estudios de medicamentos:** Este diseño, comúnmente es empleado para comprender el efecto de un medicamento y la dosis en diferentes grupos de pacientes.
- **Estudios de marketing:** El diseño factorial con un factor con K mayor igual a dos niveles, es aplicable para analizar el efecto de diferentes estrategias de marketing en diferentes segmentos de clientes.
- **Estudios de educación:** Este diseño puede ser utilizado para entender y analizar, la manera en que incide las diferentes técnicas de enseñanza en diferentes grupos de estudiantes.

Es importante destacar que el diseño factorial con un factor con K mayor igual a dos niveles permite evaluar los efectos principales y las interacciones entre los factores, lo que permite un análisis más detallado y completo de los resultados. Sin embargo, este diseño puede tener limitaciones en cuanto a la capacidad de generalizar los resultados a diferentes condiciones o niveles de los factores independientes. Además, si se desea estudiar el efecto de un factor independiente con más de dos niveles, se limitará un diseño factorial más complejo.

Finalmente, antes de pasar al siguiente subtema, es importante recalcar que el método factorial dentro del diseño experimental requiere de todas las corridas del diseño; es decir que se requiere

un número relativamente grande de ensayos, lo que implica mayor costo y mayor consumo de tiempo, mientras que el diseño experimental mediante la técnica de Taguchi, no requiere de todas las corridas; es decir menos número de ensayos, lo que representa menos costoso y menos tiempo; sin embargo, la elección del diseño dependerá de la naturaleza del problema y los objetivos del experimento.

### **2.8.3. Aspecto a considerar para la experimentación de la tasa de corrosión**

La experimentación sobre la tasa de corrosión es un proceso importante para comprender cómo los materiales reaccionan en diferentes ambientes y condiciones, por tal razón, algunos aspectos fundamentales para la experimentación de la tasa de corrosión son los siguientes:

- **Selección del material:** El material utilizado para la experimentación debe ser representativo del material que se utilizará en la aplicación final. Se debe tener en cuenta la composición química, microestructura y propiedades mecánicas del material.
- **Selección del ambiente corrosivo:** El ambiente corrosivo en el que se va a realizar la experimentación debe ser representativo del ambiente en el que se utilizará el material. Se deben considerar factores como la temperatura, la presencia de productos químicos y la presencia de otros materiales.
- **Diseño del experimento:** El diseño del experimento debe incluir la selección de la técnica de medición de la tasa de corrosión, el tamaño de las muestras, el tiempo de experimentación y selección de la frecuencia de medición. También se deben incluir controles y replicaciones para garantizar la precisión de los resultados.
- **Medición de la tasa de corrosión:** El cálculo de la tasa de corrosión se realiza a través de técnicas como la pérdida de peso, la resistencia eléctrica y la polarización electroquímica; por lo cual, es necesario guiarnos mediante normas y procedimientos ya existentes para cada técnica de medición, para así garantizar resultados precisos.
- **Análisis de los resultados:** Los resultados de la experimentación se deben analizar para comprender cómo el material se comporta en el ambiente corrosivo seleccionado. Los resultados se pueden comparar con datos de referencia y con las especificaciones del material para determinar si cumple con los requisitos necesarios.

- **Consideraciones de seguridad:** Es de suma importancia implementar las consideraciones de seguridad al realizar experimentos de corrosión. Se deben aplicar las normas y procedimientos preestablecidos durante la manipulación de productos químicos y para garantizar la seguridad del personal que realiza el experimento.
- **Compartir datos:** Compartir los datos experimentales con otros investigadores para provocar la colaboración y veracidad en la investigación científica. Los datos deben ser compartidos de manera ética y con el consentimiento de los participantes en el experimento, cuando corresponda.
- En general, es importante seguir buenas prácticas de gestión de datos y practicar los valores éticos y legales aplicables, para garantizar la integridad de los datos experimentales.

## 2.9. Manual de usuario guía

El manual de usuario guía es un documento esencial para cualquier producto o servicio que se ofrece a un determinado público. Según Zambrano, un manual de usuario guía debe proporcionar información detallada y clara sobre cómo utilizar el producto o servicio y evitar posibles confusiones o errores en su uso (Zambrano, 2011, pp.17-20). Este tipo de documento suele incluir secciones como introducción, instalación, funcionamiento básico, configuración avanzada, solución de problemas, mantenimiento y precauciones de seguridad. Además, es importante que el manual se mantenga actualizado y se revise periódicamente para certificar que la información suministrada sea precisa y relevante. En este caso, el manual será empleado como una herramienta para garantizar que los usuarios realicen correctamente la experimentación sobre la medición de la tasa de corrosión en función al número de probetas y algunas variables intervinientes en la medición, el cual se obtendrán posteriormente al concluir el capítulo III y IV. Para garantizar la eficiencia en la medición de la tasa de corrosión mediante el manual de usuario guía, se establecerá las variables intervinientes, aspectos estipulados por la normativa ASTM G31 y como ingresar los datos para obtener estadísticamente el nivel de significancia de cada variable sobre la tasa de corrosión.

### 2.9.1. Estructura de un manual de usuario guía

La estructura de un manual guía de usuario puede variar dependiendo del contenido que se esté documentando y de los objetivos, es decir sobre el tipo de manual que se utilice, pero

generalmente presentan una estructura similar. En la actualidad existen varios tipos de manuales guía que se utilizan para diferentes contextos, entre los más comunes tenemos los manuales de usuario para productos electrónicos, para softwares, manual de usuario para productos mecánicos, entre otros; sin embargo, también podemos encontrar una clasificación de manuales en función de los objetivos, entre los cuales tenemos los manuales de procedimientos, procesos, operación, calidad y políticas de una empresa.

Considerando que el manual de procedimiento es un instrumento que describe paso a paso los procesos a cumplir para completar una tarea o actividad específica, y que los manuales de procesos son documentos que describen de manera detallada y sistemática los pasos necesarios para ejecutar una serie de actividades o tareas que forman parte de un proceso; se ha establecido que, para el tema de investigación cuyo objetivo específico es elaborar un manual que permita detallar el número adecuado de experimentos, se presentará un manual de procedimientos.

Considerando el tipo de manual, a continuación, se detallan las secciones principales que se pueden encontrar en un manual de usuario guía típico:

- **Objetivo.** - Describe el propósito o resultado a alcanzar con la implementación de esta herramienta.
- **Introducción.** – En este apartado se busca realizar una breve descripción de lo que trata dicho manual.
- **Alcance.** - Busca establecer los límites que tendrá el proceso, mediante los parámetros de inicio y fin de un determinado procedimiento.
- **Campo de aplicación.** – Especifica en que áreas se emplea el manual.
- **Términos y definiciones.** – Es necesario para entender las palabras relevantes empleadas en el documento, para el entendimiento del manual.
- **Materiales.** – Implementos utilizados durante la practica en función al tema de aplicación.
- **Procedimiento.** - Explicación de la forma de alcanzar el objetivo, es prácticamente el desarrollo práctico del manual.

## CAPÍTULO III

### 3. ESTUDIO DE VARIABLES INTERVINIENTES EN LA TASA CORROSIÓN MEDIANTE TAGUCHI

#### 3.1. Selección del software estadístico

**Tabla 3-1:** Análisis de factores para la selección del software estadístico apropiado.

Software	Costo		Usabilidad		Limitantes		Aspectos sobre el método de Taguchi	
<b>R</b>	Gratis	X	Complejidad en la Sintaxis de programación.		Los gráficos para el diseño experimental, dependerá de la disponibilidad de las librerías.		Para el método de Taguchi se requiere trabajar con más de dos librerías.	X
<b>Python</b>	Gratis	X	Complejidad en la Sintaxis de programación, manejo de errores y excepciones.		No hay una librería específica para la metodología y análisis de datos sobre Taguchi.		Requiere emplear librerías <b>pyDOE</b> , para matrices de diseño, y <b>statsmodels</b> , <b>scipy</b> , y <b>scikit-learn</b> para el análisis estadístico.	X
<b>Minitab</b>	35.99 USD por 6 meses.		Aprendizaje de la interfaz.	X	No está diseñado para la programación extensiva.	X	Minitab realiza automáticamente el análisis estadístico de Taguchi	X
<b>Matlab</b>	55.00 USD.		Utilización de Toolboxes y lenguaje de programación.		Requieren de toolboxes adicionales costosos.		No cuenta con un Toolbox específico de Taguchi.	X
<b>SPSS</b>	45.95 USD.		Aprendizaje de la interfaz.	X	No cuenta con herramientas gráficas específicas para el diseño experimental.		SPSS no tiene una funcionalidad específica para el diseño de experimentos de Taguchi.	

Fuente: (R, 2023; Python, 2023; Matlab, 2023; Minitab, 2023)

Realizado por: Merino, 2023

Considerando que la metodología trabaja directamente con el diseño de experimentos mediante el método de Taguchi, los factores son seleccionados a criterio de costos y aspectos relacionados directamente con la metodología, Tabla 3-1, donde se analizan 5 posibles softwares estadísticos a

utilizar, de manera que se ha marcado con una X los factores más beneficiosos y los que menos desventaja generan para el desarrollo del presente trabajo de integración en función a la metodología de Taguchi; donde el software seleccionado fue el Minitab; a pesar de que el software “R” y “Python” son de acceso libre a comparación del Minitab, R y Python, no cuentan con una librería que trate específicamente del método de Taguchi, de manera que, para realizar el diseño de Taguchi, se requiere más de dos librerías para aplicar dicha metodología, considerando también, que el manejo de R y Python representa una mayor complejidad en el lenguaje de programación.

Para el caso del software Matlab, al igual que R y Python, este software, no cuenta con Toolboxes relacionados directamente al método de Taguchi, sin embargo, la mayor limitante para la selección de este software, es que se requiere de otros Toolboxes para la aplicación de Taguchi, y por ende representan más costos en la adquisición de dichos Toolboxes, finalmente el software SPSS no cuenta con funciones relacionadas directamente al diseño de experimentos y el costo de la licencia es más alto que el software Minitab.

En conclusión, el software Matlab y SPSS, requieren de un mayor costo de adquisición, a comparación de Minitab, mientras que R y Python a pesar de ser un software libre, no cuentan con librerías que estén relacionadas con el diseño de experimento de Taguchi, por lo que, para la aplicación de dicha metodología, se requiere la utilización de más de dos librerías y por ende representa un procedimiento más extenso, considerando que la mayor complejidad en el manejo de estos softwares es el lenguaje de programación, por tal razón se ha seleccionado Minitab, puesto que dicho software presenta funciones y herramientas relacionadas directamente con el diseño de experimentos, y realiza el análisis de datos directamente para arrojar la combinación de datos más adecuada en función a las variables ingresadas.

### **3.2. Enfoque de investigación**

Tomando en consideración el modelo de metodología de la investigación respecto a Arias y Covinos (2021, p.11), quienes indican que los estudios cuantitativos son aquellos en los que se emplea datos numéricos para ayudar a comprender un fenómeno o situación, el presente trabajo de integración curricular estipuló un enfoque cuantitativo, debido al marco de aplicación de la experimentación sobre la medición de la tasa de corrosión en las probetas metálicas de acero estructural, donde al someter dichas probetas a la reducción de electrones “reacciones de tipo *redox*”, dichas muestras se convierten en el elemento de estudio, para determinar las variables

requeridas por la metodología de Taguchi, las cuales serán obtenidas mediante la tabulación de ensayos de corrosión.

Las apreciaciones de carácter numérico y lógico sobre el resultado esperado de las reacciones químicas, específicamente la asociada con el proceso de deterioro del acero “Corrosión”; teniendo en cuenta algunas variables involucradas en los ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio, son algunas de las bases que están asociados a estos factores, para determinar el nivel de afectación de las velocidades de corrosión en las probetas, mediante la comparación generada con la aplicación de estadística inferencial, para posteriormente deducir cuál de los factores involucrados en los ensayos corrosivos posee mayor incidencia sobre dicho proceso.

### **3.3. Nivel de investigación**

La investigación comprenderá un nivel relacional y correlacional, esto considerando lo expuesto por Díaz y Abramovay (2006, p.35), quien indica que los estudios correlacionales analizan la relación entre variables, por lo tanto este trabajo se ajusta al tipo correlacional al tomar en cuenta no solo a las condiciones específicas respecto a una variedad de probetas, sino que también se tiene presente las condiciones respecto a la relación que estas tienen con cada uno de los factores de control intervinientes en la tasa de corrosión. En adición, la calidad relacional, permitirá establecer la mayor incidencia de las variables intervinientes sobre la variable respuesta “velocidad de corrosión”.

### **3.4. Diseño de la experimentación**

#### ***3.4.1. Según la manipulación o no de la variable independiente***

Según las estipulaciones respecto a la manipulación de la variable independiente, Arias y Covinos (2019, p.49), menciona que un estudio cuasi experimental, el investigador busca poner a prueba una condición causal o una hipótesis; por lo tanto, el estudio se adapta a un modelo cuasi experimental, al constituir un formato de análisis específico entre las variables involucradas, tomadas de diversas fuentes científicas, de estudios previos y desde la perspectiva de las variables interventoras en los ensayos de corrosión, sobre la variable medida “tasa de corrosión”.

El diseño cuasi-experimental, respecto al procesamiento y análisis de datos, se llevó a cabo mediante la aplicación de la técnica estadística de Taguchi; donde la misma metodología trabaja con tres tipos de variables “ Variable respuesta, variables dependiente y variable independiente”;

para estas dos últimas variables, Taguchi las denomina Factores y Niveles, respectivamente, por consiguiente, esta metodología permite establecer los factores que mayor inciden en la velocidad de corrosión de dichos ensayos, sin la necesidad de emplear todas las corridas o combinaciones de los niveles de cada factor, para alcanzar el objetivo planteado; en este sentido, los dos posibles métodos a emplear han sido, el método factorial y el mencionado método de Taguchi, de los cuales, este último es aplicado en la presente investigación, puesto que, la comparación objetiva de estos derivó del emparejamiento generado en la calidad de los resultados, los cuales se diferencian a continuación: La opción factorial se concentra en la estimación calculada, tanto de los efectos principales, como los efectos que genera cada nivel, mientras que, diseñar productos y establecer procesos para obtener un alto desempeño, de manera que estos sean tolerables a las circunstancias ambientales, e implementar esto en la fase de diseño, mediante la utilización de experimentos, se ha convertido en el eje fundamental de la técnica de Taguchi; es necesario destacar que este método se enfoca en la influencia relativa de factores que intervienen en el desarrollo eficiente de productos y procesos, por tal razón, el método seleccionado en el presente estudio, correspondió al método de Taguchi.

#### **3.4.2. *Según las intervenciones en el trabajo de campo***

De acuerdo al enunciado de las intervenciones en el trabajo de campo realizado por Fernández et al., (2019, p.443), se tiene que los estudios transversales se basan en datos recopilados en un momento específico; en este orden de ideas, la investigación correspondió a uno de tipo transversal, al asimilar la calidad observacional sobre el fenómeno de estudio, adquiriendo datos para un momento determinado, siendo esta, datos de ensayos de corrosión para seleccionar los factores que mayor inciden en la velocidad de corrosión, implicando además, que se consideró un análisis rápido, sin considerar prolongados lapsos de estudio; en un periodo de tiempo determinado.

Finalmente, tomando en cuenta el análisis de variables que intervienen en los ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio, tanto para determinar la incidencia respecto a la tasa de corrosión como para relacionarlos con un determinado Factor “variable dependiente”, se emplea una observación sistemática de dichas variables.

#### **3.4.3. *Tipo de estudio***

Respecto del tipo de estudio, el criterio proporcionado por Díaz y Abramovay (2002, p.27), donde estipula al análisis descriptivo como una etapa fundamental de la estadística para resumir y presentar de forma clara las características de un conjunto de datos, se pudo corresponder el

análisis de acuerdo a uno de tipo descriptivo; considerando que, la información desarrollada con el fin de describir los factores que mayor inciden en la velocidad de corrosión en un ensayo, para establecer la mejor configuración de factores respecto a la variable respuesta, fueron planteadas de manera técnica-sistemática, a través del método estadístico de Taguchi.

#### 3.4.4. Creación de la matriz ortogonal de Taguchi

Considerando el objetivo general del trabajo de integración, donde hace énfasis al análisis de variables que intervienen en la tasa de corrosión por el método de Taguchi, dicho método se basa en la creación de matrices numéricas, las cuales, asocian variables que están directamente relacionadas sobre mi variable respuesta “Tasa de corrosión”, mediante dos tipos de variables, “variables dependientes y variables independientes”; donde que, para el diseño de Taguchi estas variables toman el nombre de Factores y niveles, respectivamente, y considerando también que, para el análisis de las variables que intervienen directamente sobre los ensayos de corrosión mediante la metodología de Taguchi, se pueden tener más de 2 factores y niveles, tal como lo propone Taguchi, donde el número de factores y niveles utilizados, dependerá del tipo de experimentación y la inversión de tiempo y dinero contemplada en el diseño experimental, se ha considerado emplear un arreglo ortogonal de tres factores y tres niveles, Tabla 3-2; dado que, la experimentación trata de ensayos de corrosión en probetas de acero estructural, y añadir otra factor interviniente representaría mayor tiempo y dinero, sin embargo, con el arreglo ortogonal de tres factores y tres niveles, se estaría cumpliendo con los objetivos contemplados.

**Tabla 3-2:** Tabla de niveles y factores para un arreglo ortogonal  $AO_9(3^3)$

FACTOR	NIVEL		
	1	2	3
Variable Dependiente			
Factor 1	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Factor 2	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Factor 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3

Realizado por: Merino, 2023

Es importante recalcar que los factores y niveles tiene relación directa sobre mi variable respuesta, por ende, si se manipula un factor “variable dependiente” mediante la variable Nivel “variable independiente”, mi respuesta difiere en función a la manipulación de dicha variable.

Una vez establecido el número de niveles y factores, se procede a crear la matriz ortogonal de Taguchi en función a las combinaciones posibles entre dichas variables, donde al tener 3 factores

y tres niveles, se establece un arreglo ortogonal de  $AO_{27}(3^3)$ , es decir 27 combinaciones posibles, denominadas también como: “corridos experimentales o tratamientos” dentro del diseño experimental mediante la técnica de Taguchi.

$$AO_p(3^3) = 27 \text{ corridas experimentales}$$

En función a los factores, niveles y al número de corridas experimentales, se crea la matriz ortogonal de Taguchi “ $AO_{27}(3^3)$ ”, Tabla 3-3, misma que contempla las 27 combinaciones posibles entre los niveles de cada factor.

**Tabla 3-3:** Combinaciones para un arreglo ortogonal  $AO_{27}(3^3)$

COMBINACIONES “Tratamientos	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
1	3	1	2
2	3	3	2
3	3	2	2
4	3	3	3
5	1	2	3
6	2	3	2
7	3	2	1
8	2	2	2
9	3	1	1
10	1	3	2
11	3	1	3
12	2	1	1
13	2	2	3
14	3	3	1
15	3	2	3
16	1	1	2
17	2	3	1
18	1	1	1
19	1	1	3
20	2	1	3
21	1	3	1
22	2	2	1
23	2	3	3
24	1	2	1
25	1	2	2
26	2	1	2
27	1	3	3

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

Sin embargo, al trabajar con tres niveles y tres factores, Taguchi propone realizar el diseño ortogonal con “27” o “9” corridas experimentales o tratamientos, donde al considerar una experimentación de 27 probetas por cada tipo de muestra, representa una mayor inversión de tiempo y dinero, por ende, se ha optado trabajar con un arreglo ortogonal de 9 corridas experimentales  $AO_9(3^3)$ , Tabla 3-4, dando como resultado un total de 9 experimentos a realizar por cada tipo de acero estructural.

**Tabla 3-4:** Combinaciones para un arreglo ortogonal  $AO_9(3^3)$

<b>COMBINACIONES “Tratamientos”</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>
<b>1</b>	1	1	1
<b>2</b>	1	1	2
<b>3</b>	1	2	2
<b>4</b>	1	3	3
<b>5</b>	2	1	2
<b>6</b>	2	2	3
<b>7</b>	2	3	1
<b>8</b>	3	1	3
<b>9</b>	3	1	1

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

### **3.4.5. Selección de las variables que intervienen en los ensayos de corrosión**

De acuerdo al planteamiento de la estructura del diseño experimental de Taguchi, mismo que fue de tres factores, para establecer las variables que intervienen en la medición de la tasa de corrosión, considerando la observación sistemática del apartado 3.4.2, se considera al número de probetas como una de las variables que intervienen en dicho proceso, puesto que, al seleccionar el número de probetas como una variable dependiente y, al relacionar dicha variable con otras variables intervinientes en los ensayos de corrosión, se está determinando la mejor configuración experimental tal como lo propone Taguchi, sin embargo, la realización de un experimento debe garantizar la eficacia de un correcto diseño estadístico, mediante la selección de variables que tengan relación con mi variable respuesta “tasa de corrosión”, por lo tanto, entre las variables que intervienen en los ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio donde el ambiente corrosivo es controlable, y por ende se descartan las variables ambientales, podemos encontrar variables que van desde el tratamiento de las muestras antes de la experimentación, hasta el

tiempo que se exponen las muestras al ambiente corrosivo, mismas que pueden ser: el tipo de tratamiento superficie aplicado a las muestras, el tipo de limpieza a las probetas e incluso el tiempo de exposición al ambiente corrosivo con las que se realiza la experimentación, sin embargo mediante la búsqueda de redacción científica sobre ensayos de corrosión por inmersión se constató que en el trabajo de grado de Guzmán y Padilla (2017, p. 92) donde realizaron un análisis de la resistencia a la corrosión en los recubrimientos 140MXC-560AS mediante pruebas de inmersión, concluyen que la mayor pérdida de masa de las probetas ensayadas, se generan en las primeras 24 horas de inmersión, mientras que, en las siguientes horas de exposición al ambiente corrosivo la pérdida de masa se reduce, sin embargo, este tiempo de mayor pérdida de masa varía según el tipo de probeta, por lo tanto, para el presente trabajo de investigación, se toma como una de las posibles variables que intervienen en los ensayos de corrosión, considerando que para esta investigación se pretende realizar el análisis a un total de 4 aceros diferentes.

En cuanto a la limpieza aplicada a la superficie de las muestras, en una tesis de maestría de Molina (2020, p.244) donde realizó un análisis de los recubrimientos anticorrosivos aplicado a un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) y su incidencia en la tasa de corrosión, establece que los métodos de limpieza, generan variaciones significativas sobre la tasa de corrosión, pues, considerando que el valor de corrosión del acero A1011 GR 50, aplicando un método de limpieza por chorro abrasivo fue de 0,0194069 mm/año, mientras que la tasa de corrosión para la misma probeta con una limpieza mecánica manual, fue de 0,0542784 mm/año, se considera al tratamiento superficial como una variable que intervienen en los ensayos de corrosión, finalmente, Molina (2020,p.243) también establece que el tratamiento superficial a base de solventes con pigmentos inhibidores de corrosión tipo cromato de Zinc “ anticorrosivo Stop Mate Cromato de Zinc” aplicada a la probeta de acero A1011 GR 50 arroja un valor elevado de corrosión a comparación del método “Hempadur Mastic 45881” que es un recubrimiento epóxido de dos componentes; por ende se ha optado tomar al tratamiento superficial como otra de las variables intervinientes en los ensayos de corrosión. En conclusión, en función a la experiencia y a datos obtenidos de trabajos previamente realizados y a la observación sistemática, se ha optado por tomar como factores principales el tiempo de exposición, el tipo de limpieza superficial de la probeta, el número de probetas a ensayar y el tipo de tratamiento superficial.

