

**OPTIMIZACIÓN DE UN NUEVO PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
RECUBRIMIENTOS ELECTROLÍTICOS EN LA EMPRESA FANTAXÍAS  
LTDA APLICANDO EL MÉTODO TAGUCHI**



**CARLOS FERNANDO VERGEL ZAPATA  
LUDY MARGARITA CÁCERES MONTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

**OPTIMIZACIÓN DE UN NUEVO PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
RECUBRIMIENTOS ELECTROLÍTICOS EN LA EMPRESA FANTAXÍAS  
LTDA APLICANDO EL MÉTODO TAGUCHI**

**CARLOS FERNANDO VERGEL ZAPATA  
LUDY MARGARITA CÁCERES MONTERO**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director**

**DIONISIO LAVERDE CATAÑO  
Ingeniero Metalúrgico  
Escuela de Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

## DEDICATORIA

*A Dios que con su compañía y apoyo afronté situaciones difíciles con esperanza y fe  
sin dar un paso atrás*

*A mi Padre que con su enseñanza y disciplina formo en mí un carácter fuerte que me  
ayuda a lograr cualquier cosa que me proponga, mi Madre que con su cariño,  
devoción y fé inspira en mí, la sabiduría de encontrar soluciones correctas a todas  
mis dificultades, mi hermano que con su comprensión atención y consejos me  
recordó siempre lo inteligente y capaz que podría ser si lo quisiera.*

*A Joice por ser parte importante en mis logros, gracias por ser mi fuente de  
motivación e inspiración*

***Carlos Fernando Vergel Zapata***

## DEDICATORIA

*Éste como todos los logros de mi vida,  
lo dedico a mis Papás, ellos inspiran mis sueños,  
con sabiduría y paciencia... han sido mi Norte.*

*Mamá y Papá, representan fuerza, y Templanza.*

*Jorge, Teban y María,  
ustedes me recuerdan el camino que Dios tiene para nosotros.*

***Ludy Margarita.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos:

Al profesor Dionisio Laverde por su correcta dirección, atención y dedicación características que lograron una gran motivación para la finalización del proyecto de grado.

Al ingeniero Eduardo Niño, al líder de la sección de galvanica Pedro Blanco y al grupo de trabajadores especialmente a Leonardo de la empresa FANTAXIAS Ltda, por su valiosa contribución en la realización de experimentos del proyecto.

Al profesor José Joaquín García por su orientación en el análisis estadístico.

Al personal del laboratorio metalurgia física y del laboratorio de procesos por su gran apoyo y enseñanza.

## CUADRO DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 GALVANOTÉCNIA	4
1.2 CORRIENTE PULSANTE INVERSA	6
1.3 MÉTODO TAGUCHI	8
1.3.1 Historia	8
1.3.2 Metodología utilizada por Taguchi	9
1.3.3 Características de calidad	9
1.3.4 Relación señal/ruido (S/R)	10
1.4 PLANEACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	10
1.4.1 Planteamiento del problema	10
1.4.2 Diseño de experimentos DDE	11
1.4.3 Desarrollo de los experimentos	12
1.4.4 Análisis de resultados	13
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	14
2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO	14
2.1.1 Planteamiento del problema	14
2.1.2 Diseño del experimento	14
2.1.3 Ejecución de los ensayos	18
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	21
3.1 MATERIAL ZAMACK	21
3.1.1 Determinación de los factores influyentes en el Zamack	22
3.2 MATERIAL LÁMINA DE ACERO	32
3.3 CORRIDA DE CONFIRMACIÓN DEL ÓPTIMO	33

3.3.1	Zamack y Lámina de Acero	33
4.	CONCLUSIONES	35
5.	RECOMENDACIONES	36
	BIBLIOGRAFÍA	37
	ANEXOS	38

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Cuadro 1. Variables de corriente pulsante inversa (PRC)	7
Cuadro 2. Descripción de las características de calidad	9
Cuadro 3. Factores del proceso de electrodeposición	15
Cuadro 4. Posibles interacciones	15
Cuadro 5. Factores y niveles para Zamack	16
Cuadro 6. Diseño de experimentos para Zamack según el arreglo L16 ( $4^4 \times 2^3$ )	17
Cuadro 7. Factores niveles para lámina de acero	17
Cuadro 8. Diseño de experimentos para lámina de acero según el arreglo L2 (27)	18
Cuadro 9. Características de la probeta de trabajo	19
Cuadro 10. Datos experimentales de cobre sobre Zamack	21
Cuadro 11. Cuadro de nivel. Promedio a la respuesta de los niveles de cada factor	23
Cuadro 12. Cuadro ANOVA. Para los espesores de los lados	24
Cuadro 13. Cuadro ANOVA. Pooled con un $F_{0,05}$ (95% de confianza)	25
Cuadro 14. Factores relevantes de espesor en los lados	27
Cuadro 15. Cuadro de nivel promedio de la respuesta en % en los niveles de cada factor	28