### **3.5. Tipos de acero estructural como objeto de estudio**

La selección de un determinado acero estructural para una aplicación específica, se puede realizar en función a la composición química, la resistencia, el tipo de protección superficial, costos e inclusive al entorno de exposición, entre otras, sin embargo, considerando la propuesta inicial

previo a la realización del trabajo de integración, de realizar el estudio a cuatro tipos de probetas diferentes, justamente por el tipo de diseño experimental que se está desarrollando, donde las variables intervinientes seleccionadas en el apartado 3.4.5, están relacionadas directamente con los ensayos de corrosión y mas no con el tipo de probeta a ensayar, por lo tanto se ha optado por diferir el análisis de las posibles variables intervinientes “tipo de limpieza, número de probetas y tiempo de exposición” a cuatro tipo de probetas catalogadas como objetos de estudio, donde la selección de dichos aceros para fines prácticos, están en función al tipo de acero estructural mayormente empleado en la actualidad.

Los aceros estructurales mayormente empleados en la actualidad, a nivel de infraestructura son el acero al carbono A36, el acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA), el acero inoxidable, el acero estructural de alta resistencia (HSS) y el acero galvanizado, entre otros; justamente por las propiedades que estos poseen, tales como la alta resistencia, ductilidad, tenacidad, etc., sin embargo, otro de los acero más utilizados es el acero negro, de manera que, en su forma original no cuenta con ningún tipo de tratamiento superficial, haciéndolo uno de los aceros más propensos a la corrosión, no obstante, a dicho acero se le puede aplicar algún tipo de recubrimiento superficial, tales como un recubrimiento por pintura o un recubrimiento con aceites lubricantes, entre otros, para proporcionarle resistencia a la corrosión; también es importante recalcar que al acero galvanizado que ya cuenta con un recubrimiento superficial base, igualmente se le puede proteger mediante técnicas de protección catódica que aumentan la resistencia a la corrosión; dicho esto, y considerando el objetivo general de esta investigación que se basa en el análisis de variables que intervienen en los ensayos de corrosión mediante el método de Taguchi, se ha optado por analizar al acero negro, acero galvanizado y acero A36, siendo estos de los aceros más empleados, sin embargo es importante recalcar que, el diseño ortogonal planteado emplea variables que se relacionan directamente con los ensayos de corrosión, por lo tanto la matriz ortogonal planteada puede ser aplicable a otros tipos de acero, según el criterio investigativo o en función a los objetivos de un futuro proyecto.

En conclusión, se ha optado por trabajar con el acero negro y el acero galvanizado, de los cuales se clasifican según el tipo de tratamiento superficial en “acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica”, no obstante, considerando el acero A36 como uno de los más utilizados actualmente, y que dicho acero no cuenta con una protección inherente a la corrosión, se le puede aplicar algún tipo de tratamiento superficial como la protección catódica por ando de sacrificio, por lo tanto también será objeto de estudio para determinar las variables que intervienen en los ensayos de corrosión.

### 3.6. Aplicación de la matriz de Taguchi en función a las variables intervinientes

Una vez creado el diseño ortogonal de Taguchi de tres factores y tres niveles, y establecido las variables que intervienen directamente sobre los ensayos de corrosión, se procede a completar la tabla de niveles y factores para los cuatro tipos de probetas a ensayar “probetas de acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y probetas de acero galvanizado con protección catódica”, Tabla 3-2, para posteriormente desarrollar las matrices ortogonales de Taguchi en función a la matriz base, Tabla 3-4.

#### 3.6.1. Selección de factores y niveles

Considerando las variables que intervienen en los ensayos de corrosión “apartado 3.4.5”, y teniendo presente que la experimentación está en función a la Norma ASTM G31, que trata de ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio, y por ende se trabaja en ambientes corrosivo controlables, se ha optado por trabajar con tres variables dependientes “ factores”, que a juicio investigativo y a trabajos de titulación previamente realizados, resultan ser los posibles factores que intervienen en dichos ensayos de corrosión, tales como “ número de muestras, tipo de limpieza aplicada a la probeta y el tiempo de exposición”, considerando también que el diseño ortogonal planteado fue desarrollado para un análisis con tres factores.

**Tabla 3-5:** Factores y niveles utilizados en la experimentación para la probeta PA

<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL</b>		
<b>Variable</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de probetas de acero negro sin protección	2	4	6
Tipo de limpieza	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas

Realizado por: Merino, 2023

En cuanto a la determinación de las variables independientes “ niveles ”de cada factor, en función a los efectos que estos tengan sobre la variable respuesta “ tasa de corrosión “dentro del estudio, se debe considerar que estos niveles son variables independientes que tienen relación con dichos factores “variable dependiente” para modificar la variable respuesta, y considerando que los factores seleccionados son el número de probetas, tipo de limpieza superficial y tiempo de exposición, se ha establecido 3 niveles para cada factor; es decir, tres tipos de limpieza superficial, tres tiempos de exposición y tres grupos de probetas que surgen de la observación sistemática, de los tipos de limpieza existentes y de trabajos de titulación cuyos objetivos se basan en los ensayos

de corrosión, Tabla 3-5, no obstante, para la selección de los niveles en cuanto al factor número de probetas, se han seleccionado bajo el criterio de: “si en un determinado ensayo empleo más número de muestras, simplemente se aumenta el grado de precisión y confiabilidad de los resultados, y bajo la perspectiva de costos y la consideración de que la variable “número de probetas” fue seleccionada con el propósito de encontrar la mejor configuración experimental en función al tiempo de exposición y tipo de limpieza, se ha seleccionado los tres niveles “ 2, 4 y 6 muestras ” para el factor número de probetas.

En conclusión, se tendría un diseño que presenta tres factores “Número de probetas, Tipo de limpieza y Tiempo de exposición” con tres niveles para cada factor “2, 4, 6; Mecánico, Bristle blaster, Sand blasting y 240 horas, 360 horas, 480 horas” respectivamente.

### 3.6.2. Arreglo ortogonal para los respectivos tipos de aceros

Es importante considerar que, para la presente investigación, se trabajará con 4 grupos de probetas diferentes, las cuales son: probetas de acero negro sin protección, probetas de acero negro con recubrimiento superficial, probetas de acero galvanizado y probetas de acero galvanizado con protección catódica, por tanto, serán nombrados a lo largo del trabajo como PA, PB, PC y PD, respectivamente.

**Tabla 3-6:** Combinaciones para un arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) del acero negro sin protección

COMBINACIONES “Tratamientos”	PA “A”	Tipo de limpieza “B”	Tiempo de exposición “C”
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	2
4	1	3	3
5	2	1	2
6	2	2	3
7	2	3	1
8	3	1	3
9	3	1	1

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

Al tomar como factor o variable dependiente el “número de muestras” para cada tipo de acero, donde el nivel de dicho factor es de “2,4 y 6 muestras” y haciendo énfasis en las matrices ortogonales que propone Taguchi para un diseño de tres factores con tres niveles, estos pueden ser de 27 y 9 corridas experimentales por cada matriz; no obstante se optó por trabajar con un

arreglo de 9 corridas experimentales Tabla 3-6, donde se estaría trabajando con un total de 32 probetas por cada tipo de acero, de manera que, si se hubiera seleccionado un arreglo ortogonal de 27 combinaciones, el número de probetas aumentaría y por ende representaría un mayor costo de inversión.

La Tabla 3-6 obtenida mediante el software estadístico Minitab, proporciona las combinaciones posibles entre los tres niveles de cada factor, con un total de nueve iteraciones o combinaciones, el cual representarían un total de 9 experimentos para el acero negro sin protección, donde, “A” es el número de probetas de acero negro sin protección, “B” es el tipo de limpieza aplicado a la probeta antes del ensayo, y “C” es el tiempo de exposición de la probeta en el ambiente corrosivo.

**Tabla 3-7:** Configuración del arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) con el número de probetas

Tratamientos	“PA”	“B”	“C”
1	2	Mecánico	240 horas
2	2	Mecánico	360 horas
3	2	Bristle blaster	360 horas
4	2	Sand blasting	480 horas
5	4	Mecánico	360 horas
6	4	Bristle blaster	480 horas
7	4	Sand blasting	240 horas
8	6	Mecánico	480 horas
9	6	Mecánico	240 horas

Realizado por: Merino, 2023

Una vez establecido los respectivos niveles para los 3 factores, Tabla 3-5, y teniendo presente las combinaciones para el arreglo ortogonal de Taguchi AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), Tabla 3-6, se genera la configuración del arreglo ortogonal propuesto para el experimento, Tabla 3-7; dicho arreglo es obtenido al crear el diseño en Minitab con los respectivos factores y niveles; dicho procedimiento se presentará en el apartado “Procedimiento para ingresar datos en el software Minitab”, estas combinaciones de niveles, representan una variación sobre mi variables respuesta, es decir dentro de un mismo diseño experimental para el acero negro sin protección, en el tratamiento o iteración 1, se realizara el experimento con un total de dos probetas de acero negro sin protección, con una limpieza mecánica y un tiempo de exposición de 240 horas, mientras que para el tratamiento 2 se realizará el experimento con un total de 2 probetas, una limpieza mecánica y un tiempo de exposición de 360, hasta completar las 9 experimentos o tratamientos .

En cuanto al estudio de las variables que intervienen en la corrosión mediante el método de Taguchi para las probetas faltantes; Acero negro con recubrimiento superficial, Acero galvanizado y Acero galvanizado con protección catódica, se realizará empleando los mismos factores y niveles, y por ende la misma configuración ortogonal de Taguchi  $AO_9(3^3)$  utilizados para el análisis de la probeta de acero negro sin protección, Tabla 3-8, este criterio surge bajo la consideración de que las cuatro probetas deben ser sometidas a ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio, y por tal motivo las variables empleadas en cada estudio no difieren de cada ensayo, no obstante la única diferencia es el tipo de acero estructural a experimentar.

**Tabla 3-8:** Factores y niveles utilizados en la experimentación para la probeta PB

<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL</b>		
<b>Variable</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de probetas de acero negro con recubrimiento superficial	2	4	6
Tipo de limpieza	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas

Realizado por: Merino, 2023

**Tabla 3-9:** Arreglo ortogonal  $AO_9(3^3)$  con los datos experimentales para la probeta “PB”

<b>Tratamiento</b>	<b>“PB”</b>	<b>“B”</b>	<b>“C”</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mm/año)</b>
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

Realizado por: Merino, 2023

Por lo tanto, el arreglo ortogonal de la probeta PB “acero negro con recubrimiento superficial” se establece en función a variables como limpieza, tiempo de exposición y número de probetas, Tabla 3-9, donde “PB” representa el factor “número de probetas de acero con recubrimiento superficial”, “B” representa el factor “tipo de limpieza” y “C” representa el factor “tiempo de

exposición”. El resto de matrices de los arreglos ortogonales de Taguchi para las probetas faltantes, se podrá observar en la parte de anexos del presente documento; sin embargo, vale la pena acotar que las matrices para establecer las variables intervinientes en los ensayos de corrosión, serán expuestas en un manual de usuario, donde también se establecerá algunas pautas para realizar el ensayo de corrosión por inmersión en el laboratorio con la norma ASTM G31.

Considerando la búsqueda de recursos bibliográficos para el análisis de las variables intervinientes mediante Taguchi, estos arrojaron por resultados la ausencia de elementos probatorios que relacionen de forma directa la variable o factor “número de muestras”, con las variables como limpieza superficial y tiempo de exposición para cada tipo de acero a estudiar, considerando como foco de atención a la tasa de corrosión, por tal razón se ha optado por diferir la variable “número de probetas” por una variable única en cuanto al tipo de acero A36, denominada tipo de acabado superficial, no obstante, los arreglos ortogonales  $AO_9(3^3)$  para cada tipo de acero “acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica” mismas que permiten el análisis de las variables “número de probetas, tipo de limpieza y tiempo de exposición” que más intervienen en los ensayos de corrosión, quedarán planteadas para futuros trabajos de investigación e inclusive para ensayos de corrosión, ver Anexo K.

#### *3.6.2.1. Arreglo ortogonal para el acero estructural A36*

Para continuar con el análisis de las variables intervinientes en los ensayos de corrosión, en función al arreglo ortogonal  $AO_9(3^3)$  que propone Taguchi para un diseño de tres factores y tres niveles, y considerando que la experimentación se realiza bajo parámetros corrosivos controlables, se optó por implementar los mismos factores y niveles de los arreglos ortogonales anteriores, con la diferencia que el factor o variable dependiente “número de probetas” se cambió por una variable denominada tratamiento superficial “establecida en el apartado 3.4.5”, Tabla 3-10. En conclusión, se busca crear un arreglo ortogonal que presente los factores: tipo de tratamiento superficial, tiempo de exposición y tipo de limpieza aplicada a la superficie de ensayo, donde los niveles son las posibilidades que presenta cada factor, por consiguiente, en base a los tratamientos superficiales y tipos de limpieza existentes y a la búsqueda científica de las variables que intervienen en la corrosión del acero A36 del apartado 3.4.5 y 3.5, se determinaron los siguientes niveles: sin preparación, protección catódica por ánodo de sacrificio y protección anticorrosiva con pinturas epóxicas, para el primer factor “tratamiento superficial”; 240 horas, 360 horas y 480 horas, para el segundo factor “tiempo de exposición”; y Mecánico, Bristle blaster, Sand blasting para el tercer factor “tipo de limpieza superficial”.

**Tabla 3-10:** Factores y niveles utilizados en la experimentación

FACTOR	NIVEL		
	1	2	3
Tratamiento superficial	Sin preparación	Protección catódica por ánodo de sacrificio	Protección con pinturas epoxicas
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas
Tipo de limpieza superficial	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting

Realizado por: Merino, 2023

**Tabla 3-11:** Configuración del arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) para el caso del estudio

CORRIDAS “NÚMERO DE EXPERIMENTOS”	TIPO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL	TIPO DE LIMPIEZA	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
1	Sin preparación	Mecánico	240 horas
2	Sin preparación	Bristle blaster	360 horas
3	Sin preparación	Sand blasting	480 horas
4	Protección catódica por ánodo de sacrificio	Mecánico	360 horas
5	Protección catódica por ánodo de sacrificio	Bristle blaster	480 horas
6	Protección catódica por ánodo de sacrificio	Sand blasting	240 horas
7	Protección anticorrosiva con pinturas epoxicas	Mecánico	480 horas
8	Protección anticorrosiva con pinturas epoxicas	Bristle blaster	240 horas
9	Protección anticorrosiva con pinturas epoxicas	Sand blasting	360 horas

Realizado por: Merino, 2023

El diseño ortogonal planteado, consta de tres factores y niveles “ Tipo de tratamiento superficial, Tipo de limpieza y Tiempo de exposición” y “ Sin protección, Protección catódica por ánodo de sacrificio, Protección anticorrosiva con pinturas epoxicas; Mecánico, Bristle blaster, Sand blasting y 240 horas, 360 horas, 480 horas” respectivamente; Tabla 3-11, dichos niveles son los que se manipulan en el experimento, con el propósito de obtener diferentes efectos sobre la variable respuesta por parte de los factores, para posteriormente realizar la experimentación de la

velocidad de corrosión y analizar estadísticamente cuál de las variables dependientes o factores arroja un mayor efecto en la medida de corrosión e inclusive para determinar la configuración de niveles o variables independientes más óptima para reducir la tasa de corrosión.

La matriz con el arreglo ortogonal planteada en función a las posibles combinaciones de niveles empleadas en cada experimento, es obtenida directamente de Minitab al ingresar los factores “Tipo de tratamiento superficial, Tipo de Limpieza y Tiempo de Exposición” con sus niveles “Sin protección, Protección catódica por ánodo de sacrificio; Mecánico, Bristle blaster, Sand Blasting y 240 horas, 360 horas, 480 horas”, Tabla 3-11.

Finalmente, la probeta resultante para la demostración del método de Taguchi, reunió las características de acero estructural reflejadas en la norma ASTM A36 , en el ensayo de corrosión por sumergido, en función a la norma ASTM G31, siendo este, el elemento único y óptimo para el desarrollo del estudio, al asumir que las variables del tipo de tratamiento superficial y la limpieza aplicada a la superficie de ensayo, son factores predeterminados para el usuario, mientras que el tiempo de exposición es una variable manipulable e intangible, la cual, para fines de prácticos, solo debe ser idealizada.

### **3.7. Obtención de datos experimentales para las matrices ortogonales de Taguchi**

Teniendo presente que en este proyecto de investigación se analizan tres variables intervinientes en los ensayos de corrosión, denominadas “número de muestras, tipo de limpieza superficial y tiempo de exposición” para cada los cuatro tipos de aceros estructurales “acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica”, en el que, por falta de datos experimentales mediante la búsqueda de redacción científica, que relacionen la tasa de corrosión con las variables antes mencionadas; en el apartado “ 3.7.1. Obtención de datos para las matrices ortogonales planteadas”, se explicará la manera de obtener los datos y analizar dichos datos mediante el software estadístico Minitab, no obstante, dicho procedimiento para obtener los datos experimentales mediante los ensayos de corrosión por inmersión en el laboratorio en función a la norma ASTM G31, se puede ver en el manual de usuario para determinar las variables intervinientes en los ensayos de corrosión, ver Anexo K, por consiguiente, para la obtención de datos experimentales del acero estructural al carbono A36 mediante las variables que intervienen en la corrosión “tratamiento superficial, limpieza superficial y tiempo de exposición”, se detallaran en el apartado “3.10.2. Obtención de datos experimentales para matriz ortogonal del acero A36”.

### 3.7.1. Obtención de datos para las matrices ortogonales planteadas

Una vez creada las matrices ortogonales para la experimentación en función a las combinaciones posibles entre los niveles de cada factor, se procede con las 9 corridas experimentales de cada iteración, es decir, para el arreglo ortogonal de la probeta de acero negro sin protección, Tabla 3-7, donde se cuenta con 9 iteraciones; o técnicamente hablando “9 corridas experimentales”; teniendo presente que cada iteración presenta diferentes combinaciones de: “Número de probetas, Limpieza superficial y Tiempo de exposición”, se realizan los 9 experimentos, donde el primer experimento o primera iteración se ejecuta con 2 muestras, con una limpieza mecánica y con un tiempo de exposición de 240 horas; mientras que, en el experimento o iteración 6, se realizará el experimento con 6 muestras de acero, mismas que deberán tener una limpieza con Bristle Blaster y un tiempo de exposición de 480 horas”, Ilustración 3-1.

	Tratamiento	“PA”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
Iteración 1	1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
	2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
	3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
	4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
Iteración 6	5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
	6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
	7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
	8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
	9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

**Ilustración 3-1:** Configuración ortogonal del acero negro sin protección

Realizado por: Merino, 2023

Una vez realizada la experimentación y obtenido los 9 datos de tasa de corrosión, en la matriz ortogonal de Taguchi  $AO_9(3^3)$  se implementa una columna adicional, donde se insertará los datos experimentales obtenidos, Tabla 3-12, para posteriormente realizar algún tipo de prueba estadística para el análisis de dichos datos y así observar la varianza de las medias; para Taguchi el test estadístico empleado comúnmente es análisis de varianza “ANOVA”. Se debe tener presente que lo expuesto en este apartado, aplica para las demás probetas con sus respectivas configuraciones ortogonales planteadas.

**Tabla 3-12:** Arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) con los datos experimentales para la probeta “PA”

Tratamiento	“PA”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

Realizado por: Merino, 2023

Para obtener los resultados a través del software Minitab, una vez realizada la experimentación, se procede a ingresar la matriz ortogonal de Taguchi con los respectivos datos y a configurar las gráficas de respuesta; dicho procedimiento se presentará en el apartado “Procedimiento para ingresar los datos en el software estadístico Minitab”.

### 3.7.2. *Obtención de datos experimentales para matriz ortogonal del acero A36*

Considerando la tabulación de resultados Anexo L, extraídos de la revisión de la literatura científica, por parte de los autores: ( Caiza y Gamboa, 2022: pp.46-48) y ( Yépez, 2017: pp.50-102), donde realizaron el análisis de algunos métodos de recubrimientos anticorrosivos para el acero estructural A36 tales como “ el recubrimiento a base de solventes, a base epoxicos y con protección por ánodo de sacrificio, entre otros”, inclusive se analizaron probetas sin ningún tratamiento superficial, mediante ensayos de corrosión; todo esto en función de algunos métodos de limpieza como “ limpieza mecánica, manual y Sand Blasting”.

En función a los distintos tipos de limpieza, tiempos de exposición y distintas protecciones superficiales, se tabulan los valores de tasa de corrosión según las combinaciones presentadas en la matriz ortogonal del acero A36, Tabla 3-11, en una nueva columna denominada “ tasa de corrosión”, Tabla 3-13; el arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), con los datos experimentales tabulados en

la columna “tasa de corrosión”, muestra la combinación introducida en el programa Minitab, para su evaluación estadística por el Método de Taguchi, en base a los datos recopilados, donde SP, PC Y PA representan los tres tipos de tratamientos superficiales “sin preparación, protección catódica por ánodo de sacrificio y protección superficial con pinturas epóxicas” respectivamente, mientras que, M, BB y SB son los tipos limpieza superficial “mecánico, Bristle blaster y Sand Blasting”, y la columna C3 son los tiempos de exposición de la probeta al ambiente corrosivo. Esta tabla surge del registro de los datos experimentales en la matriz ortogonal de Taguchi, Ilustración 3-7.

**Tabla 3-13:** Combinaciones del arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) con los datos experimentales

Tratamiento	C1-T	C2-T	C3	Tasa de Corrosión(mm/año)
1	SP	M	240	0,0214
2	SP	BB	360	0,0491
3	SP	SB	480	0,0408
4	PC	M	360	0,0202
5	PC	BB	480	0,0276
6	PC	SB	240	0,0119
7	PA	M	480	0,0581
8	PA	BB	240	0,0648
9	PA	SB	360	0,0893

Realizado por: Merino, 2023

A partir de los datos experimentales recopilados, se buscó determinar la influencia de los diferentes factores y sus niveles en la velocidad de corrosión; esto permitió identificar las combinaciones óptimas de tratamiento superficial, método de limpieza y tiempo de exposición que minimicen la velocidad de corrosión y que por ende, mejoren la resistencia a la corrosión de los materiales evaluados; es decir, las comparaciones generadas mediante el análisis de varianza donde se obtiene un porcentaje de influencia “P”, permitirá conocer los factores críticos de control que inciden sobre la variable respuesta, el cual es asumible por el método de Taguchi, en relación a otros métodos experimentales como el factorial.

### 3.8. Análisis de varianza y modelos estimados mediante el software Minitab

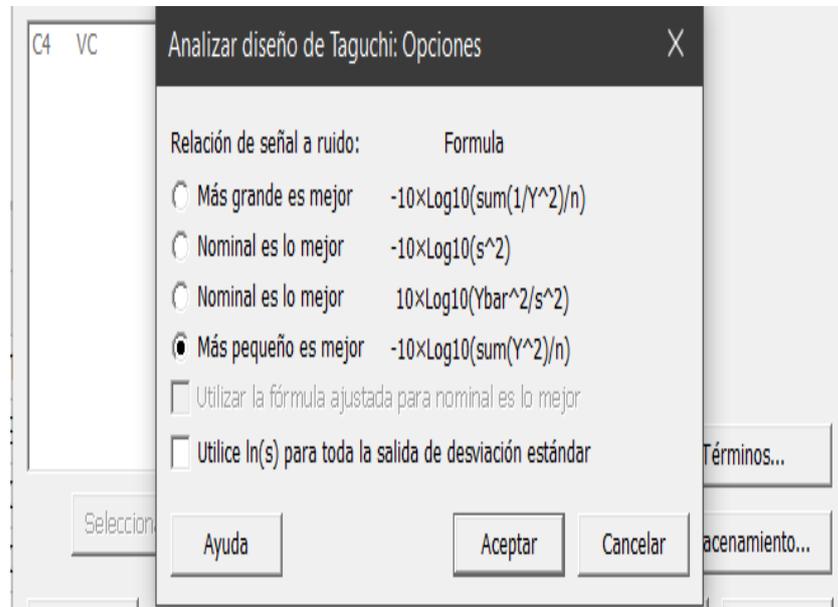
Una vez planteada las matrices del arreglo ortogonal de Taguchi y desarrollado los experimentos propuestos, se emplea un test estadístico para analizar e interpretar los datos; comúnmente, para Taguchi se emplea el análisis de varianza y el análisis de coeficientes de modelos estimados, ya que permiten establecer dentro del diseño experimental, cuál de las variables estudiadas

“tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición” afectan mi variable respuesta “tasa de corrosión”, mediante el cálculo de la variabilidad de cada factor y el porcentaje de influencia “P”. Este análisis puede ser desarrollado mediante diferentes softwares estadísticos, sin embargo, se utilizará el Software Minitab considerando la selección del software estadístico en el apartado 3.1, el que fue adquirido con una licencia de 6 meses, dicho software trabaja directamente con el análisis de varianza y coeficiente de modelos estimados, mismos que al ingresar la configuración del arreglo ortogonal planteado con los respectivos datos obtenidos mediante los ensayos de corrosión y configurado el tipo de análisis y graficas a emplear “apartado 3.8.1”, Minitab arroja directamente las tablas y graficas del análisis de varianza y coeficientes de modelos estimados.

Como se ha planteado anteriormente, el diseño experimental mediante Taguchi cuenta con tres niveles; Tabla 3-5, dichos niveles son los que se establecieron como modelo en calidad de diseño prospectivo para manipular en el experimento, con el propósito de obtener diferentes efectos sobre la variable respuesta por parte de los factores; es decir, para el experimento 5 “Tratamiento 5”; se propondría realizar el ensayo con 4 probetas que presentan un tipo de limpieza por mecanizado y con un tiempo de exposición de 360 horas, mientras que en el experimento 8, se propone realizar la experimentación con 6 probetas que presentan una limpieza mecánica y un tiempo de exposición de 480 horas; Tabla 3-7, para que finalmente, la tasa de corrosión medida esté en función a las variables “tratamiento superficial, tiempo de exposición y tipo de limpieza”; y así, realizar el análisis estadístico, que permita determinar cuál configuración presenta una respuesta óptima respecto a la media.

En el diseño experimental mediante el método de Taguchi, es primordial definir la relación señal ruido, para optimizar de una mejor manera los ensayos de corrosión, es decir, considerando que se pretende determinar las variables que más afectan mi tasa de corrosión, dicho análisis se realiza bajo el criterio de “mientras menor sea mi tasa de corrosión, mejor serán los resultados”, caso contrario si mayor es, peor serán mis resultados, por tal razón para proceder con el análisis de varianza y el coeficiente de modelos estimados, se selecciona en el software Minitab la relación señal ruido “más pequeño es mejor”; Ilustración 3-2, dicho esto y considerando una configuración referencial respecto a mis valores óptimos, se establece un nivel de confianza del 95%, donde una vez obtenidas las tablas del análisis de varianza y modelos estimados, se establece que todas las respuestas cuyo porcentaje de influencia “P” sean menores a 0,05, son críticas respecto a la variable respuesta; Tabla 3-14, de manera que, las probetas experimentadas reunirán las configuraciones necesarias y específicas sobre el tratamiento superficial, tiempo de exposición y

tipo de limpieza, para establecer de forma definida las variables que intervienen directamente sobre la tasa de corrosión.



**Ilustración 3-2:** Definición de la relación de señal a ruido en Minitab

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

**Tabla 3-14:** Análisis de las varianzas SN y medias

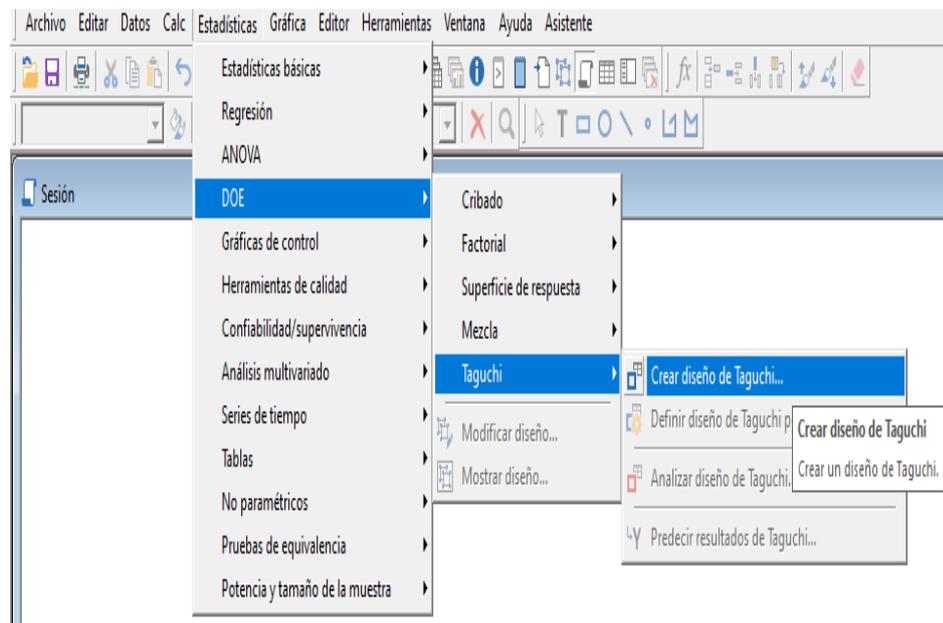
Análisis de las varianzas SN y medias	
Análisis de la varianza en relaciones SN	TS > 0,05
	TL > 0,05
	TE > 0,05
Análisis de la varianza de medidas	TS > 0,05
	TL > 0,05
	TE > 0,05

Realizado por: Merino, 2023

### 3.8.1. Procedimiento para ingresar los datos en el software estadístico Minitab

Mediante el siguiente apartado se explica los pasos a seguir para el análisis de variables involucradas en los ensayos de corrosión con el método de Taguchi, el cual parte desde cómo crear el diseño ortogonal, hasta la selección del tipo de graficas a emplear en el análisis de los resultados, mediante el software Minitab.

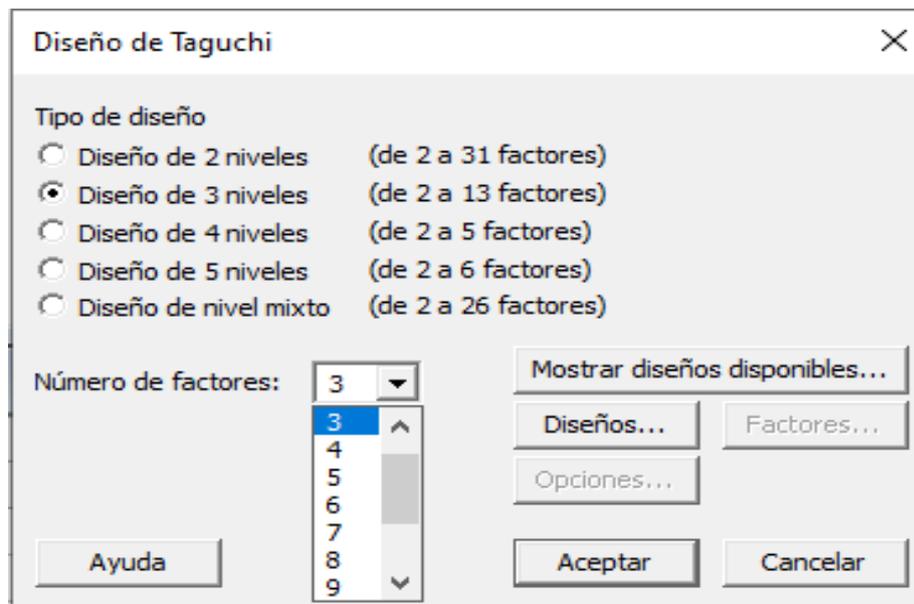
- Creamos el diseño ortogonal de Taguchi AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), para lo cual nos dirigimos a las opciones “Estadísticas-DOE Taguchi-Crear diseño de Taguchi”:



**Ilustración 3-3:** Pasos para crear el diseño ortogonal de Taguchi en Minitab

Fuente: Minitab

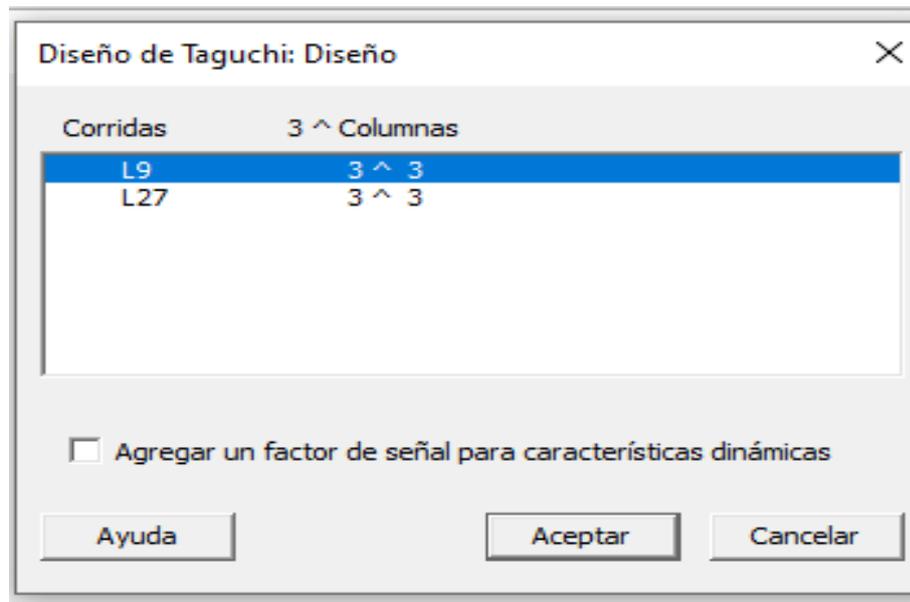
- En la ventana de diseño de Taguchi, se selecciona el diseño de 3 niveles y un número de factores de 2 a 13 factores, posteriormente escogemos 3 factores:



**Ilustración 3-4:** Selección del diseño de 3 factores y 3 niveles

Fuente: Minitab

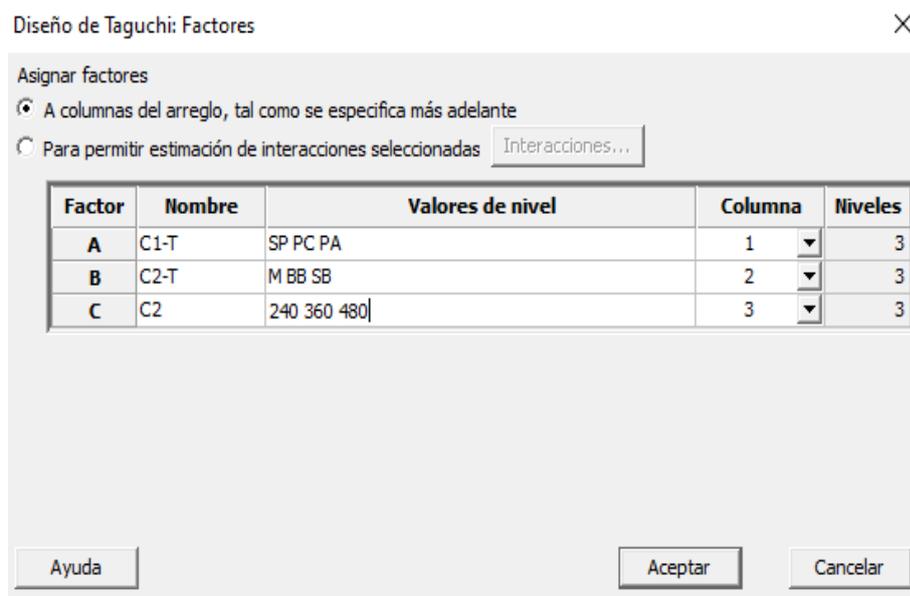
- Posteriormente seleccionamos la opción diseño y en la siguiente ventana, escogemos un arreglo de 9 corridas “L9”:



**Ilustración 3-5:** Selección del número de corridas para el diseño ortogonal

Fuente: Minitab

- Nuevamente, en la ventana de diseño de Taguchi, Ilustración 3-5, seleccionamos la opción de factores y procedemos a llenar los factores y los niveles de la matriz que se está trabajando, para nuestro caso ingresamos los datos de la Tabla 3-9:



**Ilustración 3-6:** Ingreso de factores y sus niveles correspondientes

Fuente: Minitab

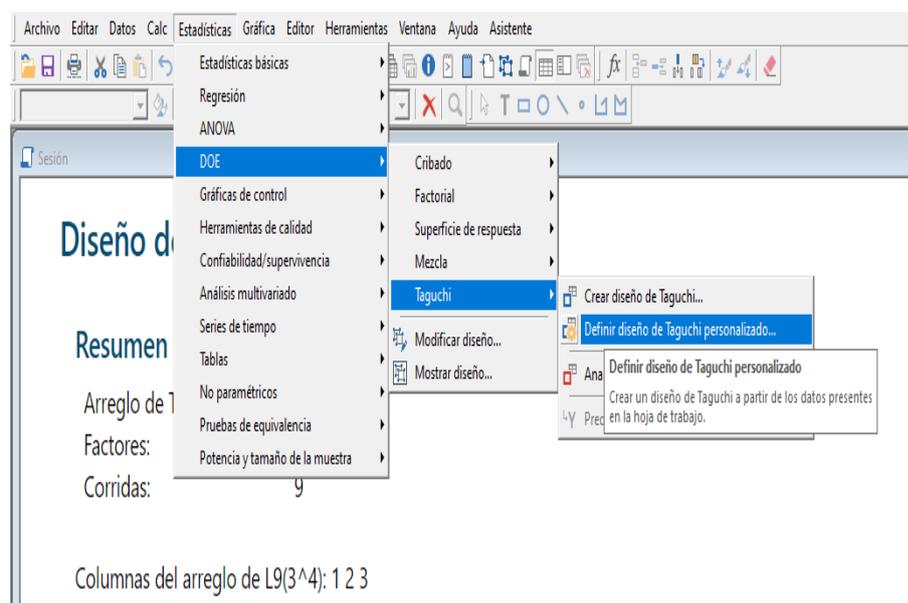
- Una vez creado el diseño, se procede a ingresar los datos de los experimentos en la columna C4:

+	C1-T	C2-T	C3	C4
	TS	TL	TE	VC
2	SP	M	240	*
3	SP	BB	360	*
4	SP	SB	480	*
5	PC	M	360	*
6	PC	BB	480	*
7	PC	SB	240	*
8	PA	M	480	*
9	PA	BB	240	*
10	PA	SB	360	*

**Ilustración 3-7:** Matriz ortogonal para ingresar datos de los experimentos

Fuente: Minitab

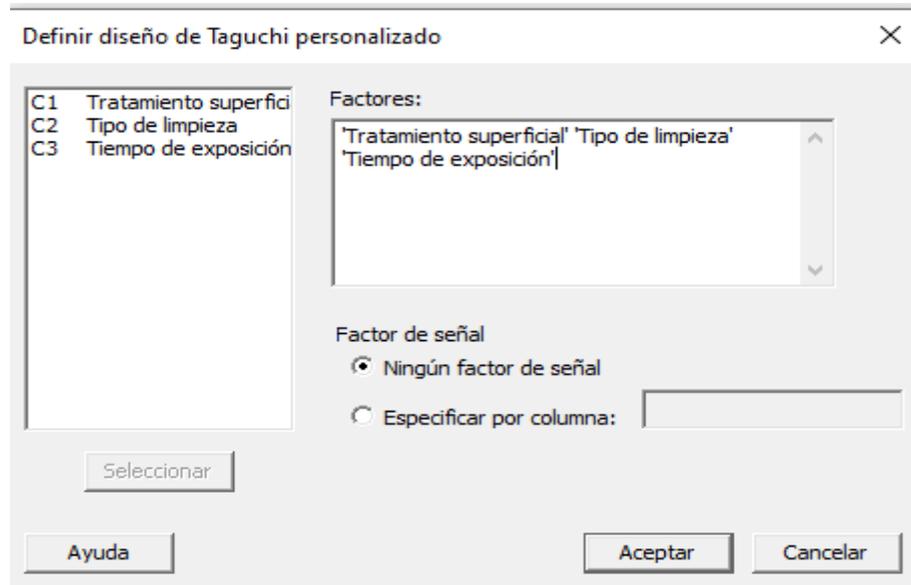
- Posteriormente se procede a seleccionar las características del ensayo de corrosión; para lo cual, vamos a las opciones “**Estadísticas DOE, Taguchi, Definir diseño de Taguchi personalizado**”:



**Ilustración 3-8:** Pasos de selección de características de la matriz ortogonal

Fuente: Minitab

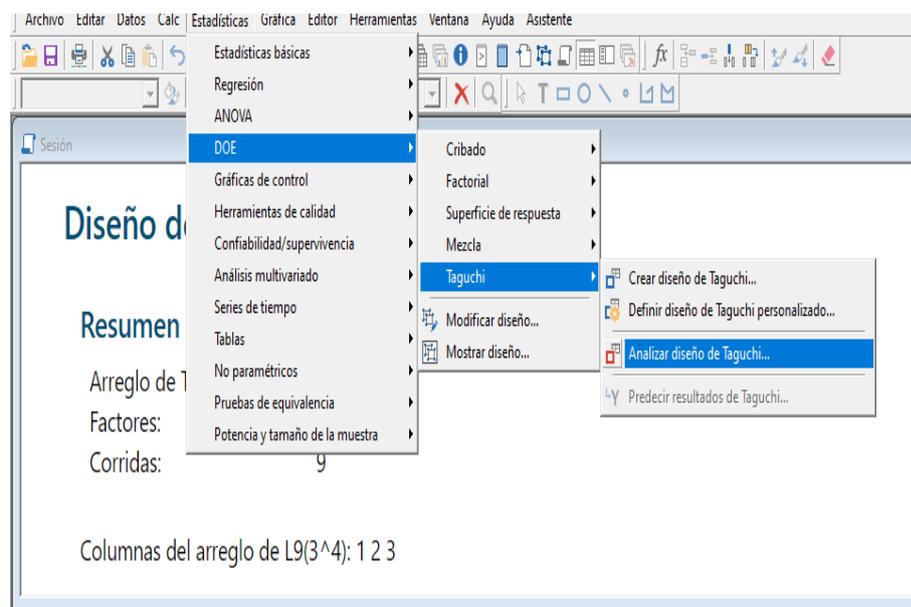
- En la siguiente ventana se selecciona los factores que intervienen en el ensayo de corrosión; para nuestro caso seleccionamos los 3 factores “Tratamiento superficial, Tipo de limpieza y Tiempo de exposición” y damos en aceptar:



**Ilustración 3-9:** Selección de factores del proceso de corrosión

Fuente: Minitab

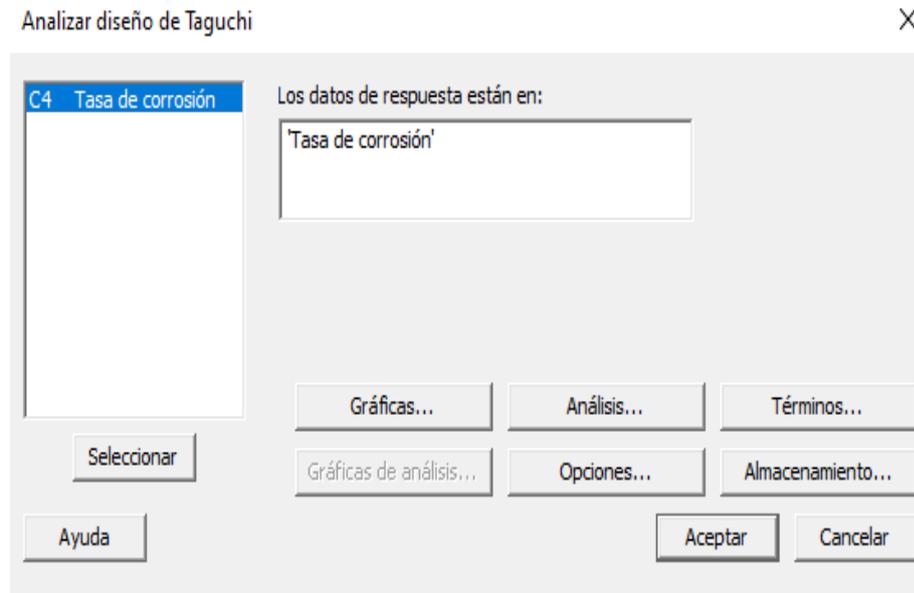
- Finalmente configuramos el tipo de análisis del experimento, mediante las opciones “Estadísticas-DOE-Taguchi-Analizar diseño de Taguchi”:



**Ilustración 3-10:** Pasos para seleccionar el tipo de análisis experimental

Fuente: Minitab

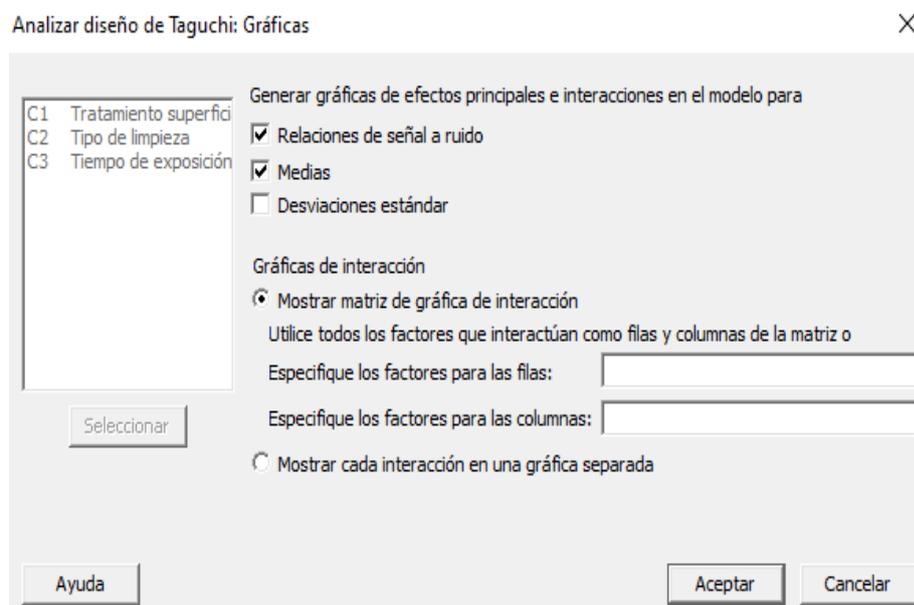
- En la siguiente ventana, se selecciona la variable de respuesta “Tasa de corrosión” misma que fue configurada previamente al ingresar los datos de la experimentación en la matriz de Taguchi:



**Ilustración 3-11:** Selección de la variable respuesta

Fuente: Minitab

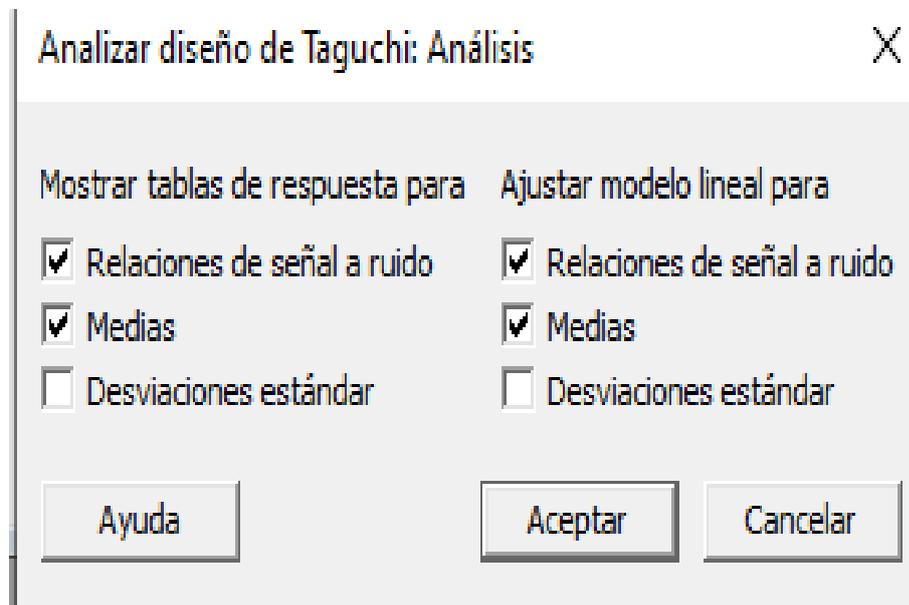
- En la pestaña anterior, Ilustración 3-11, seleccionamos la opción de gráficas, y configuramos el tipo de grafica que deseamos “Relaciones de señal ruido y Medias”:



**Ilustración 3-12:** Selección del tipo de grafica

Fuente: Minitab

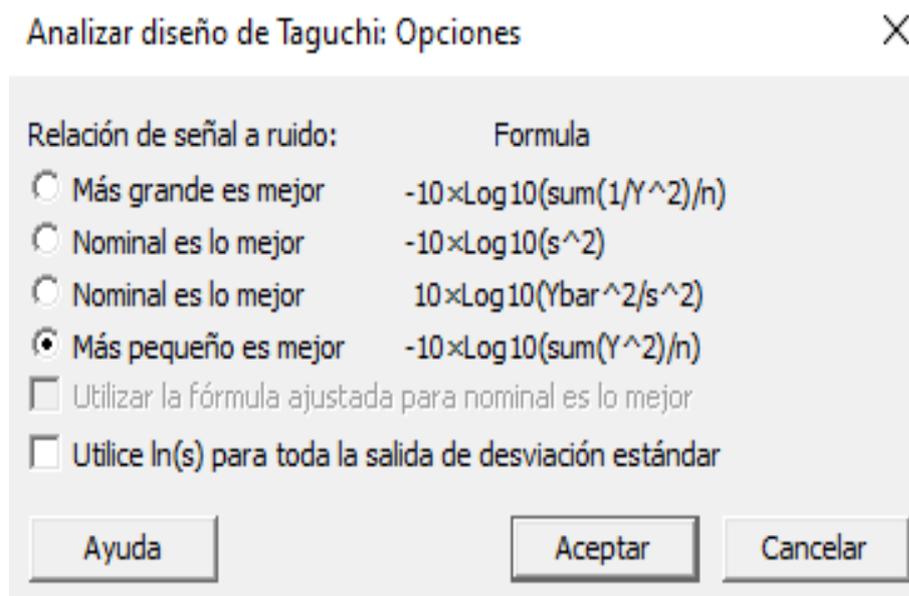
- Nuevamente en la pestaña “Analizar diseño de Taguchi” Ilustración 3-11 seleccionamos la opción “Análisis” y escogemos las siguientes opciones:



**Ilustración 3-13:** Selección de las tablas de respuesta

Fuente: Minitab

- Finalmente, en la pestaña “Analizar diseño de Taguchi” Ilustración 3-11 seleccionamos el recuadro de “opciones” y en la siguiente ventana, marcamos la opción “más pequeños es mejor”:



**Ilustración 3-14:** Selección del tipo de señal ruido

Fuente: Minitab

- Colocamos aceptar a todo y directamente el programa Minitab arrojará las gráficas de señal ruido y medias, para el respectivo análisis de las combinaciones más óptimas para los ensayos de corrosión.