Cuadro 16. Cuadro ANOVA. % de sobre espesor en los bordes	28
Cuadro 17. Cuadro ANOVA. Pooled con un $F_{0,05}$ (95% de confianza)	29
Cuadro 18. Factores relevantes de sobre espesor de los bordes	30
Cuadro 19. Valores de OEC	31
Cuadro 20. Promedio en los niveles de cada factor	31
Cuadro 21. Condiciones óptimas para Zamack	32
Cuadro 22. Resultados de espesores y sobre espesores en los lados y en el borde del material lámina de acero	32
Cuadro 23. Condiciones óptimas para Lámina de acero	33

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama del proceso de electrodeposición en la empresa Fantaxias Ltda	5
Figura 2. Diagrama de la corriente pulsante inversa	6
Figura 3. Diagrama de flujo para la aplicación de Taguchi	11
Figura 4. Probetas de trabajo	19
Figura 5. Espesor de los lados	21
Figura 6. Espesor del borde	21
Figura 7. Análisis de interacción ( $V_{cat}$ x Carga) en los espesores de los lados	26
Figura 8. Análisis de interacción ( $V_{cat}$ x Carga) en los % sobre espesores de los bordes	29
Figura 9. Diferencia de espesores en Zamack	29
Figura 10. Diferencia de espesores en Lámina de acero	34

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Preparación de las piezas a recubrir	39
Anexo B. Equipo rectificador de corriente pulsante inversa (PRC), utilizado en la empresa Fantaxías Ltda	42
Anexo C. Principales características de los recubrimientos	43
Anexo D. Tambores rotatorios utilizados en la sección de galvanica de la empresa Fantaxías Ltda.	44
Anexo E. Conceptos estadísticos	45
Anexo F. Arreglos ortogonales	51
Anexo G. Modificación de un arreglo ortogonal $L_{16} (2^7)$ estándar s un $L_{16} (4^4 \times 2^3)$	55
Anexo H. Generalidades de las piezas a recubrir	58
Anexo I. Características del baño de cobre	59
Anexo J. Análisis metalográfico para la medición de espesores	61
Anexo K. Resultados de espesores en los lados de la probeta de Zamack	62
Anexo L. Resultados de %sobre espesores en los bordes de la probeta de Zamack	66
Anexo M. Resultados de OEC en la probeta de Zamack	70
Anexo N. Análisis estadístico para la lámina de acero	73

## RESUMEN

### TÍTULO:

**OPTIMIZACIÓN DE UN NUEVO PROCESO DE PRODUCCIÓN DE RECUBRIMIENTOS ELECTROLÍTICOS EN LA EMPRESA FANTAXÍAS LTDA APLICANDO EL MÉTODO TAGUCHI \***

### AUTORES:

Carlos Fernando Vergel Zapata  
Ludy Margarita Cáceres Montero \*\*

### PALABRAS CLAVES:

Método Taguchi; Cobre, Lámina, Fantaxías Ltda.; Corriente pulsante Inversa, Zamack.

### DESCRIPCIÓN:

La calidad de los recubrimientos metálicos depositados sobre fundiciones de Zamack y lámina de acero en la empresa Fantaxías Ltda., actualmente es aceptable para la comercialización de los productos que allí se elaboran. No obstante, encaminados hacia el mejoramiento continuo, se hace necesaria la implementación de nuevas técnicas aplicadas a los procesos de la empresa. Con las técnicas convencionales de corriente directa se obtienen depósitos con espesores heterogéneos, sobre espesores y niveles de porosidad altos.

En este punto, los problemas se remiten a las pérdidas económicas que implica el reprocesamiento por rechazo de material en el control de calidad, lo que también afecta la competitividad de la empresa en el mercado nacional e internacional.

Con el ánimo de mostrar una solución que esté disponible para la empresa Fantaxías Ltda., y a cualquier tipo de empresa en el ámbito nacional con características similares, el trabajo de grado se encaminó en la realización de la investigación del comportamiento experimental de la técnica de electrodeposición con corriente pulsante inversa para los recubrimientos de Cobre sobre material zamack y lámina de acero; aplicando para su análisis el método Taguchi, el cual disminuye significativamente el número de experimentos a escala industrial requeridos para el análisis estadístico pertinente, encontrando las condiciones mejoradas de operación para la efectividad de la técnica. Luego del análisis estadístico se concluyó que las mejores condiciones de operación con la aleación zamack, lograron la disminución del 11.11 % en el tiempo de proceso y un 51% en los espesores, en tanto que para lámina de acero el tiempo de proceso disminuyó en un 20.0 % y la cantidad de Cobre depositado en un 52%. Condiciones que contribuyen a la disminución de costos de producción y se agiliza el proceso de producción.

---

\* Trabajo De grado

\* \* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director:  
Álvaro

## SUMMARY

**TITLE: OPTIMIZATION OF A NEW PROCESS OF PRODUCTION OF ELECTROLYTIC SURFACE IN THE COMPANY FANTAXIAS LTDA APPLYING THE TAGUCHI METHOD\*.**

**AUTHORS:**

Carlos Fernando Vergel Zapata  
Ludy Margarita Cáceres Montero \*\*

**KEY WORDS:**

Taguchi Method, copper, sheet, Fantaxías Ltda, pulsed inverse current, Zamack

**DESCRIPTION:**

Quality of the metallic surfaces placed on smelting of Zamack and copper sheet in the company Fantaxías Ltda, actually it is acceptable for the commercialization of products that are elaborated there. Nevertheless, led towards the continuous improvement, it is needed the implementation of new techniques applied to the processes of the company. With the conventional techniques of direct current it is obtained deposits with heterogeneous thicknesses, on thicknesses and levels of high porosity.