### **3.9. Manual de usuario para obtener el número adecuado de experimentos.**

El manual de usuario guía, estableció el marco de detalle específico sobre el diseño experimental en calidad de un procedimiento para el cálculo estadístico mediante el software Minitab, de forma que este pueda ser aplicado de forma compartida a los usuarios interesados de forma explicativa y considerando aspectos técnicos compatibles con la normativa ASTM G31, sobre el entorno de laboratorio, como se describió a continuación:

- Aseguramiento de las condiciones mínimas de laboratorio para desarrollo de los experimentos.
- Configuración y selección del tipo de probetas a analizar según las diferentes variables de interés en función a la definición del estudio.
- Determinación de los elementos y métodos para la funcionalidad y aplicabilidad del estudio, según las técnicas de análisis del fenómeno para factores químicos, físicos y mecánicos, como: el tipo de tratamiento superficial, tipo de acero, tiempo de exposición, entre otros.
- Preparación de los elementos muestrales a ser analizados de forma apropiada y técnica para el estudio.
- Aplicación del estudio según la definición de los criterios del experimento sujeto al objeto principal de un determinado estudio.
- Captación de parámetros de resultados y presentación de estos mediante tabulaciones y gráficas.
- Interpretación y conclusiones sobre los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Probabilidad estadística y número de probetas en la tasa de corrosión

En el contexto de los ensayos de corrosión, es importante comprender los conceptos de probabilidad teórica y probabilidad experimental, ya que ambos tienen implicaciones en la interpretación de los resultados. La probabilidad teórica trata sobre la estimación de que suceda un evento o resultado específico basada en consideraciones teóricas o modelos matemáticos. En el caso de la corrosión, existen diferentes teorías y modelos que describen los mecanismos y las tasas de corrosión en función de las condiciones ambientales, propiedades de los materiales y otros factores relevantes. Estos modelos teóricos pueden proporcionar estimaciones de la probabilidad de corrosión en ciertas condiciones específicas. Sin embargo, la probabilidad teórica puede no reflejar completamente la variabilidad y las condiciones reales del experimento. Es aquí donde entra en juego la probabilidad experimental. La probabilidad experimental se fundamenta en la recopilación y análisis de datos obtenidos directamente de los experimentos realizados. En el caso de los ensayos de corrosión, la probabilidad experimental implica la observación y medición de la tasa de corrosión en un conjunto de probetas bajo condiciones controladas.

La probabilidad experimental tiene en cuenta la variabilidad inherente en los resultados del experimento, que puede deberse a diferencias en la calidad de las probetas, las condiciones de exposición, los errores de medición, entre otros factores. Al recopilar datos de múltiples probetas y realizar análisis estadísticos, se puede obtener una estimación más precisa de la probabilidad de corrosión en una determinada configuración experimental. Es importante destacar que la probabilidad experimental puede ayudar a validar o refutar los modelos teóricos existentes y proporcionar una comprensión más precisa de la variabilidad y las condiciones prácticas de la corrosión. Al combinar la probabilidad teórica y la probabilidad experimental, se puede obtener una visión más completa y confiable de la tasa de corrosión y los factores que la afectan en un entorno específico. En los ensayos de corrosión, al igual que en cualquier experimento en el que se utilizan diferentes probetas, es común pensar que el aumento en el número de probetas utilizadas aumenta la precisión de los datos estadísticos obtenidos, esto se debe a que, tener un tamaño de muestra mayor proporciona una mejor representatividad de la población y reduce la influencia de las variaciones aleatorias. Sin embargo, en el caso específico de la tasa de corrosión, no se puede afirmar que el valor de esta se vea directamente afectado por el número de probetas utilizadas en la experimentación. El ensayo de corrosión generalmente implica exponer las

probetas a un entorno corrosivo durante un período de tiempo determinado y medir la tasa de corrosión, que se expresa en unidades de longitud por unidad de tiempo (por ejemplo, mm/año). La medición de la tasa de corrosión puede realizarse mediante técnicas como la pérdida de peso, la medición de espesor o la resistencia eléctrica.

Existen varios factores que pueden afectar en mayor medida el ensayo de corrosión y la medición de la tasa de corrosión, estos factores incluyen la homogeneidad de la superficie de las probetas, la calidad del revestimiento o tratamiento superficial aplicado, la uniformidad de la exposición al entorno corrosivo, la temperatura y la humedad ambiental, entre otros. Estos aspectos relacionados con la preparación de las probetas y las condiciones experimentales tienen un impacto significativo en la precisión de los resultados y deben ser cuidadosamente controlados. Es importante tener en cuenta que, aunque un mayor número de probetas puede mejorar la precisión de los datos estadísticos en general, en el caso de la tasa de corrosión, la calidad y la homogeneidad de las probetas y las condiciones experimentales tienen un impacto más significativo en la confiabilidad de los resultados. Por lo tanto, es crucial enfocarse en aspectos como la preparación de las probetas, la selección de condiciones de ensayo consistentes y la minimización de fuentes de variabilidad no deseadas para obtener resultados confiables y representativos en los ensayos de corrosión.

#### **4.2. Recolección y procesamiento de datos experimentales**

Los diferentes datos de la velocidad de corrosión se establecieron para el acero ASTM A36 en el ensayo de corrosión por sumergido según la norma ASTM G31, de diversos estudios científicos que contaban con mediciones de las variables de estudio, por ello, el presente estudio se centra en la evaluación de la tasa de corrosión en diferentes configuraciones experimentales utilizando el método Taguchi, donde se empleó un arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), que permite analizar tres factores con tres niveles cada uno. Los factores estudiados fueron el tipo de tratamiento superficial, el tipo de limpieza y el tiempo de exposición, mientras que la variable de respuesta medida fue la velocidad de corrosión expresada en milímetros por año, Ilustración 4-1 donde se evaluaron nueve combinaciones diferentes de los factores en función de las características de preparación superficial, el método de limpieza empleado y la duración de la exposición a condiciones corrosivas. Cada configuración experimental se analizó mediante mediciones de la velocidad de corrosión, donde la combinación introducida en el programa Minitab, para su evaluación estadística por el Método de Taguchi; trabaja con los 9 experimentos en función a las combinaciones planteadas, Ilustración 4-1, por ejemplo, en la iteración 6 se realizó el experimento con una probeta que presenta un tratamiento superficial de protección catódica por ánodo de

sacrificio, con una limpieza Sand Blasting y un tiempo de exposición de 240 horas, donde la velocidad de corrosión obtenida bajo estas variables antes mencionadas, fue de 0,0119 mm/años

↓	C1-T	C2-T	C3	C4
Dirección de entrada		TL	TE	VC
1	SP	M	240	0,0214
2	SP	BB	360	0,0491
3	SP	SB	480	0,0408
4	PC	M	360	0,0202
5	PC	BB	480	0,0276
6	PC	SB	240	0,0119
7	PA	M	480	0,0581
8	PA	BB	240	0,0648
9	PA	SB	360	0,0893

**Ilustración 4-1:** Combinaciones del arreglo ortogonal AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>)

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

Una vez generada la matriz con los resultados de los experimentos, mediante el programa se procede a seleccionar los factores principales, las interacciones y el efecto mayor a mencionar, al seleccionar “análisis de Taguchi” en el programa, para definir la relación de señal a ruido; en este caso se eligió más pequeño es mejor, ya que se busca minimizar la velocidad de corrosión; para posteriormente ejecutar el análisis de coeficientes estimados para establecer las variables que intervienen significativamente dentro de los factores establecidos y por ende en la variable respuesta “tasa de corrosión”, en función al porcentaje de influencia “P”, Tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Coeficientes de Modelos Estimados para relaciones señal-ruido

Término	Coef.	EE del coef.	T	P
<b>Constante</b>	28,9321	0,4314	67,065	0,000
<b>TS-SP</b>	0,1869	0,6191	0,306	0,788
<b>TS-PC</b>	5,5892	0,6101	9,161	0,012
<b>TL-M</b>	1,7350	0,6101	2,844	0,105
<b>TL-BB</b>	-1,8892	0,6101	-3,097	0,090
<b>TE-240</b>	2,9510	0,6101	4,837	0,040
<b>TE-360</b>	-1,9140	0,6101	-3,137	0,088

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

La Tabla 4-1; generada por el programa Minitab, presenta los factores y niveles que intervienen en los ensayos de corrosión en función al porcentaje de influencia “P”, donde TS-SP, TS-PC, TL-M, TL-BB, TE-240 y TE-360 representan un tratamiento superficial sin preparación, tratamiento superficial con protección catódica por ánodo de sacrificio, tipo de limpieza mecánica, tipo de limpieza por Bristle blaster, y un tiempo de exposición de 240 y 360 horas, respectivamente, mismos que proporciona información clave sobre las relaciones identificadas entre las variables en estudio, cada coeficiente representa el efecto que una variable tiene sobre otra en ausencia de ruido o variabilidad aleatoria. Estos modelos estimados nos permiten comprender mejor cómo se relacionan las variables y del cómo generan un pilar fundamental para una correcta selección de decisiones y optimización de procesos. Como la experimentación se realizó con un nivel de confianza del 95%, todas las respuestas P “Porcentaje de influencia”, cuyo valor sean menor a 0,05 resultan ser críticas sobre la variable respuesta, en este caso, todos los experimentos que contenían como tratamiento superficial una protección catódica por ánodo de sacrificio “TS-PC” y como tiempo de exposición 240 horas “TE-240”, provocan una variación significativa sobre la variable respuesta, es decir sobre la velocidad de corrosión, ya que el nivel de ajuste es muy alto, lo que nos da un buen indicio sobre la fiabilidad de los resultados. Es necesario recordar que los coeficientes, describen el tamaño y dirección de la relación entre el factor y la variable respuesta, Tabla 4-1, sin embargo, para el análisis de Taguchi estos coeficientes resultan irrelevantes; los procedimientos para cumplir con el cometido se observan en el capítulo anterior “Procedimiento para ingresar datos en el software Minitab”

**Tabla 4-2:** Análisis de Varianza de Relaciones señal ruido

<b>Fuente</b>	<b>GL SC SEC.</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>TS</b>	2193,912	193,912	96,956	57,88	0,017
<b>TL</b>	219,809	19,809	9,904	5,91	0,145
<b>TE</b>	240,342	40,342	20,171	12,04	0,077
<b>Error residual</b>	23,350	3,350	1,675		
<b>Total</b>	8257,413				

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

En el Análisis de varianza para relaciones señal-ruido; Tabla 4-2, “obtenida del análisis con Minitab, Anexo E” se observan los factores analizados, “tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición”, “TS, TL y TE” respectivamente, con su respectivo porcentaje de influencia “P” sobre mi variable respuesta, mismos que están en función a la suma de cuadrados “SC”, a la media cuadrática “MC” y al grado de libertad de los factores antes mencionados “GL SC”, donde se establece que el tipo de limpieza aplicada a la superficie de ensayo, no es

significativo ya que su P valor es mayor a 0,05; acá en el tratamiento superficial si resulta ser significativo ya que es menor a 0,05 por lo que este factor resulta ser un factor crítico de control ya que presenta incidencias sobre la variable respuesta, y el tiempo de exposición presenta un valor no significativo aunque con mayor incidencia que el tipo de limpieza. La suma de cuadrados “SC” y la suma total de cuadrados “MC” de cada factor, son datos que nos permiten calcular el valor P “Porcentaje de influencia”, también es importante recalcar que el estadístico F o variabilidad, representan la variabilidad entre los grupos, de manera que, mediante el análisis de varianza, se observa que el factor “TS” es el factor que mayor variabilidad presenta, respecto a los factores “TL y TE”, por ende se considera al tratamiento superficial como una variable que interfiere en la tasa de corrosión , mismos que son fundamentales para la prueba de hipótesis, Tabla 4-2.

De igual manera, en el análisis de varianza para medias, Tabla 4-3, podemos comprar las medias de los tres factores analizados “TS, TL y TE”, para posteriormente determinar si existe diferencias significativas entre sí, es decir, podemos encontrar los factores y su grado de afectación sobre la variable respuesta, donde se puede denotar que, los factores como tipo de limpieza aplicada a la superficie de la muestra “TL” y el tiempo de exposición “TE”, no son significativos, puesto que el valor P “porcentaje de influencia” de 6,21 y 9,65 respectivamente, es mayor a 0.05, mientras que el tratamiento superficial “TS” con un valor P de 0,016, al ser menor que 0.05, si resulta ser una variable crítica, considerando también que dicha variable presenta una variabilidad de 63,36, ver Anexo F. El factor de tratamiento superficial, tiene una variabilidad total de 0,004011 “suma de cuadrados, SC” y una media cuadrática “MC” de 0,002006 que representa la variabilidad promedio entre las medias de los grupos, mismas que nos permiten determinar el estadístico F, para determinar las diferencias significativas entre las medias de los grupos. El error residual del análisis de varianza de medias, es de 20,000063, por lo tanto, dentro del análisis de varianza representa la variabilidad no explicada por los factores analizados, y este error se debe a variables no controladas o aleatorios tales como errores de medición.

**Tabla 4-3:** Análisis de Varianza de Medias

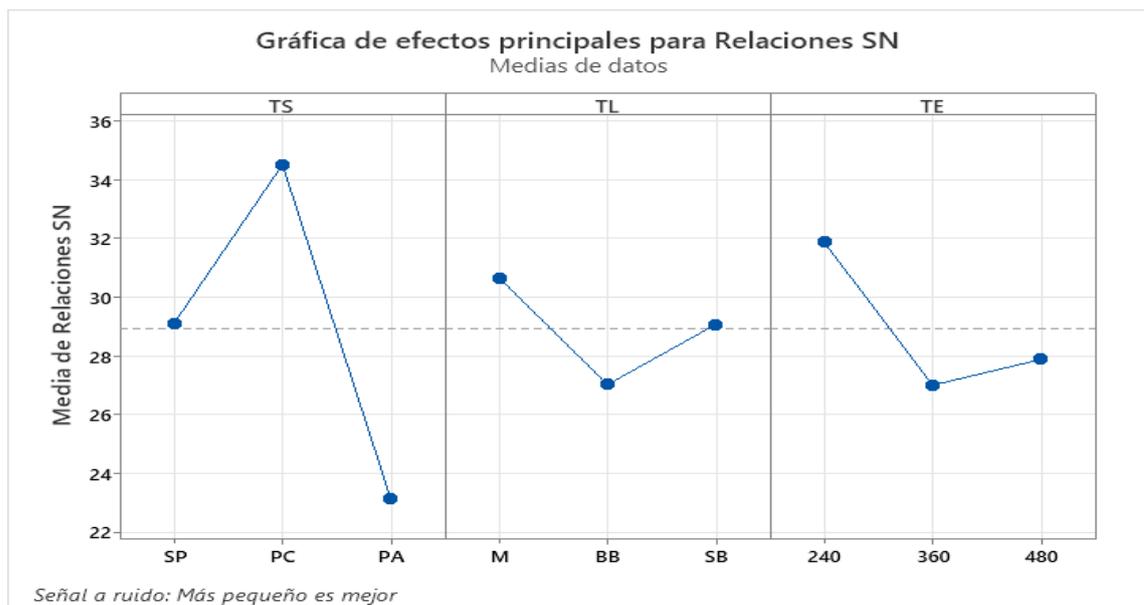
<b>Fuente</b>	<b>GL SC SEC.</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>TS</b>	20,004011	0,004011	0,002006	63,36	0,016
<b>TL</b>	20,000393	0,000393	0,000196	6,21	0,139
<b>TE</b>	20,000611	0,000611	0,000305	9,65	0,094
<b>Error residual</b>	20,000063	0,000063	0,000032		
<b>Total</b>	8 0,005078				

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

### 4.3. Análisis de estadística descriptiva y estadística inferencial

Por último, se analizan lo que son las gráficas de efectos principales para relaciones señal-ruido y para medias; Ilustraciones 4-2 y 4-3 respetivamente, “estas graficas son obtenidas tras la configuración del tipo de análisis en Minitab; “Capítulo 3”, donde al tener presente un análisis de tres factores que cuentan con tres niveles, las gráficas se han dividido en tres segmentos, para el análisis de los tres factores involucrados en el análisis “ TS, TL y TE”, que representan al tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición respectivamente, en función a los niveles que presentan los factores antes mencionados, es decir, para el tratamiento superficial “TS” se analizan los tres niveles “ sin preparación, protección catódica por ánodo de sacrificio y protección anticorrosiva con pinturas epóxicas” denotadas como SP, PC y PA respectivamente, para el tipo de limpieza “TL”, se analizan los tres niveles “ limpieza manual, Bristle blaster y Sand blasting, denotados por M, BB y SB respectivamente ”y finalmente para el tiempo de exposición “TE” se analizan los tres niveles de 240, 360 y 480 horas.



**Ilustración 4-2:** Graficas de efectos principales para Relaciones sin ruido

Fuente: Minitab

Realizado por: Merino, 2023

Para la gráfica de efectos principales para relaciones señal-ruido, en el eje horizontal se aprecian los niveles de cada factor “ SP, PC y PA” para el factor de tratamiento superficial “TS”, “M, BB y SB” para el factor tipo de limpieza “ TL” y finalmente “ 240, 360 y 480 horas” para el factor tiempo de exposición, empleado en el diseño ortogonal de Taguchi, mientras que en el eje vertical se puede apreciar los valores de relación señal-ruido en función al alcance de la experimentación “mientras menor sea la tasa de corrosión mejor mi resultado”.

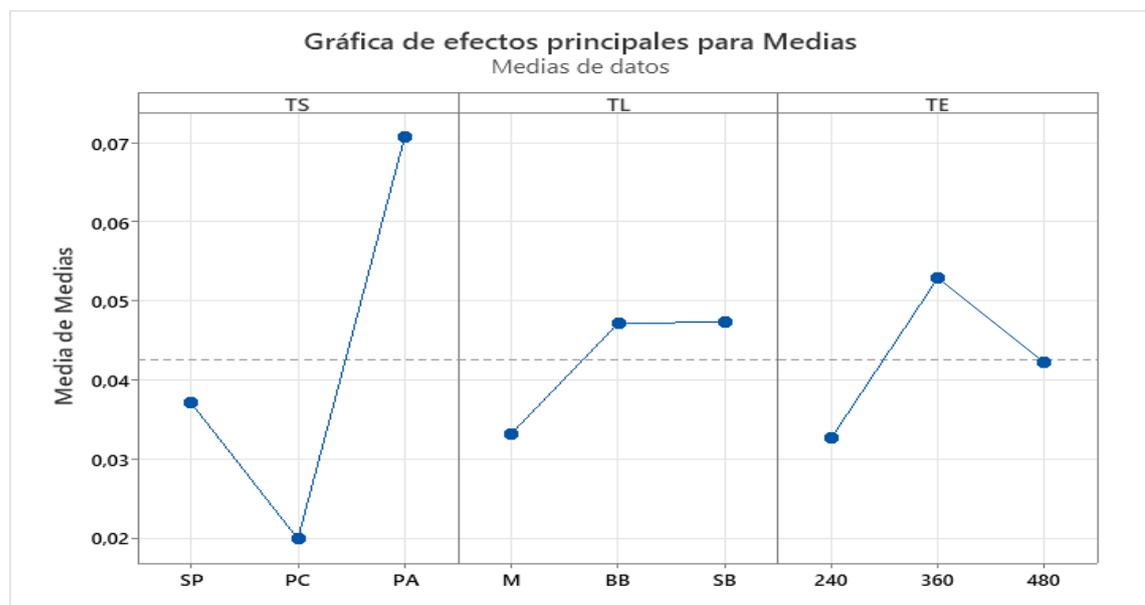
Al ubicarse en la gráfica de efectos principales para la relación señal ruido, Ilustración 4-2, misma que permite analizar la influencia de los factores “ Tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición” denotados por TS, TL y TE, respetivamente, dentro de nuestro sistema experimental, para determinar cual tiene un mayor impacto significativo sobre la variable respuesta, donde, para tener una mejor comprensión de las variables de control, la gráfica se divide en los tres factores antes mencionados, de manera que se puede evidenciar los puntos que generan un menor y mayor velocidad de la corrosión, teniendo en cuenta que todos los valores que estén por encima de la media, son considerados como valores que inciden favorablemente sobre la tasa de corrosión, mientras que, las variables que están por debajo de la media son los que aumentan la tasa de corrosión; también es importante recalcar, que las variables que estén cerca a la media, son variables que no tienen mayor incidencia en la tasa de corrosión; por lo tanto, en el tratamiento superficial, la protección catódica por ánodo de sacrificio y protección superficial con pinturas epóxicas, al estar por debajo y por encima de la media, son las variables que intervienen en los procesos de corrosión, mientras que, en la limpieza mecánica y tiempo de exposición, las variables de control que interfieren en los ensayos de corrosión son una limpieza mecánica y Bristle blaster con un tiempo de exposición de 240 y 360 horas.

Es necesario recalcar, que si se desea reducir la tasa de corrosión, se deberá trabajar con las variables que están por encima de la media “Protección catódica por ánodo de sacrificio, con un tipo de limpieza mecánica, y un tiempo de exposición de 240 horas”, puesto que son valores críticos obtenidos mediante el análisis de varianza, considerando que se utilizó una configuración en el arreglo ortogonal de “menor es mejor”, no obstante, los valores que están por debajo de la media, tales como el recubrimiento superficial con pinturas epóxicas, una limpieza Bristle blaster y un tiempo de exposición de 360 horas, son variables que aumentan la velocidad de corrosión.

En la gráfica de efectos principales para Medias, Ilustración 4-3, en el eje horizontal podemos observar los niveles de cada factor, y en el eje vertical las medias para cada combinación de niveles y factores, considerando que cada media representa el rendimiento promedio del sistema en cada situación experimental; es decir, para cada combinación. Al revisar la gráfica de efectos principales, podemos apreciar que la gráfica se divide en tres partes, donde cada segmento representa los factores “tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición” denotados por “ TS-TL y TE” respectivamente, es importante recalcar que cada media representa el rendimiento del sistema en diferentes condiciones experimentales, es decir, que para una experimentación con recubrimiento superficial de pinturas epóxicas, la tasa de corrosión es mayor, puesto que dicha variable de control está por encima de la media; mientras que, al trabajar con una protección catódica por ánodo de sacrificio, podemos observar que su valor medio dentro del sistema es de 0,02, es decir presenta un bajo rendimiento en mi variable respuesta “tasa de

corrosión”, por ende este factor de control interviene en la reducción de la tasa de corrosión, verificando así, lo expuesto en la gráfica de efectos principales para relación señal-ruido; de igual manera, para los factores de tipo de limpieza “TL” podemos observar que la limpieza Sand blasting presenta una media aproximada de 0,048, mientras que la limpieza mecánica presenta una media de 0,033, dando como resultado que la limpieza Sand blasting es un factor que aumenta la tasa de corrosión a comparación del tipo de limpieza mecánica, que es un factor que reduce la tasa de corrosión.

Finalmente para el factor de tiempo de exposición “TE”, observamos que el tiempo de 360 horas, presenta una media de 0,052 versus un tiempo de 240 horas donde la media es de 0.032, donde podemos determinar que en términos de ensayos de corrosión, un tiempo de exposición de 240 horas es un factor de control que interviene positivamente en dichos ensayos a comparación del tiempo de exposición de 360 horas, que es un factor que aumenta mi tasa de corrosión, sin embargo, es necesario recalcar que para las variables como un tratamiento superficial sin preparación, una limpieza Bristle blaster y un tiempo de exposición de 480 horas, que presentan una media de 0,038; 0,047 y 0,042 respectivamente, son variables que no intervienen sobre mi variable respuesta en relación a las otras variables de control, por ejemplo, para nuestro factor “tratamiento superficial”, específicamente el de “sin preparación” que se encuentra en un valor medio entre un tratamiento superficial con pinturas epóxicas y un tratamiento de protección catódica por ánodo de sacrificio, no tiene mayor significancia en mi experimentación puesto que las variables que más intervienen son el tratamiento superficial por pinturas epóxicas y el de protección catódica por ánodo de sacrificio.



**Ilustración 4-3:** Graficas de efectos principales para medias

Fuente: Minitab

#### 4.4. Constatación de la hipótesis

##### 4.4.1. Planteamiento de hipótesis

Para el planteamiento de la hipótesis en función al estadístico F, mismo que compara la variabilidad entre los grupos y dentro de los grupos, se tiene un nivel de confianza del 95%, el cual indicará si los parámetros que se están estimando, se encuentran dentro del intervalo de confianza junto a un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ , de manera que se pueda cometer un error del 5% en la hipótesis alternativa.

Bajo el criterio antes mencionado y en función a las hipótesis alternativa y nula que plantea el análisis de varianza ANOVA, donde la hipótesis alternativa establece que, si existen significancias significativas entre los grupos, mientras que la hipótesis nula establece que no existe significancia entre los grupos, se plantean las siguientes hipótesis nula y alternativas en relación al caso de estudio.

H0: No existen variables críticas que intervienen en los ensayos de corrosión.

H1: Si existe variables críticas que intervienen en los ensayos de corrosión.

##### 4.4.1.1. Prueba F

Para poder aceptar o rechazar la hipótesis alternativa, se realiza una prueba F, en función a los grados de libertad para el arreglo ortogonal planteado OA<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), y al estadístico F de cada factor establecidos en la Tabla 4-2.

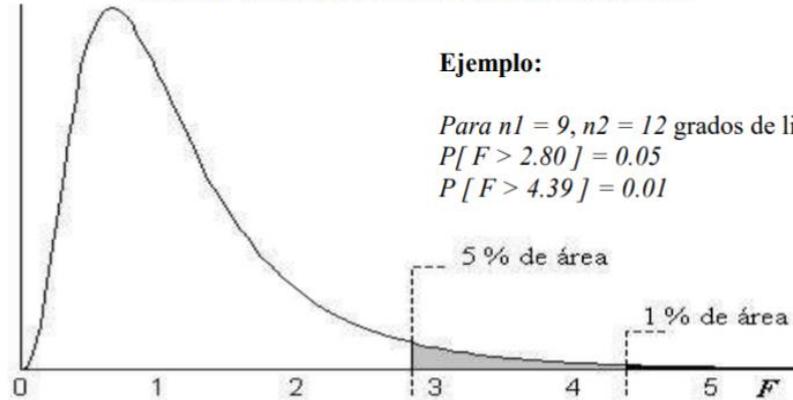
Donde el grado de libertad para mis factores “TS, TL y TE”, tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición, respectivamente, en el numerador es:

$$f_{nume} = 3 - 1 = 2$$

Considerando que se tiene 3 factores y 9 observaciones experimentales en total, los grados de libertad en el denominador para mi arreglo ortogonal OA<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) es:

$$f_{denom} = 9 - 3 = 6$$

### Puntos de Porcentaje de la distribución F



**Ejemplo:**

Para  $n_1 = 9, n_2 = 12$  grados de libertad

$P[F > 2.80] = 0.05$

$P[F > 4.39] = 0.01$

$n_2$	5% (normal) y 1% (negritas) puntos para la distribución de F															
	$n_1$ grados de libertad (para el mayor cuadrado medio)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	248	249
	<b>4052</b>	<b>4999</b>	<b>5404</b>	<b>5624</b>	<b>5764</b>	<b>5859</b>	<b>5928</b>	<b>5981</b>	<b>6022</b>	<b>6056</b>	<b>6083</b>	<b>6107</b>	<b>6143</b>	<b>6170</b>	<b>6209</b>	<b>6234</b>
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.43	19.45	19.45
	<b>98.50</b>	<b>99.00</b>	<b>99.16</b>	<b>99.25</b>	<b>99.30</b>	<b>99.33</b>	<b>99.36</b>	<b>99.38</b>	<b>99.39</b>	<b>99.40</b>	<b>99.41</b>	<b>99.42</b>	<b>99.43</b>	<b>99.44</b>	<b>99.45</b>	<b>99.46</b>
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.71	8.69	8.66	8.64
	<b>34.12</b>	<b>30.82</b>	<b>29.46</b>	<b>28.71</b>	<b>28.24</b>	<b>27.91</b>	<b>27.67</b>	<b>27.49</b>	<b>27.34</b>	<b>27.23</b>	<b>27.13</b>	<b>27.05</b>	<b>26.92</b>	<b>26.83</b>	<b>26.69</b>	<b>26.60</b>
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.87	5.84	5.80	5.77
	<b>21.20</b>	<b>18.00</b>	<b>16.69</b>	<b>15.98</b>	<b>15.52</b>	<b>15.21</b>	<b>14.98</b>	<b>14.80</b>	<b>14.66</b>	<b>14.55</b>	<b>14.45</b>	<b>14.37</b>	<b>14.25</b>	<b>14.15</b>	<b>14.02</b>	<b>13.93</b>
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.64	4.60	4.56	4.53
	<b>16.26</b>	<b>13.27</b>	<b>12.06</b>	<b>11.39</b>	<b>10.97</b>	<b>10.67</b>	<b>10.46</b>	<b>10.29</b>	<b>10.16</b>	<b>10.05</b>	<b>9.96</b>	<b>9.89</b>	<b>9.77</b>	<b>9.68</b>	<b>9.55</b>	<b>9.47</b>
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.96	3.92	3.87	3.84

**Ilustración 4-4:** Distribución F ( $\alpha = 0,05$  en la cola a la derecha)

Fuente: (Meza, 2023)

En función a los grados de libertad del numerador “2” y denominador “6” se obtiene un valor tabulado F de “5,14” de la tabla de distribución F-FISHER, Ilustración 4-4, para posteriormente realizar la prueba de hipótesis en función al estadístico F de cada factor estudiado.

#### 4.4.2. Criterio

Considerando un nivel de significancia del 0,05, se tiene un 5% de riesgo para cometer un error en la hipótesis alternativa, por lo tanto, se presenta el siguiente criterio:

Si  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabulado}}$ , se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$

Si  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabulado}}$ , se rechaza la hipótesis  $H_1$  y se acepta  $H_0$

#### 4.4.3. Prueba de hipótesis

Para el factor de tratamiento superficial “TS” se tiene un estadístico F de 57,88, mientras que el valor F tabulado fue de 5,14, de manera que el valor calculado es mayor al valor tabulado “57,88 > 5,14”, por lo tanto, el factor TS presenta una diferencia significativa, se acepta la hipótesis

alternativa “Si existe variables críticas que intervienen en los ensayos de corrosión.” y por ende la hipótesis de investigación

Para el factor de Tipo de limpieza “TL” se tiene un estadístico F de 5,91 mientras que el valor F tabulado fue de 5,14, de manera que el valor calculado es mayor al valor tabulado “ $5,91 > 5,14$ ”, por lo tanto, el factor TL presenta una diferencia significativa, se acepta la hipótesis alternativa “Si existe variables críticas que intervienen en los ensayos de corrosión.” y por ende la hipótesis de investigación.

Para el factor de tiempo de exposición “TE” se tiene una variabilidad F de 12,04, mientras que el valor F tabulado fue de 5,14, de manera que el valor calculado es mayor al valor tabulado “ $12,04 > 5,14$ ”, por lo tanto, el factor TE presenta una diferencia significativa y se acepta la hipótesis alternativa “Si existe variables críticas que intervienen en los ensayos de corrosión.” y por ende la hipótesis de investigación

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

En función a la hipótesis general “Taguchi permite obtener las variables que tiene más impacto en la medida de tasa de corrosión” misma que se infiere mediante el estadístico F “medida de variabilidad”, considerando un nivel de confianza del 95% y por ende una significancia del 5%, donde se obtuvo una variabilidad tabulada de 5,14 en función a los grados de libertad de la matriz ortogonal de Taguchi, y considerando que la variabilidad F calculada de los factores mediante el análisis de varianza son mayores a la variabilidad tabulada, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, confirmando que si existen significancias entre los grupos analizados y por ende Taguchi permite obtener las variables que tienen más impacto sobre la tasa de corrosión.

Para establecer la metodología que determina las variables que intervienen en los ensayos de corrosión, se desarrolló a partir de la adaptación y configuración ortogonal del método de Taguchi, aplicando el arreglo ortogonal de  $AO_9(3^3)$  “tres niveles y tres factores”, considerando la diversificación de combinaciones empleados en el análisis de factores que intervienen en los ensayos de corrosión, es decir, la creación de permutaciones respecto a los tipos de tratamiento “sin protección, con protección catódica por ánodo de sacrificio y protección anticorrosiva con pinturas epóxicas;” para los tipos de limpieza: mecánico, Bristle blaster y Sand Blasting, y, por último, los tiempos de exposición de: 240, 360 y 480 horas, para un total de 9 corridas experimentales, considerando un ahorro de tiempo y dinero para los ensayos de corrosión.

Se utilizó el método Taguchi para evaluar la tasa de corrosión en diferentes configuraciones experimentales, considerando que los modelos teóricos y estadísticos generados a partir de los datos experimentales, permiten comprender las relaciones entre los factores estudiados (tratamiento superficial, tipo de limpieza y tiempo de exposición) sobre la velocidad de corrosión, donde, al considerar un nivel de significancia del 0,05 y considerando el porcentaje de influencia “P” de cada variable, se pudo observar que el tipo de tratamiento superficial tiene un impacto significativo en la velocidad de corrosión, siendo la protección catódica por ánodo de sacrificio la configuración que muestra menor velocidad de corrosión, mientras que el tipo de limpieza y el tiempo de exposición también influyen en la tasa de corrosión, aunque en menor medida, por lo tanto, los resultados resaltan la importancia de una adecuada preparación de las probetas, incluyendo el tratamiento superficial y la limpieza, considerando que la selección de un método

de tratamiento y limpieza apropiado, puede contribuir a reducir la velocidad de corrosión y por ende a mejorar la resistencia a la corrosión.

En función al arreglo ortogonal de Taguchi  $AO_9(3^3)$ , se pudo realizar el análisis de varianza y modelos estimados, para establecer el grado de incidencia que presenta cada nivel y factor sobre la tasa de corrosión, donde en función a la tabla de coeficientes estimados, se determinó los porcentajes de influencia de cada nivel, mismo que permitieron terminar cuál de los niveles tiene mayor afectación en mi variables respuesta, donde se pudo observar que el valor P del tiempo de exposición de las probetas de 240 horas, es menor al 0,05, de manera que se constató que dicho nivel incide positivamente en mi tasa de corrosión al igual que el tratamiento superficial con protección catódica por ánodo de sacrificio, mientras que, en función al análisis de varianza, se pudo determinar que el factor “Tratamiento superficial” tiene un valor P, menor a 0,05, dando como conclusión que es el factor que más incidencia tiene sobre mi variable respuesta “tasa e corrosión”.

Considerando el manual de usuario y la metodología de Taguchi como eje fundamental de esta investigación, se planteó las matrices ortogonales para cada tipo de probeta a ensayar “acero negro sin protección, acero negro con protección superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica” en función a las variables intervinientes en los ensayos de corrosión como “limpieza superficial y tiempo de exposición” e inclusive se implementó la variable número de probetas, para establecer la relación de tasa de corrosión en función a dicha variable, mismo que garantiza un procedimiento óptimo para la experimentación y análisis de resultados a través del análisis de varianza con la utilización del software estadístico Minitab..

## **5.2. Recomendaciones**

Enfocarse en la metodología de Taguchi como un método para analizar los factores que intervienen en un determinado proceso para optar por la mejor configuración de variables y así alcanzar un resultado deseado, como, por ejemplo, la protección catódica por ánodo de sacrificio que resulta ser un método efectivo para reducir la velocidad de corrosión en el acero ASTM A36.

Considerar la optimización de los tiempos de exposición, buscando reducirlos cuando sea posible para minimizar la velocidad de corrosión y realizar análisis de varianza y modelos estimados para seleccionar los elementos críticos de control y comprender sus efectos sobre la velocidad de corrosión.

Continuar investigando y recopilando datos experimentales para validar y mejorar los modelos teóricos existentes, con el objetivo de obtener estimaciones más precisas de la probabilidad de corrosión, bajo diferentes factores intervinientes en los ensayos de corrosión.

Continuar la investigación respecto al método de Taguchi, para comprender de mejor manera las variables adoptadas en el presente estudio considerando las condiciones de aplicabilidad sobre la tasa de corrosión en diferentes tipos de probetas de acero estructural.

## GLOSARIO

**Experimento:** Son procedimientos que conllevan a una variación en las condiciones de operación dentro de un sistema, cuyo objetivo es medir los efectos que genera el cambio de las condiciones sobre una o más propiedades del resultado.

**Unidad Experimental:** La unidad experimental puede ser cualquier entidad que se ajuste a las características de los sujetos o elementos del estudio, como individuos, animales, plantas, parcelas, regiones geográficas, entre otros. La selección de la unidad experimental depende del objetivo del estudio y de las variables que se están manipulando y midiendo.

**Variables:** Una variable se refiere a cualquier característica, condición o evento que se puede medir, manipular o controlar y que puede influir en los resultados del experimento.

**Factor:** Es una variable que se manipula intencionalmente para ver cómo afecta el resultado del experimento en una o más respuestas.

**Nivel:** El nivel se refiere al valor específico que toma un factor en un experimento. Por ejemplo, en un estudio de la tasa de estudiantes universitarios retirados en el último año de una determinada carrera es el factor, y las razones por las cual se retira como por ejemplo falta de presupuesto o pérdida de gratuidad, vendrían a ser los niveles y se establece que dicho facto presenta dos niveles.

**Tratamiento:** Hace referencia al número posible de combinaciones entre los niveles de los factores.

**Efecto principal:** Estos efectos se interpretan como el grado de importancia que causa el factor sobre la variable de respuesta.

**Interacción:** La interacción representa el grado de dependencia entre los efectos que tienen dos o más factores; es decir que, si se tiene dos factores que presentan interacción entre sí, el efecto que tenga sobre la respuesta uno de estos factores, dependerá del nivel del otro factor.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ARIAS GONZÁLES, J.L. & COVINOS GALLARDO, M.** *Diseño y metodología de la investigación* [en línea]. Arequipa-Perú: Enfoques Consulting EIRL, 2019. [consulta: 28 junio 2023]. ISBN 978-612-48444-2-3. Disponible en: <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2260>
2. **BARRAGÁN, L., & LLIVE, J.** Estudio y caracterización de la sensibilidad a la corrosión por picadura del acero A-572 soldado y tratado térmicamente [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Quito. 2019. pp. 3-11. [consulta: 26 junio 2023]. Disponible en: <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=73704>
3. **BRUNO, C; et al.** Corrosión del concreto reforzado y Degradación de sus propiedades Mecánicas. [En línea] (Proyecto de investigación). Instituto tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. 2021. pp. 22-25. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13863/PI07\\_BIB305021\\_%20Corrosion del concreto reforzado...pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13863/PI07_BIB305021_%20Corrosion%20del%20concreto%20reforzado...pdf?sequence=1&isAllowed=y)
4. **CABRERA ARTIEDA, D.E.** Análisis del proceso de corrosión de un acero api x100 inmerso en salmuera nace mediante ruido electroquímico a condiciones de flujo turbulento [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Veracruzana, Veracruz, México. 2022. pp. 9-11. [consulta: 26 junio 2023]. Disponible en: <https://www.uv.mx/veracruz/mic/files/2022/04/Cabrera-Artieda-Dennis-Enrique.pdf>
5. **CARPIO, J.** 2013. Mecanismo de fallo de aceros estructurales durante la galvanización en caliente [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctoral) Universidad De Cantabria, Santander. 2013. pp. 60-80. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/10803/124834/1/0de1.JCGprevio&cap1%20a%20cap3.pdf>
6. **CÓRDOVA, C.** Evaluación de la resistencia a la corrosión en probetas de acero estructural A36 recubiertas de pintura con nanopartículas de óxido de Zinc [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Pontificia Universidad Católica Del Perú, San Miguel, Perú. 2017. pp. 21-30. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9698>

7. **DÍAZ, V. & ABRAMOVAY, M.** *Metodología de la investigación científica y bioestadística: para médicos, odontólogos y estudiantes de ciencias de la salud* [En línea]. Santiago de Chile-Chile: Brasilia UNESCO BID, 2006. [consulta: 28 junio 2023]. Disponible en: [https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?docid=alma991007639163403936&context=L&vid=56UDC\\_INST:56UDC\\_INST&lang=es&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=sub,exact,Biostatistics.AND&mode=advanced](https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?docid=alma991007639163403936&context=L&vid=56UDC_INST:56UDC_INST&lang=es&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=sub,exact,Biostatistics.AND&mode=advanced)
8. **DOMÍNGUEZ, J. & CASTAÑO, E.** 2010. *Diseño de Experimentos*. Querétaro-México: Alfaomega, 2010. ISBN 978-607-7740-56-8, pp. 1-170.
9. **FERNÁNDEZ, R; et al.** Validación de instrumentos como garantía de la credibilidad en las investigaciones científicas. *Revista Cubana de Medicina Militar* [En línea], 2019, (Ecuador) 48(2). [consulta: 28 junio 2023]. ISSN 1561-3046. Disponible en: <https://revmedmilitar.sld.cu/index.php/mil/article/view/390/331>
10. **GARCÉS, P; et al.** 2020. Recomendaciones sobre Velocidad de Corrosión. En: P. GARCÉS TERRADILLOS (ed.) [En línea]. Mérida, Yucatán, México, pp. 1-2. Disponible en: <https://alconpat.org/contenido/recomendacionestecnicas.php>
11. **GARCÍA, E.** Estudio de corrosión de estructuras en ambientes con bajos contenidos en oxígeno [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctoral) Universidad Complutense De Madrid, Madrid, España. 2020. pp. 6-8. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://docta.ucm.es/handle/20.500.14352/11393>
12. **GUTIÉRREZ PULIDO, H. & DE LA VARA SALAZAR, R.** *Análisis y diseño de experimentos* [En línea]. Guanajuato-México: Mc Graw Hill, 2008. pp.134-140. [consulta: 26 junio 2023]. ISBN 978-970-10-6526-6. Disponible en: [www.FreeLibros.org](http://www.FreeLibros.org)
13. **HERNÁNDEZ, R.** Evaluación electroquímica de la corrosión de la unión soldada de acero inoxidable 304L con acero al carbono A615 [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctoral) Centro De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, Colombia. 2019. pp. 36-79. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/412/1/TESIS%20ROSA%20LBA%20HERNANDEZ%20LEOS.%202019%20DOC%20a.pdf>

14. **LEMA, K. & GAVILÁN, C.** Estudio del efecto de la protección catódica en la corrosión de placas y juntas soldadas a tope de aceros A-36 y SA-516 grado 70 [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2020. pp. 18-25 [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/13931>
15. **LÓPEZ, C.** “Análisis de falla por corrosión bajo tensión en la tubería de un intercambiador de calor”. *Revista Politécnica* [En línea], 2013, (Colombia) vol. 9, pp. 39-45. [consulta: 27 junio 2023]. ISSN 1900-2351. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/download/339/315>
16. **MUCHA HOSPINAL, L.F; et al.** Evaluación de procedimientos empleados para determinar la población y muestra en trabajos de investigación de posgrado. *Desafíos* [En línea], 2020, (Perú) 12(1), pp. 44-55. [consulta: 28 junio 2023]. ISSN 2307-6100. Disponible en: <http://revistas.udh.edu.pe/index.php/udh/article/view/253e/189>
17. **NARANJO, F.** Diseños experimentales de Taguchi Fraccionados [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Tecnológico Nacional De México, Celaya, México. 2019. pp. 5-23. [consulta: 26 junio 2023]. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/794/1/Fernando%20Naranjo.pdf>
18. **NAVARRETE, J.** Contracción en muestras de polipropileno con fibras de cebada mediante la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos Taguchi y algoritmo R3 [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, México. 2012. pp. 17-20 [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: [http://lareferencia.info/vufind/Record/MX\\_390a11d67751a9aad4459a6431330897/Details](http://lareferencia.info/vufind/Record/MX_390a11d67751a9aad4459a6431330897/Details)
19. **OSPINO, F. & MARTÍNEZ, J.** Análisis de los efectos de la corrosión en el comportamiento estructural para una edificación aporricada convencional de concreto reforzado en Colombia [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. 2021. pp. 144-163. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/8810>
20. **PEDRAZA, C; et al.** *Determinación de la agresividad de la corrosión atmosférica en aceros estructurales, acero galvanizado y acero inoxidable en la ciudad de Barranquilla*

*y su área metropolitana* [En línea]. Barranquill-Colombia: Sello Editorial, 2020. [consulta: 8 julio 2023]. ISBN 978-958-5131-78-1. Disponible en: <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/handle/20.500.12834/1043>