In this point, the problems are remitted to the economics losses that imply the reprocessing for rejection of material in the quality control, which also affects the competitiveness of the company in the national and international market.

With the purpose of showing a solution that be available for the company Fantaxías Ltda, and to any kind of company in the national field with similar characteristics, the graduation project was led to carry out the investigation of the experimental behaviour of the electrodeposition technique with pulsed inverse current for Cooper surfaces on Zamack material and steel sheet; applying for its analysis the Taguchi Method which considerably decreases the number of experiments to industrial scale required for the pertinent statistical analysis, finding the improved conditions of operation for the effectiveness of the technique. After the statistical analysis it was concluded that the improved conditions of operation with the Zamack alloy, it was achieved the decrease of 11.11% in process time and 51% in the thickness, for the steel sheet the process time decreased 20.0% and the quantity of Cooper deposited 52%. Conditions that contribute to the decrease of production costs and it is faster the productions process.

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty of Physical-Chemistry Engineerings. School of Chemistry Engineering. Director: Álvaro Ramírez.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de Galvanoplastia que se aplican para la protección de las piezas metálicas frente a las condiciones de trabajo a las que serán expuestas; usualmente emplean corriente directa. Con esta técnica no se puede tener un control adecuado sobre los espesores del material depositado que varían de acuerdo a la densidad de corriente que circula por la pieza, también se presentan acabados superficiales heterogéneos, recubrimientos con altas porosidades, características que en conjunto contribuyen al deterioro acelerado de las piezas expuestas a condiciones de trabajo.

La empresa Fantaxías Ltda., en búsqueda del mejoramiento continuo de los procesos de Galvanoplastia, ha querido implementar la técnica que aplica Ondas pulsantes. La implementación de estas técnicas inició a mitad del siglo XX pero su aplicación tuvo retrasos por los requerimientos de equipos costosos con características especiales de suministro de corriente. La utilización de ondas pulsantes en los procesos de electrodeposición procura minimizar el número de material reprocesado o rechazado por la deficiencia de las características del recubrimiento, que concluyen en pérdidas económicas para la empresa. Con esto se pretende que la empresa Fantaxías Ltda., pueda mejorar su posición frente a la oferta de sus productos.

El propósito del presente trabajo es el de adecuar resultados de estudios previos a escala piloto en los que se ha demostrado las ventajas de la utilización de corriente pulsante inversa sobre los recubrimientos de Cobre en material zamack y lámina de acero. El objetivo principal es encontrar condiciones óptimas de trabajo para operar con los baños electrolíticos

aplicando ondas pulsantes. Para tal fin se cuenta con un fuente computarizada que suministra el tipo de corriente que se requiera; directa, pulsante inversa o pulsante directa. Los factores relevantes que intervienen en el proceso son identificados para realizar el tratamiento y ajuste de niveles que serán manipulados para la determinación de las condiciones que mejor se ajusten a los requerimientos y necesidades de la empresa. Se tendrán en cuenta entonces el tiempo de proceso; intervalo, amplitud y duración de los pulsos catódicos y anódicos, características químicas de los baños, pH, densidad, temperatura, concentración del metal a depositar. Es importante tener en cuenta que para la aplicación de posteriores recubrimientos es elemental que la capa intermedia de cobre tenga uniformidad en su espesor y finura de grano aceptable. Esto sobre todo para obtener posteriores recubrimientos de Níquel con buen brillo.

Para este análisis se desarrolló un diseño de experimentos aplicando la metodología de Taguchi. Este es un método estadístico para la optimización de procesos a escala Industrial para obtener la información necesaria de las condiciones que mejor se adapten a los procesos, esto mediante la utilización de arreglos ortogonales y gráficas lineales. Uno de los objetivos principales de Taguchi es buscar la disminución de la variabilidad de los procesos mediante la generación de procesos y/o productos robustos. Se pretende que con la aplicación del método Taguchi se puedan obtener los factores que son más significativos en los resultados finales de calidad de los productos, así como las mejores condiciones bajo las cuales el proceso se hace menos insensible a la versatilidad de otros factores que son difíciles de controlar en los procesos en línea. Para aplicaciones a escala industrial es bastante recomendado por la disminución de costos y reportes relativamente rápidos.

Con las condiciones de trabajo obtenidas del análisis estadístico se corroboran las mejoras en los procesos de electrodeposición que utilizan ondas pulsantes a escala Industrial, contribuyendo a la evolución de los procesos de galvanoplastia de la región y generando una mayor competitividad dentro de los mercados nacionales e internacionales de la empresa.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 GALVANOTÉCNIA

La Galvanotécnica se utiliza en la industria como instrumento de protección de materiales frente al ataque del medio de trabajo al que serán expuestas o para mejorar la apariencia con fines estéticos. La empresa fantaxías Ltda., dedica su producción principalmente al cubrimiento de parte de la demanda de la industria del cuero, confección, herrajes de ferretería, etc. El proceso tiene como principio la **ley de Faraday** en donde se enuncia que las cantidades de material disociado de los electrodos (que posteriormente será depositado) son proporcionales a la intensidad y duración de corriente que circule; las cantidades de material intercambiado entre los electrodos guarda una relación estequiométrica.