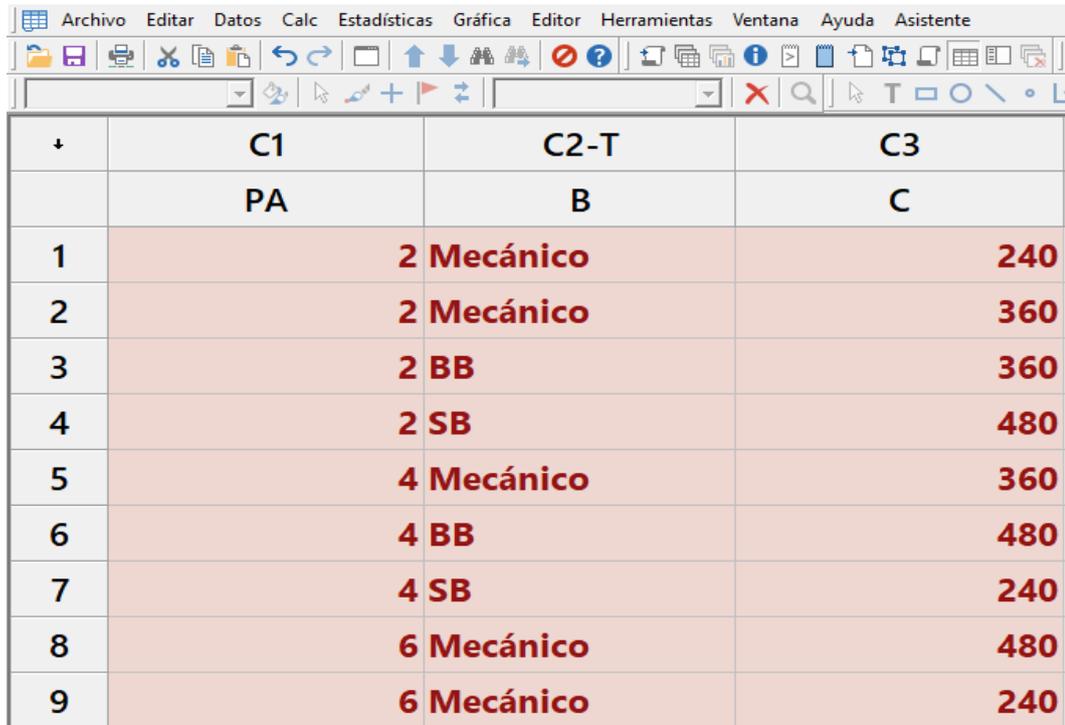
21. **POZO, B.** Estudio de los cambios microestructurales en probetas de acero A36 galvanizadas y enfriadas en distintos medios con ensayo posterior de corrosión acelerada: estudio de corrosión en probetas de acero a36 galvanizadas y enfriadas en una solución de alcohol con hielo seco [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2022. pp. 11-28. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23173>
22. **PUERTO, C.** Métodos de control de corrosión, aplicados a nivel industrial en la protección de estructuras metálicas [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. 2022. pp. 11-20. [consulta: 26 junio 2023]. Disponible en: [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/9083/Metodos\\_control\\_de\\_corrosion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/9083/Metodos_control_de_corrosion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
23. **ROJAS, G.** Todo sobre Corrosión. [blog]. Caracas: 2021. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://www.gedisa.com.ve/boletin/pdf/2021/Boletin%20t%C3%A9cnico%2095%20Corrosion%20PARTE%201.pdf>
24. **VALCARCE, M. & VÁZQUEZ, M.** “Corrosión de estructuras de hormigón armado emplazadas en ambiente marino”. *NEXOS*, ISSN 0328-5030, pp. 10-18.
25. **ZAMBRANO, E. & CATOTA, T.** Análisis de las propiedades mecánicas de la junta soldada de un acero estructural (A588) con el proceso GMAW mediante la implementación del método de Taguchi [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2020. pp. 10-15. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: [https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=73765&shelfbrowse\\_itemnumber=95139](https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=73765&shelfbrowse_itemnumber=95139)
26. **ZAMBRANO, R.** Diseño de un manual de procedimientos para el departamento de operaciones y logística en la Compañía Circolo S.A. y su incidencia en el año 2011 [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.

2011. pp. 17-20. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1644>
27. **ASTM G31-21.** *Guía estándar para pruebas de corrosión por inmersión en el laboratorio de metales.*
28. **WRIGHT, Jeremy.** *Inhibiendo la herrumbre y corrosión para evitar fallas de las máquinas* [ blog]. 25 de agosto, 2013. [Consulta: 25 mayo 2023]. Disponible en: <http://tribologiauteq.blogspot.com/2013/08/inhibiendo-la-herrumbre-y-corrosion.html>
29. **PARRA, Sugedydi.** *Tipos de corrosión en el acero* [blog]. 29 de julio, 2018. [Consulta: 25 mayo 2023]. Disponible en: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/tipos-de-corrosion-en-el-acero>
30. **PINCHA, J. & PILLAJO, J.** Estudio de los efectos en la rugosidad superficial en aleaciones de aluminio 7075T6 al aplicar parámetros de corte y estrategias de mecanizado en fresado 3D [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2019. pp. 25-30. [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17503/1/UPS%20-%20ST004123.pdf>
31. **DAGNINO, S.** “Análisis de Varianza”. *REV CHIL ANEST* [En línea], 2014, (Chile) vol. 43, pp. 306-310. [consulta 27 junio 2023]. Disponible en: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanstv43n04.07.pdf>
32. **RYAN, B.** Minitab. [Software] [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://www.minitab.com/es-mx/solutions/industry/academic/#pricing>
33. **MOLER, C.** Matlab. [Software] [consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: [https://la.mathworks.com/store/link/products/student/SV?s\\_tid=ac\\_buy\\_sv\\_but1](https://la.mathworks.com/store/link/products/student/SV?s_tid=ac_buy_sv_but1)
34. **MEZA, M.** *Tabla 3- Distribución F-FISHER* [en línea]. 2023. [Consulta: 25 mayo 2023]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/482865256/TABLA-3-DISTRIBUCION-F-FISHER-pdf>
35. **MOLINA, O.** Análisis de recubrimientos anticorrosivos aplicado al acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) ASTM A1011 GR 50 y su incidencia en la tasa de corrosión para aplicaciones en la industria metalmeccánica [En línea] (Trabajo de

- titulación). (Maestría) Universidad Técnica de Ambato, Ambato. 2020. pp. 243-246. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30605/1/Maestr%C3%ADa%20D.M.%2006%20-%20Guilcaso%20Molina%20Cristian%20Orlando.pdf>
36. **PADILLA, C & GUZMÁN, A.** Análisis de la resistencia a la corrosión en los recubrimientos 140MXC-560AS, depositados con la técnica de proyección térmica por arco eléctrico mediante pruebas de inmersión y cámara de niebla salina [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Libre, Bogotá. 2017. pp. 92. [consulta: 8 julio 2023]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10389>
37. **YÉPEZ, A.** Estudio de recubrimientos anticorrosivos aplicados sobre acero A36 y su incidencia en la tasa de corrosión utilizando la cámara de niebla salina [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. 2017. pp.50-103. [consulta: 9 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26542/1/Tesis%20I.%20M.%20404%20-%20Yepez%20Intriago%20Ambar%20Carolina.pdf>
38. **CAIZA, J & GAMBOA, F.** Comparación del rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva y estimación de la velocidad de corrosión según la norma ASTM G31-03 en placas de acero ASTM A36 [En línea] (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. 2022. pp.46-48. [consulta: 9 julio 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17267/1/25T00474.pdf>

# **ANEXOS**

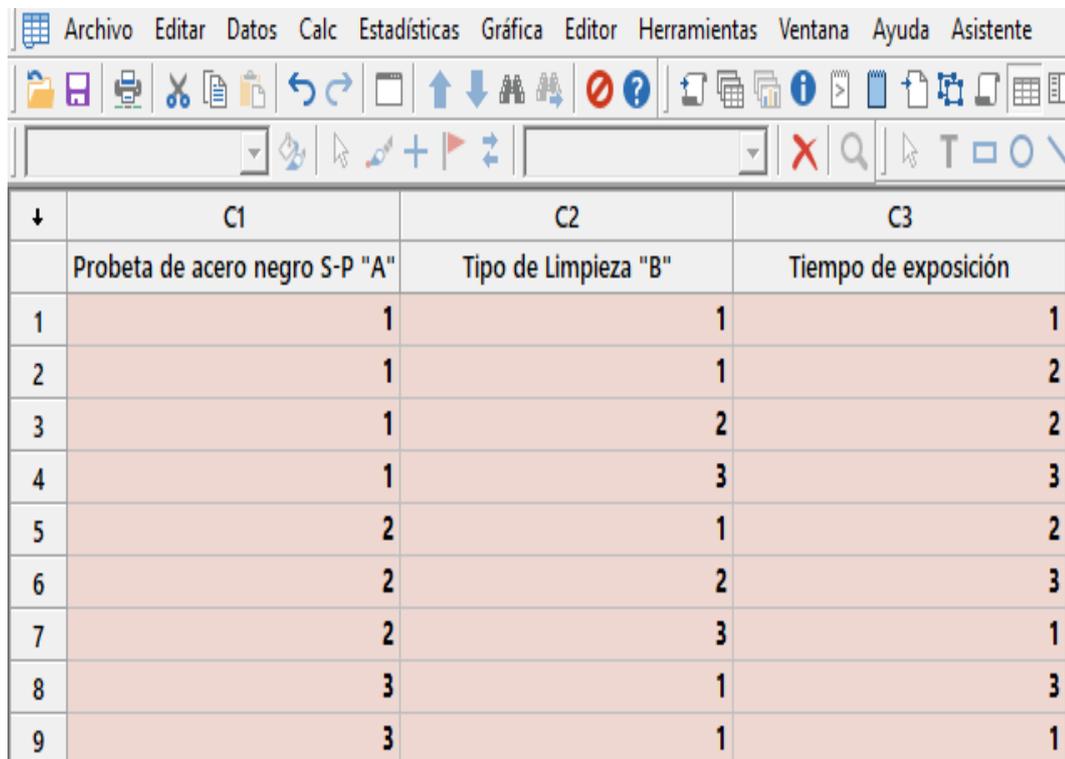
**ANEXO A: CONFIGURACIÓN ORTOGONAL PARA UNA PROBETA DE ACERO NEGRO SIN PROTECCIÓN**



The image shows a screenshot of a spreadsheet application with a menu bar (Archivo, Editar, Datos, Calc, Estadísticas, Gráfica, Editor, Herramientas, Ventana, Ayuda, Asistente) and a toolbar. Below the toolbar is a table with 9 rows and 4 columns. The columns are labeled C1, C2-T, and C3. The rows are numbered 1 to 9. The table contains the following data:

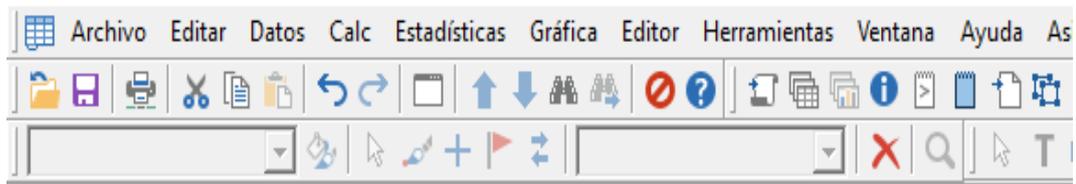
	<b>C1</b>	<b>C2-T</b>	<b>C3</b>
	<b>PA</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>1</b>		<b>2 Mecánico</b>	<b>240</b>
<b>2</b>		<b>2 Mecánico</b>	<b>360</b>
<b>3</b>		<b>2 BB</b>	<b>360</b>
<b>4</b>		<b>2 SB</b>	<b>480</b>
<b>5</b>		<b>4 Mecánico</b>	<b>360</b>
<b>6</b>		<b>4 BB</b>	<b>480</b>
<b>7</b>		<b>4 SB</b>	<b>240</b>
<b>8</b>		<b>6 Mecánico</b>	<b>480</b>
<b>9</b>		<b>6 Mecánico</b>	<b>240</b>

**ANEXO B: COMBINACIONES PARA EL ARREGLO ORTOGONAL DE TAGUCHI EN FUNCIÓN AL NÚMERO DE PROBETAS**



↓	C1	C2	C3
	Probeta de acero negro S-P "A"	Tipo de Limpieza "B"	Tiempo de exposición
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	2
4	1	3	3
5	2	1	2
6	2	2	3
7	2	3	1
8	3	1	3
9	3	1	1

**ANEXO C: COMBINACIONES PARA EL ARREGLO ORTOGONAL EN FUNCIÓN AL TIPO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL**



↓	C1	C2	C3
	Tratamiento superficial "D"	Tipo de limpieza "B"	Tiempo de exposición "F"
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

**ANEXO D: COEFICIENTES DE MODELOS ESTIMADOS PARA RELACIONES SIN RUIDO EN MINITAB**

## Coeficientes de modelos estimados para Relaciones SN

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>EE del coef.</u>	<u>T</u>	<u>P</u>
Constante	28,9321	0,4314	67,065	0,000
TS SP	0,1869	0,6101	0,306	0,788
TS PC	5,5892	0,6101	9,161	0,012
TL M	1,7350	0,6101	2,844	0,105
TL BB	-1,8892	0,6101	-3,097	0,090
TE 240	2,9510	0,6101	4,837	0,040
TE 360	-1,9140	0,6101	-3,137	0,088

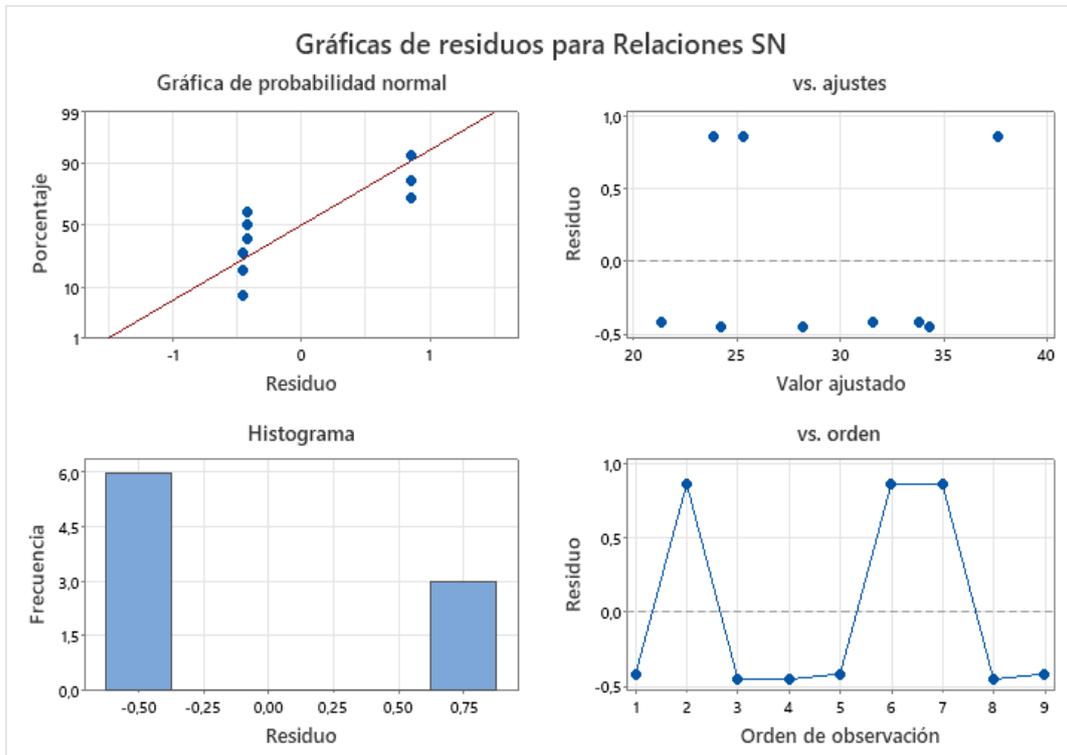
## Análisis de Varianza de Relaciones SN

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
TS	2	193,912	193,912	96,956	57,88	0,017
TL	2	19,809	19,809	9,904	5,91	0,145
TE	2	40,342	40,342	20,171	12,04	0,077
Error residual	2	3,350	3,350	1,675		
Total	8	257,413				

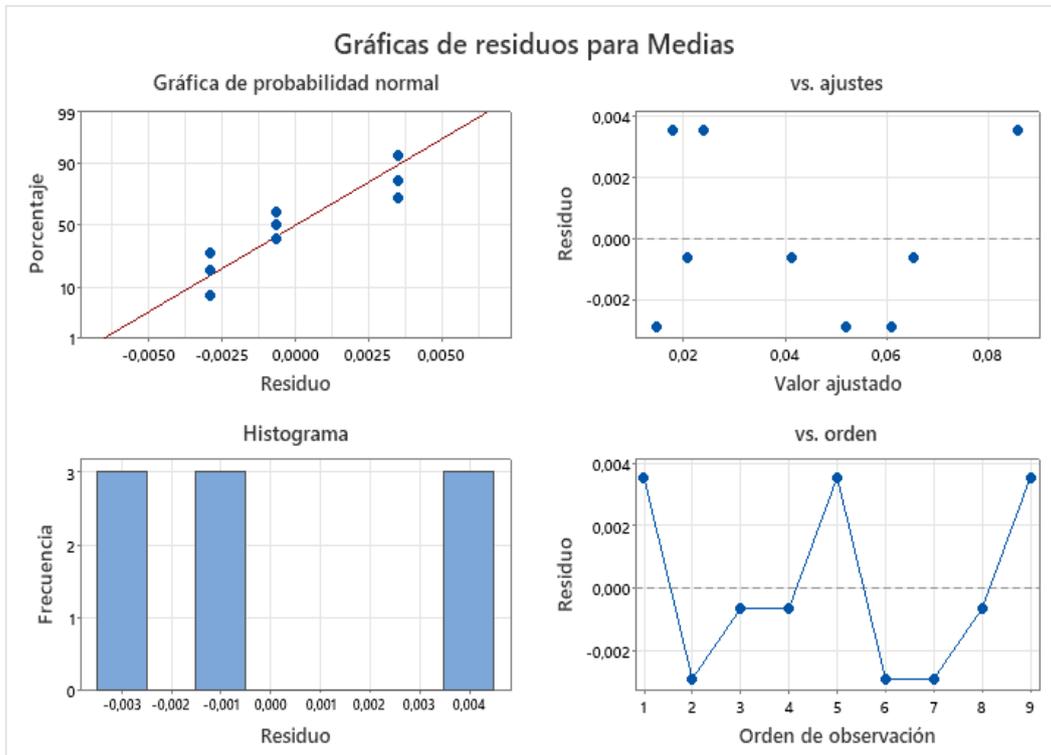
## Análisis de Varianza de Medias

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
TS	2	0,004011	0,004011	0,002006	63,36	0,016
TL	2	0,000393	0,000393	0,000196	6,21	0,139
TE	2	0,000611	0,000611	0,000305	9,65	0,094
Error residual	2	0,000063	0,000063	0,000032		
Total	8	0,005078				

## ANEXO G: GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA RELACIONES SN



## ANEXO H: GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA MEDIAS



**ANEXO I: DISEÑO ORTOGONAL DE TAGUCHI AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) PARA PROBETAS DE ACERO GALVANIZADO**

<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL</b>		
<b>Variable</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de probetas de acero galvanizado	2	4	6
Tipo de limpieza	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas

<b>Tratamientos</b>	<b>“PC”</b>	<b>“B”</b>	<b>“C”</b>
1	2	Mecánico	240 horas
2	2	Mecánico	360 horas
3	2	Bristle blaster	360 horas
4	2	Sand blasting	480 horas
5	4	Mecánico	360 horas
6	4	Bristle blaster	480 horas
7	4	Sand blasting	240 horas
8	6	Mecánico	480 horas
9	6	Mecánico	240 horas

<b>Tratamiento</b>	<b>“PC”</b>	<b>“B”</b>	<b>“C”</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mm/año)</b>
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

**ANEXO J: DISEÑO ORTOGONAL DE TAGUCHI AO<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) PARA PROBETAS DE ACERO GALVANIZADO CON PROTECCIÓN CATÓDICA**

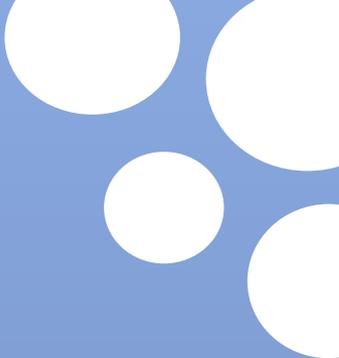
<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL</b>		
<b>Variable</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de probetas de acero galvanizado con protección catódica	2	4	6
Tipo de limpieza	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas

<b>Tratamientos</b>	<b>“PD”</b>	<b>“B”</b>	<b>“C”</b>
1	2	Mecánico	240 horas
2	2	Mecánico	360 horas
3	2	Bristle blaster	360 horas
4	2	Sand blasting	480 horas
5	4	Mecánico	360 horas
6	4	Bristle blaster	480 horas
7	4	Sand blasting	240 horas
8	6	Mecánico	480 horas
9	6	Mecánico	240 horas

<b>Tratamiento</b>	<b>“PD”</b>	<b>“B”</b>	<b>“C”</b>	<b>Velocidad de Corrosión (mm/año)</b>
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

**ANEXO K: MANUAL DE USUARIO PARA DETERMINAR LAS VARIABLES INTERVINIENTES EN CUATRO TIPOS DE ACERO**

EL MANUAL SE PUEDE OBSERVAR EN LAS SIGUIENTES PÁGINAS



# **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TAGUCHI**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO**

**MANUAL DE USUARIO**

**MERINO ZEVALLOS DANIEL ARTURO**

# **Variables que intervienen en la tasa de corrosión**

## **MATRICES DE TAGUCHI PROPUESTAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN DE 4 TIPOS DE PROBETAS**

**Elaborado por:** Daniel Arturo Merino Zevallos.

**Director:** Ing. César Marcelo Gallegos Londoño

El presente manual de usuario es una propuesta obtenida del trabajo de investigación, “Aplicación de la metodología de Taguchi para determinar las variables que intervienen en ensayos de corrosión para acero estructural”.

Riobamba-Ecuador

2023

<b>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo</b>	<b>Pág.1</b>
<b>Manual de procedimiento</b>	<b>Año:2023</b>

## **INTRODUCCIÓN**

El presente manual es elaborado para tener una noción de las variables que intervienen directamente sobre la variable medida; indistintamente del ensayo o experimento que se esté realizando, sin embargo, por tema de investigación, se tomará como ejemplo el ensayo de corrosión por inmersión en laboratorio de metales en función a la norma ASTM G31-21, para 4 tipos de probetas; por lo tanto, es necesario tener presente que las matrices planteadas fueron creadas a juicio y criterio de investigación, por tal razón dichas matrices puede ser modificada en función al objetivo de investigación y alcance del ensayo o experimento a realizar.

<b>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo</b>	<b>Pág.2</b>
<b>Manual de procedimiento</b>	<b>Año:2023</b>

## **OBJETIVO DEL MANUAL**

Generar una herramienta para determinar las variables que intervienen en los ensayos de corrosión, cuya meta sea la de obtener resultados óptimos en función a dichas variables que intervienen en el proceso.

## **ALCANCE**

Este manual es aplicable al sector estudiantil, cuyo fin sean la de mejorar los resultados obtenidos en un ensayo o experimento, en función al número de replicas, para establecer las variables que afectan a un determinado proceso.

## **CAMPO DE APLICACIÓN**

Área de la experimentación, como ensayos de corrosión.

## **TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

**Experimento** - Cambio en las condiciones de operación dentro de un sistema, cuyo objetivo es medir los efectos que genera el cambio de las condiciones sobre una o más propiedades del resultado.

**Unidad experimental** - La unidad experimental puede ser cualquier entidad que se ajuste a las características de los sujetos o elementos del estudio, como individuos, animales, plantas, parcelas, regiones geográficas, entre otros. La selección de la unidad experimental depende del objetivo del estudio y de las variables que se están manipulando y midiendo.