$$m = Q * i * t \quad (1)$$

Donde;

m = Masa Depositada

Q = Constante - Equivalente Electroquímico

i = Intensidad de corriente

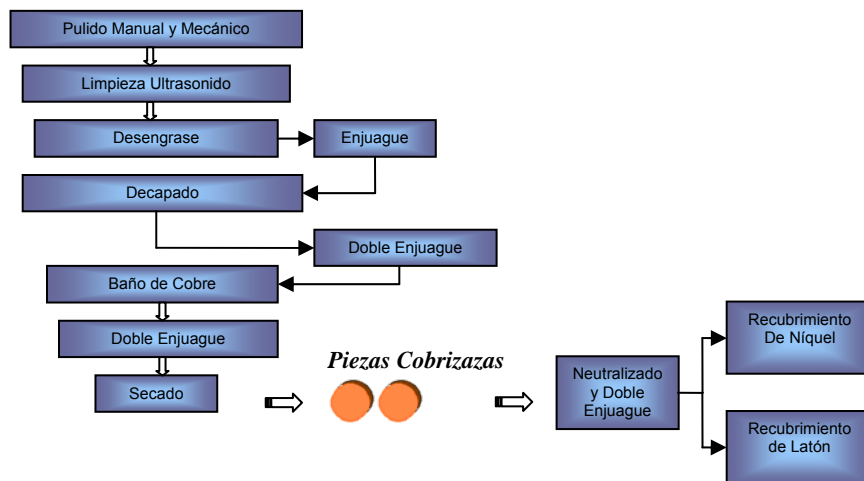
t = Tiempo

La corriente que se suministra a los baños es medida en amperios, y para su impulso es necesaria la presencia de una FEM, fuerza electromotriz, que se mide en Voltios. Un Voltio hace que una corriente de un amperio circule a través de una resistencia de un ohmio. Siempre que se realice un proceso de electrodeposición, la cantidad real de material depositado sobre la pieza a recubrir siempre será menor que la calculada teóricamente. En la práctica se presentan fenómenos que afectan el proceso, haciendo que disminuya la

cantidad de material en el depósito. Para relacionar estas dos cantidades se recurre al rendimiento electroquímico que se define como:

$$Re = \frac{\text{Metal Depositado Efectivamente}}{\text{Metal Calculado Teóricamente (Según el equivalente Químico)}} * 100\% \quad (2)$$

En los procesos de electrodeposición se encuentran variables que afectan el proceso de manera directa e indirecta, es decir, existen factores que son controlables y no controlables dentro del mismo. El Método Taguchi permite realizar una evaluación de los factores que intervienen en el proceso, tanto controlables como no controlables, y así reportar las variables de proceso más relevantes y sus respectivos niveles de operación, llegando al diseño de productos y/o procesos robustos, es decir, con un margen de variabilidad reducido. En la empresa fantaxías Ltda., los procesos de electrodeposición de Cobre constan de las siguientes etapas:



**Figura 1.** Diagrama del Proceso de Electrodeposición en la Empresa Fantaxías Ltda.

Como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 1, la capa de cobre sobre las piezas es una capa intermedia entre el material base y los recubrimientos finales. Esto se hace con el propósito de mejorar propiedades como homogeneidad, adherencia y la finura de grano de

posteriores depósitos que dependen en buena proporción de la porosidad de la base de cobre. En los recubrimientos de Níquel el brillo final es función del brillo y la uniformidad de la capa de Cobre.

Antes del proceso de electrodeposición, las piezas deben haber sido sometidas a un tratamiento previo del que depende en buena parte la calidad de la adherencia y la homogeneidad del recubrimiento de cobre. Ver anexo A.

## 1.2 CORRIENTE PULSANTE INVERSA PRC

La electrodeposición con corriente pulsante inversa implica una variación constante de la polaridad. Durante el proceso de electrodeposición, la intensidad y duración de los períodos catódicos debe ser mayor que los períodos anódicos; como se observa en la figura 2. Para nuestro estudio los periodos catódicos y anódicos tendrán una relación de 6 a 1.

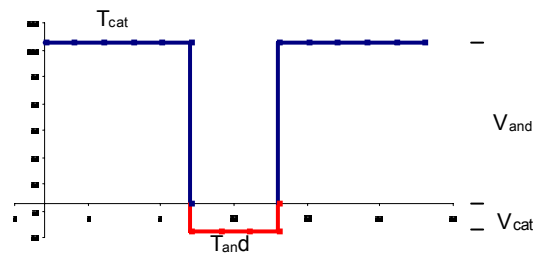


Figura 2. Diagrama de la técnica Corriente Pulsante Inversa

Para la aplicación de la PRC, es necesario contar con equipos especiales que suministren el tipo de ondas pulsantes con la intensidad y duración que se requiera Ver anexo B. Con la utilización de esta técnica, el proceso de deposición no es constante en todo momento, durante el flujo inverso, a través de los electrodos, parte del depósito que se ha formado sobre la pieza

es retirado por disolución, esto con el fin de disminuir la formación de sobre espesores en la superficie del material base. El ciclo se repite durante todo el tiempo de proceso. Los sobre espesores son indeseados por el efecto negativo que tienen sobre la uniformidad del recubrimiento. Se presentan por la concentración de corriente sobre los bordes de las piezas.

En el cuadro 1 se describen las variables que intervienen en el proceso de electrodeposición con PRC.

Cuadro 1. Variables de la corriente pulsante inversa (PRC).

PRC		
VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
<b>Tiempo Catódico</b>	Intervalo en el que se deposita Cobre sobre las piezas, es siempre mayor que el tiempo anódico.	ms
<b>Tiempo anódico</b>	Tiempo durante el cual se disuelve nuevamente parte del Cobre depositado.	ms
<b>Voltaje Catódico</b>	Voltaje aplicado para la electrodeposición de Cobre sobre las piezas. Las piezas intervienen en el proceso como cátodo.	V
<b>Voltaje Anódico</b>	Voltaje al que es expuesta la pieza cuando la polaridad cambia para la retirar parte del sobre espesor. El material a recubrir se comporta como ánodo.	V

Además de tiempos y voltajes, en el proceso también interviene la duración total de la electrodeposición, la carga a recubrir, temperatura, entre otros, que en conjunto intervienen en las características principales de los recubrimientos (ver anexo C). A pesar de concebir los anteriores factores como los más significativos, dentro del proceso también se encuentran situaciones que desvían la respuesta del valor objetivo (factores de Ruido).

En la empresa fantaxías Ltda., la sección de Galvánica desarrolla sus procesos de electrodeposición de manera estática con la utilización de gancheras, y dinámica con tambores rotatorios. Para el presente trabajo se

estudió el comportamiento de la técnica de Corriente Pulsante Inversa en los recubrimientos de Cobre en tambor rotatorio. Ver anexo D

Para el tratamiento experimental se ha recurrido al método Taguchi, por el menor número de experimentos requeridos para el análisis estadístico, a diferencia de métodos convencionales como el diseño factorial. Es una herramienta estadística que permite el estudio de variables controlables y no controlables (factores de ruido).

### **1.3 MÉTODO TAGUCHI**

**1.3.1 Historia.** Entre la década de los 40<sup>s</sup> y 50<sup>s</sup>, El Ingeniero Electrónico Genichi Taguchi introdujo un revolucionario sistema en el diseño de parámetros para obtener productos que en la práctica presentaran baja variabilidad frente a factores de ruido, es decir, ante posibles alteraciones del proceso no concebidas en el diseño.

El objetivo no es controlar las fuentes de variación, si no estudiar su influencia y determinar las condiciones de operabilidad de los factores más significativos en los procesos. G. Taguchi es reconocido mundialmente por sus aportes al mejoramiento de la calidad de los procesos y por ende de los productos.

<sup>2</sup>La metodología de Taguchi hace énfasis en el control de calidad de productos y procesos enfocado en las etapas de diseño.

Los niveles de tolerancias alrededor de un valor objetivo dentro de los que fluctúan las variables de un proceso, han sido considerados un índice relevante para el control de calidad; ocasionando altos costos en dicho control. Taguchi define calidad como la uniformidad de una característica.

---

<sup>2</sup> Fuente: A primer on the Taguchi Method.

El propósito de Taguchi es minimizar la variabilidad de una respuesta ante factores circunstanciales que no son controlables. Estos factores no controlables son llamados factores de ruido; guardan relación con la variable de respuesta o señal. La relación señal – ruido S/R permite evaluar la robustez de una característica de calidad de un producto, es decir, la estabilidad ante variaciones del proceso.

**1.3.2 Metodología utilizada por Taguchi.** El método Taguchi se basa principalmente en los conceptos fundamentales de diseño robusto, Función de pérdidas y relación Señal/Ruido

**Diseño Robusto.** Con el diseño Robusto se pretende encontrar las condiciones de operación de los factores más relevantes que afectan la calidad del proceso, para obtener menor variabilidad en la respuesta, es decir, el proceso es más robusto ante el ruido.

**1.3.3 Características de Calidad.** Para cada caso de estudio, la variable de respuesta se deseará maximizar, minimizar o ajustar a un valor determinado, esto varía dependiendo de la naturaleza del proceso y/o del producto. Las características de Calidad según la necesidad del proceso se definen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de las Características de Calidad.

<b>CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD</b>	
<b>Mayor es mejor</b>	Característica de calidad en donde el mayor valor es el mejor, se desea maximizar la respuesta para mejorar le ejecución del proceso. La variable de respuesta tiende a infinito.
<b>Nominal es mejor</b>	Es un valor cuya característica de calidad es fijada por un valor objetivo. La variable de respuesta se debe acercar al valor meta para obtener un proceso robusto.
<b>Menor es mejor</b>	Característica de calidad en donde el menor valor es el mejor, se desea minimizar la respuesta para mejorar le ejecución del proceso. La variable de respuesta tiende a cero.