**Variables** - Una variable se refiere a cualquier característica, condición o evento que se puede medir, manipular o controlar y que puede influir en los resultados del experimento.

**Factor.** - Es una variable que se manipula intencionalmente para ver cómo afecta el resultado del experimento en una o más respuestas.

<b>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo</b>	<b>Pág.3</b>
<b>Manual de procedimiento</b>	<b>Año:2023</b>

**Nivel.** - El nivel se refiere al valor específico que toma un factor en un experimento. Por ejemplo, en un estudio de la tasa de estudiantes universitarios retirados en el último año de una determinada carrera es el factor, y las razones por las cual se retira como por ejemplo falta de presupuesto o perdida de gratuidad, vendrían a ser los niveles y se establece que dicho facto presenta dos niveles.

**Tratamiento.** - Hace referencia al número posible de combinaciones entre los niveles de los factores.

**Efecto principal.** - Estos efectos se interpretan como el grado de importancia que causa el factor sobre la variable de respuesta.

**Iteración.** - Representa la relación de dependencia entre los efectos que tienen dos o más factores; es decir que, si se tiene dos factores que presentan interacción entre sí, el efecto que tenga sobre la respuesta uno de estos factores, dependerá del nivel del otro factor.

## **MATERIALES**

Consultar en las respectivas normas en función al experimento o ensayo a realizar, para las pruebas de corrosión por inmersión en el laboratorio de metales, revisar la norma ASTM G31-21

<b>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo</b>	<b>Pág.4</b>
<b>Manual de procedimiento</b>	<b>Año:2023</b>

## **CONSIDERACIONES EN CUANTO A LA MATRIZ DE TAGUCHI**

- La matriz de Taguchi presenta un arreglo ortogonal de 3 factores y 3 niveles.
- Según el criterio del investigador y en función al objetivo del ensayo, se toma como población de estudio 4 tipos de probetas.
- En función al número de factores y niveles se tiene un total de 27 posibles tratamientos, sin embargo, al trabajar con la matriz de Taguchi, se establece un total de 9 tratamientos, “experimentos”.
- Cada iteración representa un distinto efecto de los factores sobre la variable respuesta, en función de los niveles de cada factor.
- Las consideraciones antes mencionadas respecto a la matriz de Taguchi; queda a juicio del investigador, las cuales pueden ser modificadas a beneficio investigativo, acorde con propósito del ensayo y tipo de unidad experimental.
- Para determinar las variables que afectan la tasa de corrosión, se deberá realizar un primer ensayo de prueba aplicando la matriz, para posteriormente realizar un análisis de varianza “ANOVA”, y así obtener las variables más significativas que servirá para futuros ensayos que estén sometidos a las mismas condiciones experimentales.

## CONSIDERACIONES EN CUANTO AL ENSAYO

- El tamaño y forma de la probeta a ensayar depende del objetivo del ensayo, la naturaleza de la muestra, el equipo de prueba, y volumen de la solución, sin embargo, es recomendable emplear muestras rectangulares o circulares.
- El volumen de la solución corrosiva debe ser la adecuada en función al tamaño de la probeta, para evitar cambios en la solución corrosiva y en los resultados obtenidos, como consecuencia del agotamiento de los componentes corrosivos o acumulación del producto generado por la corrosión.
- La relación entre volumen y el área de la probeta a ensayar es de 0,20 ml/mm<sup>2</sup> para ensayos cuya duración sea máximo de 30 días.
- El elemento de soporte de la muestra, utilizado durante el ensayo, no deben causar contaminación en la sustancia corrosiva, y debe presentar un agarre suave y mínimo con la superficie de contacto de la probeta.
- Las muestras deben medirse geométricamente con una precisión máxima del 1%.
- La medición del peso después del ensayo corrosivo, se debe realizar con el mismo grado de precisión tomada antes de iniciar con el ensayo.

### Observación:

Las recomendaciones antes presentadas, son algunas de las consideraciones existentes en la norma ASTM G31-21, de manera que, si se desea profundizar más y calcular el índice de corrosión tras el ensayo, se recomienda ir directamente a la norma antes mencionada

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Seleccionar el tipo de probeta a analizar según las diferentes variables de interés en función al estudio.
- Crear las condiciones o entorno de prueba, en función al propósito que tiene el ensayo de corrosión, o a su vez tratando de recrear las condiciones de la vida real; en caso de tratarse de un caso práctico, por tal razón antes de iniciar con los procedimientos es necesario controlar los niveles de pH, temperatura, humedad y oxígeno; entre otras características de la solución corrosiva.
- Asegurar las condiciones mínimas del laboratorio para el desarrollo de los experimentos.
- Limpiar uniformemente la superficie del metal a ensayar, ya sea por algún tratamiento químico “Decapado”, por eliminación electrolítica o por desgaste abrasivo con utilización de lijas o esmeril.
- Pulir con papel o tela abrasiva N°.120 o equivalentes, a excepción de que el ensayo consista en aplicar directamente a al acabado superficial de fábrica.
- Para tener una fácil identificación del tipo de probeta después del ensayo, es necesario sellar la probeta con una marca de identificación, cerciorándonos de que el estampado de identificación no deje partículas contaminantes en la superficie, caso contrario, se procede a limpiar la superficie químicamente.
- Tomar las medidas geométricas y el peso de la probeta antes del ensayo, con instrumentos que presenten un margen de error máximo del 1%.
- Proceder con el ensayo de corrosión por inmersión en el laboratorio, considerando los niveles de cada factor, expuestos en la siguiente tabla y matriz de Taguchi.

**Tabla 1:** Niveles y factores empleados en el arreglo ortogonal para cada probeta

FACTOR Variable	NIVEL		
	1	2	3
Número de probetas de acero negro sin protección	2	4	6
Tipo de limpieza	Mecánico	Bristle blaster	Sand blasting
Tiempo de exposición	240 horas	360 horas	480 horas

En la siguiente matriz de Taguchi, se observa los nueve experimentos en función a 9 combinaciones de: número de probetas, limpieza aplicada a la superficie antes del ensayo y el tiempo de exposición al ambiente corrosivo.

**Tabla 2:** Combinaciones obtenidas de Minitab en función a los factores y sus respectivos niveles

Tratamientos	“No. Probetas”	“B”	“C”
1	2	Mecánico	240 horas
2	2	Mecánico	360 horas
3	2	Bristle blaster	360 horas
4	2	Sand blasting	480 horas
5	4	Mecánico	360 horas
6	4	Bristle blaster	480 horas
7	4	Sand blasting	240 horas
8	6	Mecánico	480 horas
9	6	Mecánico	240 horas

Por ejemplo: “El primer experimento a realizar es con dos probetas, con una limpieza superficial mecánica y un tiempo de exposición de 240 horas, el ultimo experimento a realizar es con 6 probetas, con una limpieza mecánica y un tempo de exposición de 240 horas”.

- Realizar los experimentos empleando la matriz anterior para las siguientes probetas: acero negro sin protección, acero negro con recubrimiento superficial, acero galvanizado y acero galvanizado con protección catódica.
- Una vez realizado cada experimento en el tiempo establecido, se limpia las probetas ensayadas con la utilización de pinzas o guantes para evitar la contaminación de las mismas.
- Cerciorándonos de que las probetas estén libres de partículas corrosivas, y sabiendo que están completamente secas, se procede a medir el peso mediante una balanza analítica que cuente con una precisión de 1 mg.

- Se calcula la tasa de corrosión de las probetas y completamos las siguientes matrices de datos:

### ACERO NEGRO SIN PROTECCIÓN

**Tabla 3:** Configuración ortogonal para el acero negro sin protección

Tratamiento	“P-AN-S”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

**ACERO NEGRO CON RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL****Tabla 4:** Configuración ortogonal para el acero negro con recubrimiento superficial

Tratamiento	“P-AN-R”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

**ACERO GALVANIZADO****Tabla 5:** Configuración ortogonal para el acero galvanizado

Tratamiento	“P-AG”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

## ACERO GALVANIZADO CON PROTECCIÓN CATÓDICA

Tabla 6: Configuración ortogonal para el acero galvanizado con protección catódica

Tratamiento	“P-AG-C”	“B”	“C”	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	2	Mecánico	240 horas	Dato a obtener
2	2	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
3	2	Bristle blaster	360 horas	Dato a obtener
4	2	Sand blasting	480 horas	Dato a obtener
5	4	Mecánico	360 horas	Dato a obtener
6	4	Bristle blaster	480 horas	Dato a obtener
7	4	Sand blasting	240 horas	Dato a obtener
8	6	Mecánico	480 horas	Dato a obtener
9	6	Mecánico	240 horas	Dato a obtener

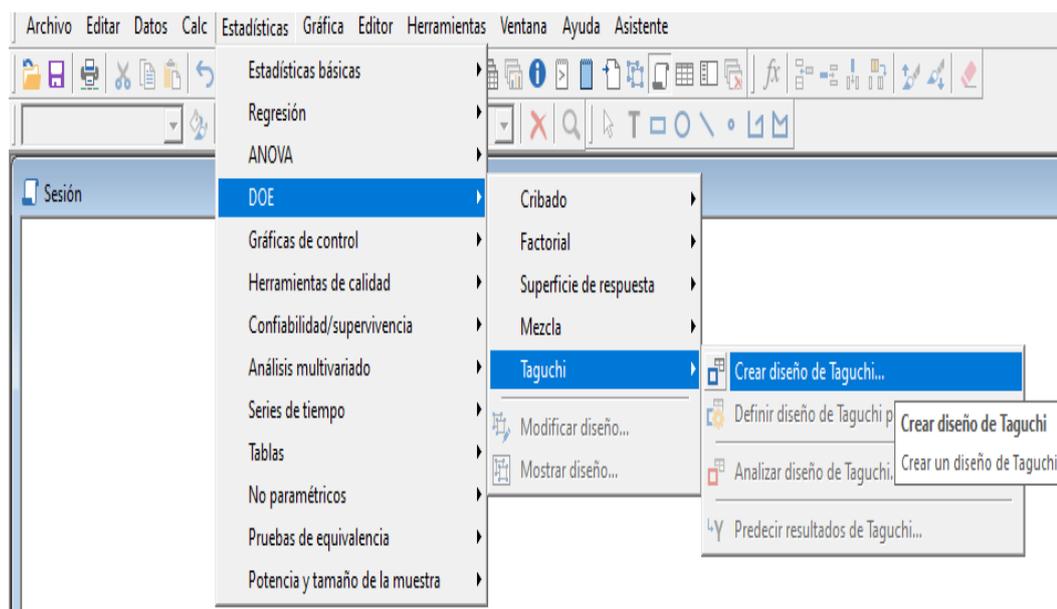
- Con los datos extraídos y con la utilización de un software estadístico; “mismo que se detallará a continuación”, realizamos un análisis de varianza para establecer el número de probetas que tiene mayor incidencia de afectación sobre la variable respuesta; “el respectivo análisis se debe realizar por cada matriz expuesta”.

**Observación:**

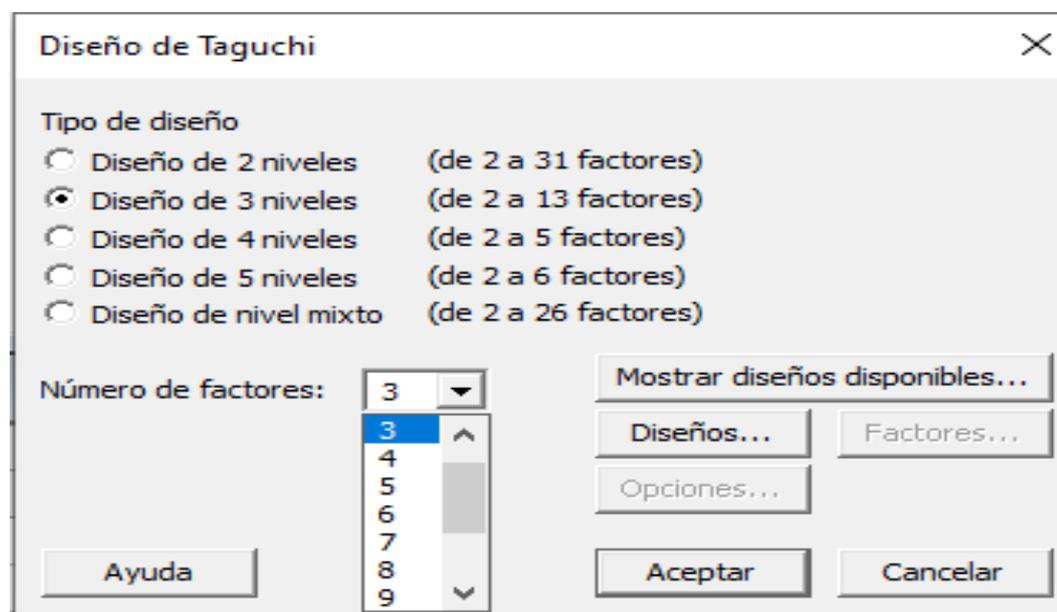
El ensayo de corrosión en función a las matrices expuestas anteriormente, presentan nueve experimentos por cada tipo de probeta; de los cuales, la diferencia entre uno y otro experimento dentro de la misma matriz, difiere en las combinaciones del número de probetas, tipo de limpieza superficial y tiempo de exposición de la muestra. Se debe tener presente que la configuración de Taguchi está realizada para un análisis de 32 probetas por cada tipo de material.

## PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE CADA MATRIZ PROPUESTA MEDIANTE EL SOFTWARE MINITAB

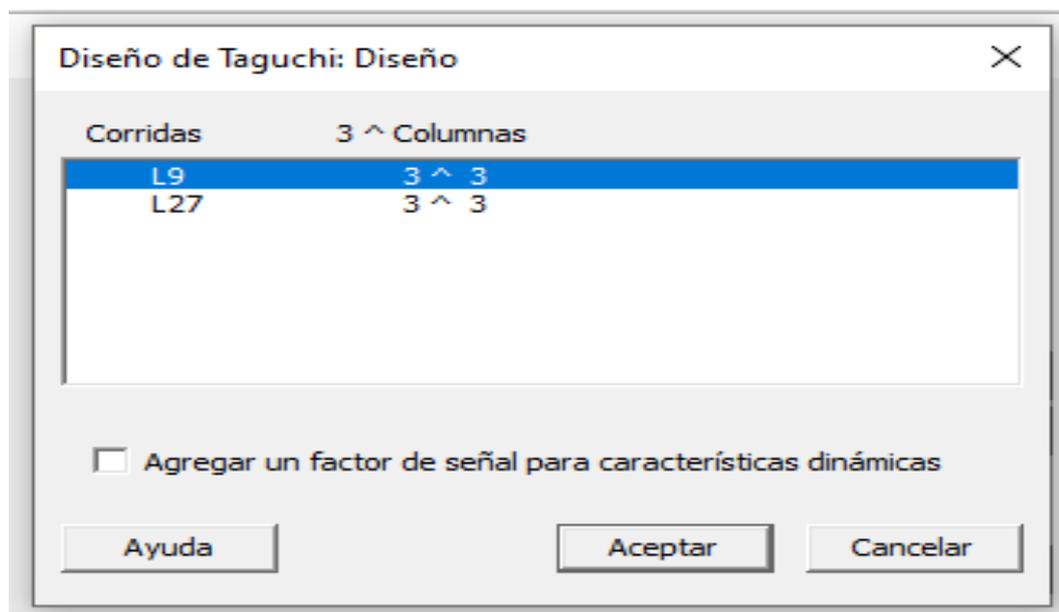
- Creamos el diseño ortogonal de Taguchi  $AO_9$  ( $3^3$ ), para lo cual nos dirigimos a las opciones “Estadísticas-DOE Taguchi-Crear diseño de Taguchi”:



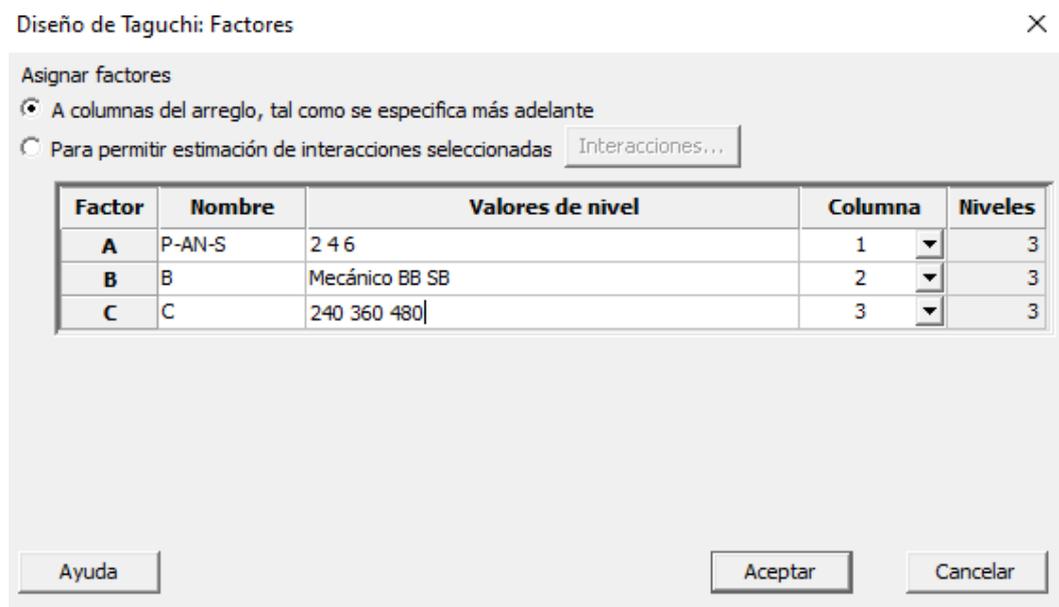
- En la siguiente ventana de diseño de Taguchi, seleccionamos el diseño de 3 niveles y un número de factores de 3:



- Posteriormente seleccionamos la opción diseño y en la siguiente ventana, escogemos un arreglo de 9 corridas:



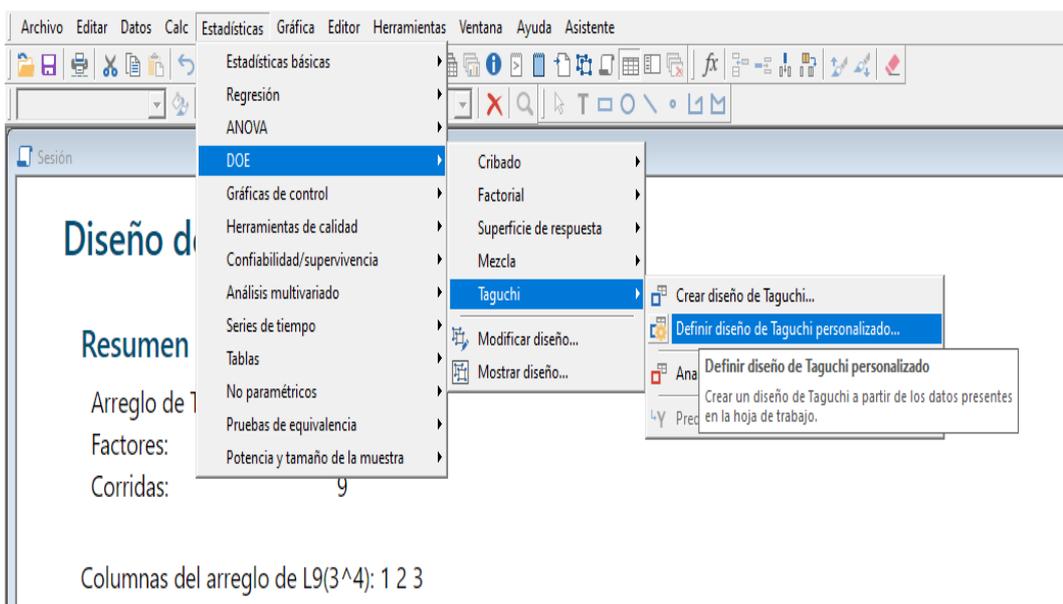
- Nuevamente, en la ventana de diseño de Taguchi, seleccionamos la opción de factores y procedemos a llenar los factores y los niveles de la matriz que se está trabajando:



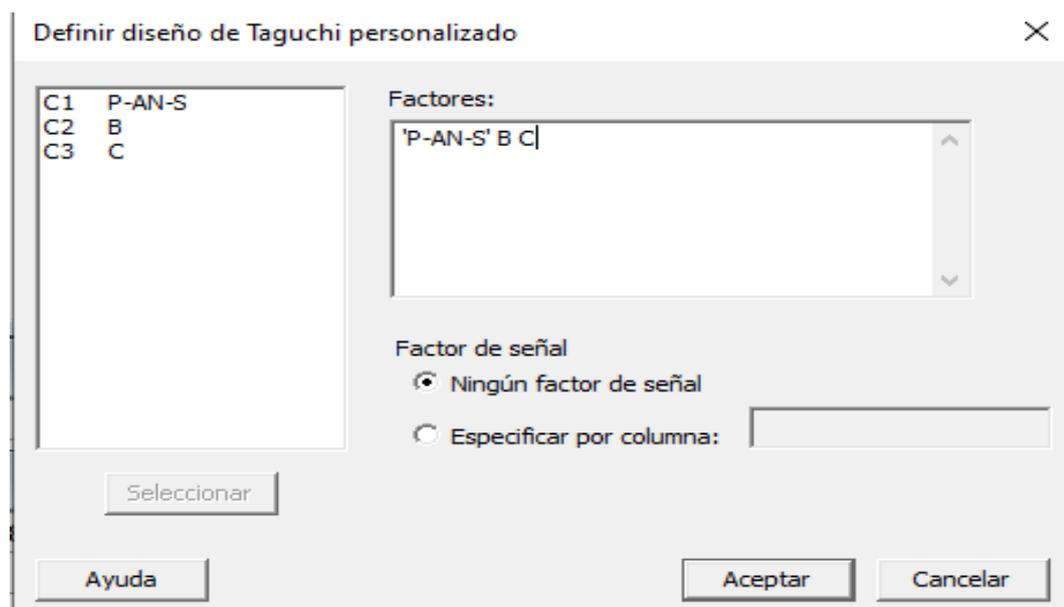
- Una vez creado el diseño, procedemos a ingresar los datos de los experimentos en la columna C4:

	C1	C2-T	C3	C4
	P-AN-S	B	C	Tasa de corrosión
1		2 Mecánico		240
2		2 Mecánico		360
3		2 BB		360
4		2 SB		480
5		4 Mecánico		360
6		4 BB		480
7		4 SB		240
8		6 Mecánico		480
9		6 Mecánico		240

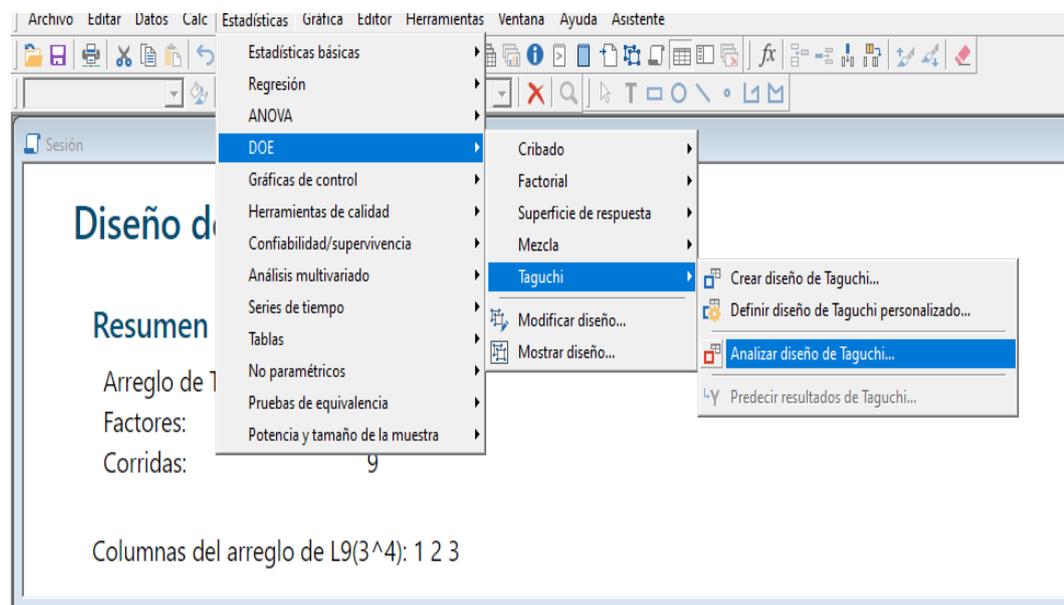
- Posteriormente se procede a seleccionar las características del ensayo de corrosión; para lo cual, vamos a las opciones “Estadísticas DOE, Taguchi, Definir diseño de Taguchi personalizado”:



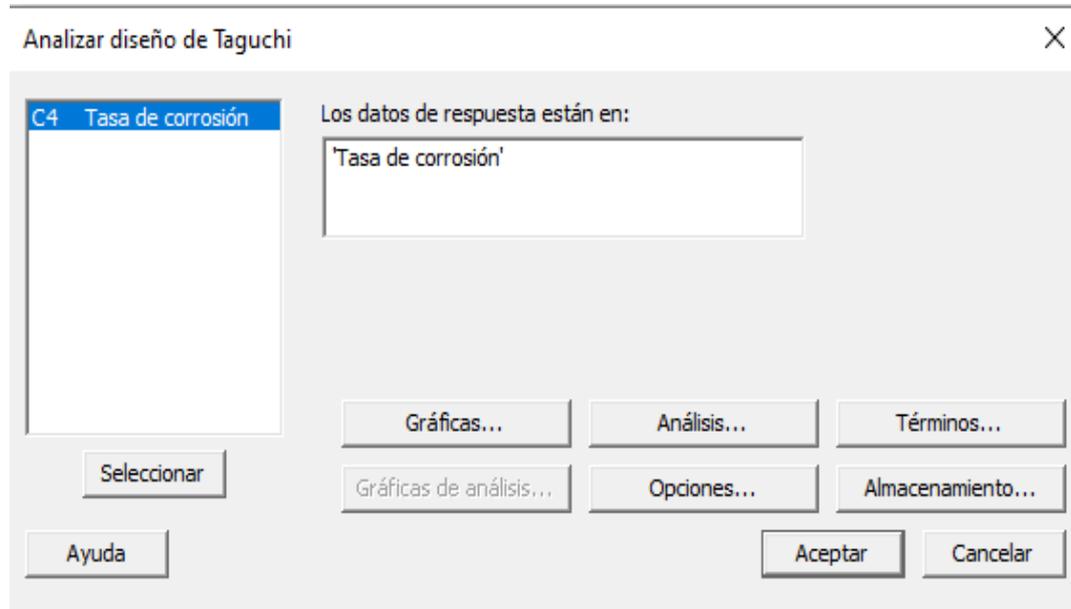
- En la siguiente ventana se selecciona los factores que intervienen en el ensayo de corrosión; para nuestro caso seleccionamos los 3 factores “P-AN-S, B y C”, es decir Número de probetas de acero negro sin protección, Tipo de limpieza y Tiempo de exposición, respectivamente, y seleccionamos la opción de “Ningún factor de señal”:



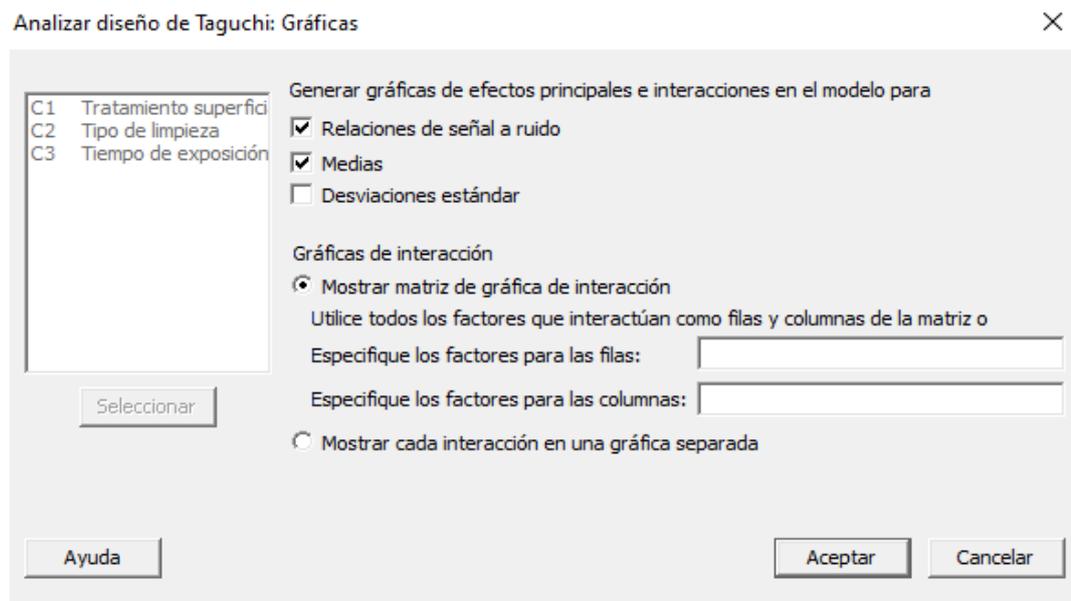
- Finalmente configuramos el tipo de análisis del experimento, mediante las opciones “Estadísticas-DOE-Taguchi-Analizar diseño de Taguchi”:



- En la siguiente ventana, se selecciona la variable de respuesta “Tasa de corrosión”:



- En la pestaña anterior “Analizar diseño de Taguchi”, seleccionamos la opción de gráficas, y configuramos el tipo de gráfica que deseamos “Relaciones de señal ruido y Medias”:



- Nuevamente en la pestaña “Analizar diseño de Taguchi” seleccionamos la opción “Análisis” y escogemos las siguientes opciones:

**Analizar diseño de Taguchi: Análisis** ✕

Mostrar tablas de respuesta para	Ajustar modelo lineal para
<input checked="" type="checkbox"/> Relaciones de señal a ruido	<input checked="" type="checkbox"/> Relaciones de señal a ruido
<input checked="" type="checkbox"/> Medias	<input checked="" type="checkbox"/> Medias
<input type="checkbox"/> Desviaciones estándar	<input type="checkbox"/> Desviaciones estándar

- Finalmente, en la pestaña “Analizar diseño de Taguchi” seleccionamos el recuadro de “opciones” y en la siguiente ventana, marcamos la opción “más pequeños es mejor”:

**Analizar diseño de Taguchi: Opciones** ✕

Relación de señal a ruido:	Formula
<input type="radio"/> Más grande es mejor	$-10 \times \text{Log } 10(\text{sum}(1/Y^2)/n)$
<input type="radio"/> Nominal es lo mejor	$-10 \times \text{Log } 10(s^2)$
<input type="radio"/> Nominal es lo mejor	$10 \times \text{Log } 10(Ybar^2/s^2)$
<input checked="" type="radio"/> Más pequeño es mejor	$-10 \times \text{Log } 10(\text{sum}(Y^2)/n)$
<input type="checkbox"/> Utilizar la fórmula ajustada para nominal es lo mejor	
<input type="checkbox"/> Utilice $\ln(s)$ para toda la salida de desviación estándar	

- Colocamos aceptar a todo y directamente el programa Minitab arrojará las gráficas de señal ruido y medias, para el respectivo análisis de las combinaciones más óptimas para los ensayos de corrosión.

**Observaciones:**

El procedimiento anteriormente descrito, es aplicable a todas las matrices planteadas, sin embargo, la utilización del software Minitab es una herramienta utilizada durante la investigación; por lo que, a criterio del investigador se ha optado por emplear dicho programa para el presente manual, por lo tanto, no es obligatorio la utilización de este software para cumplir con el objetivo planteado de este documento, ya que se pueden emplear otros softwares estadísticos a criterio personal.

**ANEXO L: TASA DE CORROSIÓN DEL ACERO A36 OBTENIDA DE LA BUSQUEDA CIENTÍFICA**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		INGENIERÍA MECÁNICA		FICM							
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS													
<b>Fecha:</b>		17/8/2017											
<b>Lugar:</b>		Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero											
<b>Ciudad:</b>		Ambato				<b>Máquina:</b>		Cámara de niebla salina					
<b>Ensayo:</b>		Corrosión acelerada				<b>Norma:</b>		ASTM B117					
<b>Método de Limpieza Inicial:</b>		Mecánico				<b>Tipo de Recubrimiento Aplicado:</b>		Recubrimiento a base de resinas sintéticas					
<b>Tipo de Aplicación de Recubrimiento:</b>		Pulverización				<b>Codificación:</b>		5					
<b>Constante K:</b>		87600 mm/año				<b>Densidad material base:</b>		7.86 g/cm <sup>3</sup>					
DATOS Y RESULTADOS													
		DIMENSIONES				PESO			TASA DE CORROSIÓN				
ITEM	TIEMPO DE EXPOSICIÓN CÁMARA NIEBLA SALINA (horas)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR INICIAL (mm)	ESPESOR FINAL (mm)	INICIAL (g)	FINAL (g)	PÉRDIDA DE PESO (g)	TASA DE CORROSIÓN N (mm/año)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	Tn	VALORES TASA DE CORROSIÓN* (mm/año)	PROMEDIO TASA DE CORROSIÓN (mm/año)
1	24	44,580	19,610	3,020	3,020	19,100	19,100	-	-	-	-	-	-
2	24	44,340	19,890	2,950	2,950	19,040	19,040	-	-		-	-	-
3	24	44,630	19,580	3,130	3,130	19,130	19,130	-	-		-	-	-
4	24	44,750	19,800	3,000	3,000	19,120	19,120	-	-		-	-	-
5	24	44,380	19,860	2,990	2,990	19,100	19,100	-	-		-	-	-
6	48	44,200	19,790	3,010	3,010	18,900	18,900	-	-		-	-	-

		DIMENSIONES				PESO			TASA DE CORROSIÓN				
ITEM	TIEMPO DE EXPOSICIÓN CÁMARA NIEBLA SALINA (horas)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR INICIAL (mm)	ESPESOR FINAL (mm)	INICIAL (g)	FINAL (g)	PÉRDIDA DE PESO (g)	TASA DE CORROSIÓN N (mm/año)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	Tn	VALORES TASA DE CORROSIÓN* (mm/año)	PROMEDIO TASA DE CORROSIÓN (mm/año)
7	48	45,480	19,820	3,010	3,010	19,470	19,470	-	-	0,005	-	-	0,176
8	48	43,560	19,640	3,030	3,030	18,640	18,640	-	-		-	-	
9	48	44,340	19,780	2,990	2,990	19,010	19,010	-	-		-	-	
10	48	43,790	19,750	2,970	2,970	18,600	18,600	-	-		-	-	
11	72	44,650	19,890	2,980	2,980	19,060	19,060	-	-		0,816	0,176	
12	72	43,320	19,790	2,920	2,920	18,600	18,600	-	-		0,816	0,176	
13	72	44,390	19,890	2,950	2,950	18,940	18,930	0,010	0,175	1,225	0,175		
14	72	43,730	19,980	2,980	2,980	18,790	18,780	0,010	0,177	1,225	0,177		
15	72	45,320	19,680	2,990	2,990	19,450	19,450	-	-	0,816	0,176		
16	96	43,280	19,800	2,940	2,940	18,490	18,480	0,010	0,135	0,004	0,500	0,135	0,134
17	96	44,230	19,910	2,970	2,970	18,900	18,890	0,010	0,132		0,500	0,132	
18	96	43,140	19,670	3,000	3,000	18,430	18,430	-	-		2,000	0,134	
19	96	43,640	19,650	3,010	3,010	18,730	18,720	0,010	0,135		0,500	0,135	
20	96	43,860	19,600	3,010	3,010	18,980	18,970	0,010	0,135		0,500	0,135	
21	120	44,960	20,220	2,950	3,100	19,340	19,320	0,020	0,204		1,225	0,204	
22	120	43,480	19,740	3,000	2,970	18,650	18,640	0,010	0,108	0,005	0,816	0,108	0,147
23	120	44,520	19,780	2,960	2,650	19,120	19,100	0,020	0,211		1,225	0,211	
24	120	44,870	19,870	2,970	2,950	19,270	19,260	0,010	0,104		0,816	0,104	
25	120	44,160	19,530	3,020	2,970	18,970	18,960	0,010	0,108		0,816	0,108	



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



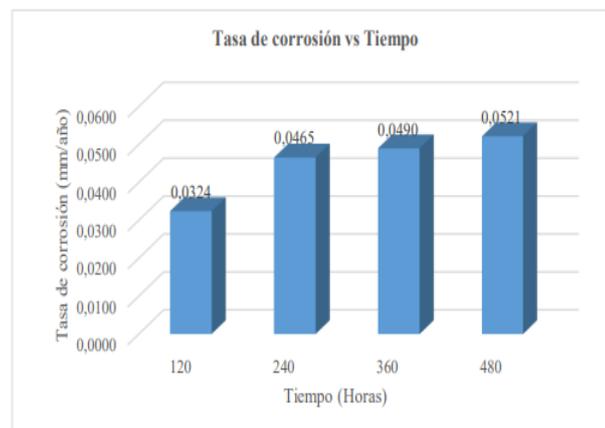
**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

<b>Lugar/Laboratorio:</b>	Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero - Laboratorio de Ensayos Climáticos y Tratamientos Térmicos		
<b>Máquina:</b>	Cámara de Niebla Salina SSC 400	<b>Norma:</b>	ASTM B117
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	24/8/2019	<b>Fecha fin de ensayo:</b>	13/9/2019
<b>Ensayo:</b>	Corrosión Acelerada neutra en la CNS		
<b>Designación de material:</b>	Acero Q235B	<b>Código Probeta:</b>	MBP
<b>Tipo de Recubrimiento:</b>	Macropoxy 646 PW	<b>Tipo de aplicación de recubrimiento:</b>	Pulverizado
<b>Constante K de Corrosión:</b>	87600 mm/año	<b>Densidad de Material:</b>	7,85 g/cm <sup>3</sup>

**DATOS Y RESULTADOS**

Grupo	N°	Tiempo de Exposición (horas)	DIMENSIONES DE LA PROBETA				MASA			CORROSIÓN		
			Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Espesor Inicial (mm)	Espesor Final (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)	Promedio Tasa de Corrosión (mm/año)
1	MBP 1	120	102,48	38,78	39,74	6,96	6,96	198,64	198,63	0,01	0,0234	0,0320
	MBP 2	120	101,04	41,42	41,85	7,04	7,04	209,74	209,72	0,02	0,0444	
	MBP 3	120	100,62	41,22	41,48	7,11	7,11	207,13	207,11	0,02	0,0448	
	MBP 4	120	98,70	39,72	39,20	7,07	7,07	195,28	195,26	0,02	0,0474	
	MBP 5	120	97,52	39,68	38,70	6,92	6,92	191,62	191,62	0,00	0,0000	
2	MBP 6	240	104,51	40,29	42,11	7,01	7,01	209,13	209,09	0,04	0,0442	0,0464
	MBP 7	240	103,75	46,38	48,12	6,95	6,95	242,84	242,79	0,05	0,0483	
	MBP 8	240	99,26	40,48	40,18	7,61	7,61	201,95	201,92	0,03	0,0347	
	MBP 9	240	100,00	41,12	41,12	6,98	6,98	204,45	204,40	0,05	0,0565	
	MBP 10	240	99,58	38,61	38,45	7,25	7,25	193,06	193,02	0,04	0,0484	
3	MBP 11	360	100,81	40,84	41,17	7,38	7,38	212,72	212,65	0,07	0,0527	0,0491
	MBP 12	360	101,79	38,44	39,13	6,96	6,96	192,29	192,22	0,07	0,0555	
	MBP 13	360	102,54	38,58	39,56	7,04	7,04	192,81	192,74	0,07	0,0548	
	MBP 14	360	100,86	42,76	43,13	6,99	6,99	212,56	212,50	0,06	0,0431	
	MBP 15	360	100,49	39,35	39,54	7,06	7,06	192,55	192,50	0,05	0,0392	
4	MBP 16	480	101,41	39,84	40,40	6,97	6,97	205,36	205,27	0,09	0,0518	0,0521
	MBP 17	480	102,05	39,58	40,39	7,08	7,08	200,49	200,40	0,09	0,0518	
	MBP 18	480	101,37	40,88	41,44	7,15	7,15	204,58	204,47	0,11	0,0617	
	MBP 19	480	102,52	40,28	41,30	7,17	7,17	204,90	204,80	0,10	0,0563	
	MBP 20	480	102,77	40,46	41,58	6,95	6,95	206,00	205,93	0,07	0,0391	

**GRÁFICO DE RESULTADO**



**OBSERVACIONES:** La gráfica que antecede presenta los valores promedio de la tasa de corrosión vs Tiempo de la combinación de un tipo de recubrimiento, limpieza inicial de sustrato y aplicación de recubrimiento específico, resultados obtenidos después de analizar las probetas en una cámara de niebla salina en un lapso de hasta 480 horas. Se evidencia la presencia de tasa de corrosión en toda la experimentación, la relación es directamente proporcional a mayor tiempo mayor tasa de corrosión; teniendo su mayor impacto a las 480 horas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Lugar/Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero - Laboratorio de Ensayos Climáticos y Tratamientos Térmicos		
Máquina:	Cámara de Niebla Salina SSC 400	Norma:	ASTM B117
Fecha de inicio de ensayo:	24/8/2019	Fecha fin de ensayo:	13/9/2019
Ensayo:	Corrosión Acelerada neutra en la CNS	Número de horas de ensayo:	480 horas
Designación de material:	Acero Q235B	Código Probeta:	MSB
Tipo de Recubrimiento:	Macropoxy 646 PW	Método de Limpieza:	Sand Blasting
Constante K de Corrosión:	87600 mm/año	Tipo de aplicación de recubrimiento:	Brocha
		Densidad de Material:	7,85 g/cm <sup>3</sup>

DATOS Y RESULTADOS

ITEMS			DIMENSIONES DE LA PROBETA				MASA		CORROSIÓN			
Grupo	N°	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Espesor Inicial (mm)	Espesor Final (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)	Promedio Tasa de Corrosión (mm/año)
1	MSB 1	120	101,54	39,34	39,95	7,22	7,22	196,45	196,43	0,02	0,0466	0,0285
	MSB 2	120	98,16	38,24	37,54	7,28	7,28	178,66	178,65	0,01	0,0248	
	MSB 3	120	100,70	40,84	41,13	6,92	6,92	201,23	201,22	0,01	0,0226	
	MSB 4	120	96,88	38,20	37,01	7,05	7,05	180,38	180,37	0,01	0,0251	
	MSB 5	120	101,79	38,80	39,49	6,93	6,93	192,66	192,65	0,01	0,0235	
2	MSB 6	240	101,66	39,30	39,95	7,05	7,05	195,26	195,23	0,03	0,0349	0,0280
	MSB 7	240	96,02	41,38	39,73	7,02	7,02	196,48	196,46	0,02	0,0234	
	MSB 8	240	101,84	40,72	41,47	7,11	7,11	205,13	205,10	0,03	0,0336	
	MSB 9	240	98,90	38,79	38,36	6,94	6,94	184,16	184,14	0,02	0,0242	
	MSB 10	240	99,12	39,38	39,03	7,20	7,20	190,40	190,38	0,02	0,0238	
3	MSB 11	360	100,48	40,32	40,51	7,08	7,08	198,11	198,04	0,07	0,0536	0,0508
	MSB 12	360	103,88	36,09	37,49	7,11	7,11	191,09	191,02	0,07	0,0579	
	MSB 13	360	98,14	40,12	39,37	7,06	7,06	189,91	189,85	0,06	0,0472	
	MSB 14	360	98,72	41,12	40,59	7,08	7,08	200,71	200,66	0,05	0,0382	
	MSB 15	360	96,98	39,22	38,04	7,12	7,12	185,75	185,68	0,07	0,0570	

Ficha de recolección de datos

Lugar:	Riobamba		
Fecha de inicio del ensayo:	2/12/2021		
Fecha de fin del ensayo	25/01/2021		
Ciudad:	Riobamba		
Materiales:	Cubas de polipropileno de 10 L	Codificación:	A36PSPC
Norma:	ASTM G 31	Material:	A-36
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,81 g/cm <sup>3</sup>
Limpieza:	Manual-Desengrasante	Constante K:	87600
Dimensiones	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )
	100	5,06	

Resultados

N.º	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida de espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,53	0,04	338,3	337,0	1,3	0,1107
2	1296	5,57	5,55	0,02	342,9	342,6	0,3	0,0256
3	1296	5,57	5,56	0,01	343,7	343,1	0,6	0,0511
4	1296	5,57	5,57	0,00	337,8	337,7	0,1	0,0085
5	1296	5,57	5,53	0,04	338,2	337,1	1,1	0,0937

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Ficha de recolección de datos								
<b>Lugar:</b>		Riobamba						
<b>Fecha de inicio del ensayo:</b>		02/12/2021						
<b>Fecha de fin del ensayo</b>		25/01/2022						
<b>Ciudad:</b>		Riobamba						
<b>Materiales:</b>		Cubas de polipropileno de 10 L			<b>Codificación:</b>		A36PSPC	
<b>Norma:</b>		ASTM G 31			<b>Material:</b>		ASTM -A36	
<b>Ensayo:</b>		Corrosión acelerada			<b>Densidad:</b>		7,81	
<b>Limpieza:</b>		Manual-Desengrasante			<b>Constante K:</b>		87600	
<b>Dimensiones</b>		<b>Largo (mm)</b>		<b>Ancho (mm)</b>		<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>		101,6
		100		5,06				
Resultados								
N.º	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida del espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,53	0,04	341,3	340,1	1,2	0,1022
2	1296	5,57	5,54	0,03	342,1	341,6	0,5	0,0426
3	1296	5,57	5,55	0,02	336,9	336,2	0,7	0,0596
4	1296	5,57	5,56	0,01	339,2	338,6	0,6	0,0511
5	1296	5,57	5,56	0,01	338,3	338,0	0,3	0,0256

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

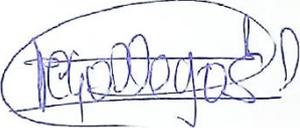
Ficha de recolección de datos								
<b>Lugar:</b>		Riobamba						
<b>Fecha de inicio del ensayo:</b>		2/12/2021						
<b>Fecha de fin del ensayo</b>		25/01/2021						
<b>Ciudad:</b>		Riobamba						
<b>Materiales:</b>		Cubas de polipropileno de 10 L			<b>Codificación:</b>		A36PSPC	
<b>Norma:</b>		ASTM G 31			<b>Material:</b>		A-36	
<b>Ensayo:</b>		Corrosión acelerada			<b>Densidad:</b>		7,81 g/cm <sup>3</sup>	
<b>Limpieza:</b>		Manual-Desengrasante			<b>Constante K:</b>		87600	
<b>Dimensiones</b>		<b>Largo (mm)</b>		<b>Ancho (mm)</b>		<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>		101,6
		100		5,06				
Resultados								
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida de espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,55	0,02	338,3	337,5	0,8	0,0681
2	1296	5,57	5,57	0,00	342,9	342,8	0,1	0,0085
3	1296	5,57	5,56	0,01	343,7	343,5	0,2	0,0170
4	1296	5,57	5,55	0,02	337,8	337,7	0,1	0,0085
5	1296	5,57	5,54	0,03	338,2	337,2	1,0	0,0852

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 16/ 02 / 2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> DANIEL ARTURO MERINO ZEVALLOS
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> MECÁNICA
<b>Carrera:</b> MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
<b>Título a optar:</b> INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
 <b>Firma del Director del Trabajo de Titulación</b>
 <b>Firma del Asesor del Trabajo de Titulación</b>