**1.3.4 Relación Señal/Ruido (S/R).** La relación S/R es una medida de la sensibilidad de la respuesta con respecto al valor objetivo de la característica de calidad que está siendo estudiada. La señal **S** es el valor de la media muestral, valor en el que intervienen los factores controlables; el ruido **R** es el valor de la varianza muestral. Para la obtención de diseños robustos se requiere que la relación de Señal / Ruido tenga un valor máximo. Este es un criterio para la elección de condiciones óptimas de operación de los factores relevantes en el proceso, puesto que a mayores valores de S/R, menor será la variabilidad de la respuesta. Ver anexo E. La relación S/R se define como se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{S}{R} = -10 \log_{10} (\text{MSD}) \quad (3)$$

Donde;

MSD Desviación del cuadrado Medio: Es una cantidad estadística que refleja la desviación del valor un objetivo. Ver anexo E.

## 1.4 PLANEACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para la aplicación del Método, Taguchi propone 5 pasos esenciales<sup>3</sup> como se observa en la Figura 3.

**1.4.1 Planteamiento del problema.** Se debe conocer el proceso que se desea optimizar para definir la falla de calidad existente o que se desea optimizar, localizar las deficiencias y minimizarlas, es decir, identificar los objetivos del experimento para lograr un desempeño adecuado de la característica que se quiere mejorar.

---

<sup>3</sup> Fuente: A primer on the Taguchi Method

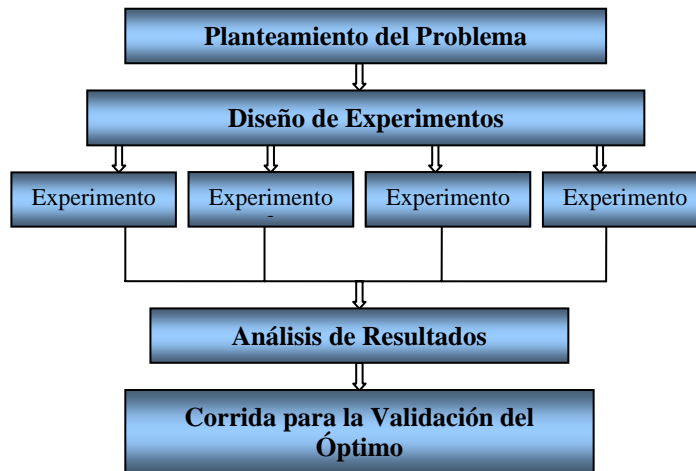


Figura 3. Diagrama de Flujo para la Aplicación de Taguchi.

**1.4.2. Diseño de Experimentos DDE.** En un diseño de experimentos, se debe tener en cuenta el Objetivo principal del diseño, el número de factores a controlar, junto con el número de niveles que se puede probar para cada factor, los efectos que interesan investigar y el costo y duración de los experimentos. El DDE propuesto por Taguchi permite introducir dentro de las pruebas a realizar, factores controlables como no controlables, se deben seleccionar los niveles de los factores controlables que intervienen en el proceso con miras a minimizar pérdidas y disminuir la variabilidad de los procesos, que en últimas es el objetivo principal del Método Taguchi.

- Los **Factores Controlables** o parámetros de diseño son elegidos por el experimentador al igual que los respectivos niveles, estos factores pueden ser modificados según convenga para la característica de Calidad seleccionada.
- Los **Factores no controlables** o Factores de Ruido, Intervienen en el proceso pero no pueden ser manipuladas por el experimentador según convenga. Su control resulta prácticamente imposible por la dificultad que

implica y en ocasiones el alto costo que esto acarrea. Los factores de ruido se presentan por deterioro, imperfecciones de manufactura, etc.

**Arreglos Ortogonales OA.** Los arreglos Ortogonales son matrices de diseño que permiten el estudio experimental de los factores que influyen en la calidad de los procesos, facilitan el diseño experimental de los procesos. Taguchi propone un nuevo paquete de arreglos ortogonales estándar que permiten la evaluación de varios factores simultáneamente con un costo rebajado. Ver anexo F.

Una de las ventajas del Método Taguchi radica en que al estudio de un proceso se pueden introducir tanto factores controlables como no controlables, se seleccionan los arreglos ortogonales que se ajusten a las necesidades del experimentador.

Los factores se deben asignar a las columnas del arreglo apropiadamente, dándole mayor importancia a los efectos principales, aunque las interacciones más representativas también pueden ser tenidas en cuenta dentro del arreglo.

- **Diagramas triangulares:** contienen información sobre la ubicación de las interacciones en el Arreglo Ortogonal entre parejas de factores de los Arreglos Ortogonales.

- **Gráficas Lineales:** las gráficas lineales son herramientas alternativas a los diagramas triangulares para la ubicación de interacciones.

**1.4.3 Desarrollo de los Experimentos.** Los experimentos se desarrollan de acuerdo a lo planteado, para evitar errores experimentales que le resten validez a los resultados obtenidos de los ensayos.

**1.4.4 Análisis de resultados.** Con el análisis de resultados del método Taguchi se buscan tres objetivos principales:

- Establecer condiciones óptimas para un producto o proceso.
- Estimar la contribución individual de cada factor a la variable de respuesta.
- Comprobar la eficiencia de las condiciones encontradas que mejoran la característica de calidad evaluada.

La condición óptima se obtiene al estudiar los efectos principales de cada factor. Esto implica someter a una serie de tratamientos matemáticos a los resultados numéricos que representan el comportamiento de la variable de respuesta en las condiciones experimentales. El análisis de varianza es el tratamiento estadístico más comúnmente aplicado a los resultados experimentales de un diseño para determinar el porcentaje de contribución de cada factor sobre la característica de calidad evaluada. Mediante el estudio del cuadro ANOVA se concluye cuáles factores son los más influyentes en el proceso. Estos factores requieren de mayor atención en su control para asegurar la buena calidad de la característica evaluada, no todos los factores considerados inicialmente en el diseño requieren igual control.

Para el análisis de resultados Taguchi propone dos rutas. La primera se recomienda cuando se tiene sólo una corrida del diseño; los resultados se analizan en el cuadro ANOVA (ver anexo E). La segunda ruta se utiliza para diseños con múltiples corridas, aquí interviene el concepto de Señal/Ruido en el análisis. La relación S/R determina la combinación óptima que hace que el proceso sea insensible a la variabilidad (robusto). Cuando la condición óptima es determinada, es necesario un último ensayo para la ratificación de los resultados obtenidos como los mejores. Aquí se confirma que las condiciones encontradas disminuyen la variabilidad del proceso.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO

**2.1.1 Planteamiento del problema.** En la empresa Fantaxías Ltda., desde su creación se han venido implementando las técnicas convencionales de corriente directa para el proceso de electrodeposición. Esta técnica se utiliza en la industria desde finales del siglo XIX. Se obtienen depósitos con espesores heterogéneos y con niveles de porosidad altos que acarrearán acabados superficiales que no cumplen con los estándares de calidad y que ocasionan pérdidas económicas por el reproceso de las piezas. Por tal motivo se hace necesario el control de calidad en el diseño de los productos y no en la ejecución del proceso.

### 2.1.2 Diseño del experimento

**Factores del Proceso.** Para la optimización del proceso de electrodeposición de Cu, se deben identificar los factores que intervienen de manera significativa para incorporarlos en los diseños experimentales. Los factores que se considera influyen en el proceso de electrodeposición nacen desde etapas previas; desde el pulido de las piezas, hasta la deposición de Cobre metálico. En el cuadro 3 se observan los principales factores que intervienen en el proceso.

La relación que existe entre factores se define como el término *interacción*, el cual es usado para describir una condición en que la influencia de un factor en el resultado es dependiente de la condición de otro factor. Dos factores A y B interactúan (A x B) cuando el efecto de cambio en el nivel de A determina

la influencia de B en el proceso y viceversa. Las posibles interacciones que ocurren en el caso de estudio se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 3. Factores del proceso de Electrodeposición.

<b>PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE CON LA TÉCNICA PRC</b>	Tiempo de proceso
	Carga
	Voltaje Anódico
	Voltaje Catódico
	Caída de Voltaje
	Tiempo Catódico
	Tiempo Anódico
	Composición química de los baños
	Temperatura de los baños
	Operarios
	Velocidad de rotación del tambor

Cuadro 4. Posibles Interacciones

<b>PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN DE COBRE CON LA TÉCNICA PRC</b>	Interacción entre Voltaje Catódico y Tiempo Anódico
	Interacción entre Voltaje Catódico y Tiempo Catódico
	Interacción entre Voltaje Catódico y Carga
	Interacción entre Voltaje Anódico y Tiempo Anódico
	Interacción entre Voltaje Anódico y Tiempo Catódico

**Variable de Respuesta y Característica de calidad.** El **espesor y sobre espesor** son las características de calidad que serán objeto de análisis. Se mide en micrómetros. Los depósitos de Cobre presentan diferencias acentuadas a lo largo de la superficie de las piezas a recubrir, siendo más gruesos en los bordes que en el resto de la pieza. Se desea disminuir esta diferencia.

**Selección de Factores y niveles más influyentes sobre la variable de respuesta para la aleación Zamack:** para la elección de los factores que serán incluidos en el arreglo ortogonal se empieza por descartar aquellos que por su naturaleza son difíciles de controlar, por ejemplo la velocidad de rotación del tambor rotatorio, que no cuenta con un graduador de velocidades que permita su control. La interacción más significativa en el proceso de electrodeposición ocurre entre el Voltaje catódico y la Carga, la cual será

incluida. En los estudios previos realizados a escala piloto se escogieron los niveles de cada factor<sup>4</sup>. Cabe anotar que la elección de los niveles tuvo dos etapas. En la primera etapa, la selección se basó en los resultados de investigaciones anteriores, con los que no se obtuvieron efectos satisfactorios en la variable de repuesta. Partiendo de éstos, se inició la segunda etapa, y teniendo en cuenta las opiniones de los ingenieros de la empresa se definieron el número de niveles y su valor de la siguiente manera:

Cuadro 5. Factores y Niveles para Zamack

FACTOR	NIVELES	VALOR				UNIDAD
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	
Tiempo de proceso (A)	4	70	80	90	100	min
Tiempo anódico (B)	4	150	160	180	200	ms
Tiempo catódico (C)	4	900	960	1080	1200	ms
Voltaje anódico (D)	4	-2.5	-3	-3.5	-3.8	V
Voltaje catódico (E)	2	10	12	---	---	V
Carga (peso) (F)	2	25	28	---	---	Kg.
Interacción (E x F)	2	---	---	---	---	

**Selección del Arreglo Ortogonal para Zamack:** el paquete de arreglos ortogonales que Taguchi propone, permite ajustar los arreglos tradicionales que se encuentran estandarizados a dos niveles cada factor, a los requerimientos de cada investigación. En este caso se seleccionó un Arreglo  $L_{16}$  modificado como el más adecuado, ya que posee cuatro factores de cuatro niveles y tres factores de dos niveles, características ya definidas. El proceso de modificación del arreglo ortogonal estándar  $L_{16}(2^{15})$  al arreglo ortogonal modificado  $L_{16}(4^4 \times 2^3)$  se encuentra en el anexo G. Este arreglo cuenta con una gráfica lineal correspondiente como herramienta para la ubicación de la interacción seleccionada entre el Voltaje Catódico y la Carga. Como resultado de la elección de factores e interacciones con sus

<sup>4</sup> ROZO, Diana. Obtención de electro recubrimientos de cobre, latón y níquel mediante la técnica de corriente pulsante inversa. Ing. Química Bucaramanga. 2006.

respectivos niveles y luego de la modificación del OA; el diseño de experimentos del presente trabajo se resume en el cuadro 6.

Cuadro 6. Diseño de Experimentos para Zamack Según el Arreglo  $L_{16} (4^4 \times 2^3)$

Factores Exp.	A	B	C	D	E	F	G
	$T_{\text{proceso}}$ (min)	$T_{\text{anódico}}$ (ms)	$T_{\text{catódico}}$ (ms)	$V_{\text{anódico}}$ (V)	$V_{\text{catódico}}$ (V)	Carga (Kg)	E x F
1	70	150	900	-2.5	10	25	1
2	70	160	960	-3	10	28	2
3	70	180	1080	-3.5	12	28	2
4	70	200	1200	-3.8	12	25	1
5	80	150	960	-3.5	12	25	1
6	80	160	900	-3.8	12	28	2
7	80	180	1200	-2.5	10	28	2
8	80	200	1080	-3	10	25	1
9	90	150	1080	-3.8	10	28	2
10	90	160	1200	-3.5	10	25	1
11	90	180	900	-3.0	12	25	1
12	90	200	960	-2.5	12	28	2
13	100	150	1200	-3.0	12	28	2
14	100	160	1080	-2.5	12	25	1
15	100	180	960	-3.8	10	25	1
16	100	200	900	-3.5	10	28	2

**Selección de Factores y niveles más influyentes sobre la variable de respuesta para Lámina de Acero:** los factores y niveles que influyen en lámina de acero se seleccionaron a partir de experiencias previas con ensayos de prueba. Los valores escogidos se muestran en el cuadro 7.

Cuadro 7. Factores y Niveles para lámina de acero

FACTOR	NIVELES	Valor		UNIDAD
		Nivel 1	Nivel 2	
Tiempo de proceso (A)	2	60	75	min
Tiempo anódico (B)	2	180	200	ms
Tiempo catódico (C)	2	1200	1330	ms
Voltaje anódico (D)	2	-3.7	-3.9	V
Voltaje catódico (E)	2	10	12	V
Interacción (C x E)	2	---	---	Kg.
Interacción (B x E)	2	---	---	

**Selección del Arreglo Ortogonal para Lámina de Acero:** para este caso se escogió un arreglo ortogonal estándar  $L_8 (2^7)$ , que se ajusta a la cantidad de factores y niveles seleccionados, este arreglo se muestra en el anexo F, junto con otros arreglos estándar.

El diseño de experimentos del presente trabajo para lámina de acero se resume en el cuadro 8.

Cuadro 8. Diseño de Experimentos para Lámina de acero Según el Arreglo  $L_8 (2^7)$

Factor Exp.	A	B	C	D	E	C x E	B x E
	$T_{\text{proceso}}$ (min)	$T_{\text{anódico}}$ (ms)	$T_{\text{catódico}}$ (ms)	$V_{\text{anódico}}$ (V)	$V_{\text{catódico}}$ (V)	Interacción $T_{\text{catódico}}$ x $V_{\text{catódico}}$	Interacción $T_{\text{anódico}}$ x $V_{\text{catódico}}$
1	70	180	1200	-3.7	10	1	1
2	70	180	1200	-3.8	12	2	2
3	70	200	1330	-3.7	10	2	2
4	70	200	1330	-3.8	12	1	1
5	75	180	1330	-3.7	12	1	2
6	75	180	1330	-3.8	10	2	1
7	75	200	1200	-3.7	12	2	1
8	75	200	1200	-3.8	10	1	2

### 2.1.3 Ejecución de los Ensayos

**Probetas de Trabajo:** para la ejecución de los ensayos se diseñaron piezas circulares y convexas de material Zamack y Lámina de acero, mostradas en la figura 4, las cuales permitieron el análisis posterior de la característica de calidad evaluada, su composición química se encuentra en el anexo H. La descripción física de las probetas de trabajo se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9. Características de las Probetas de Trabajo

Material	Zamack
Diámetro	2.5 cm
Grosor	1 mm

Material	Lámina de acero
Diámetro	2.2 cm
Grosor	0.5 mm

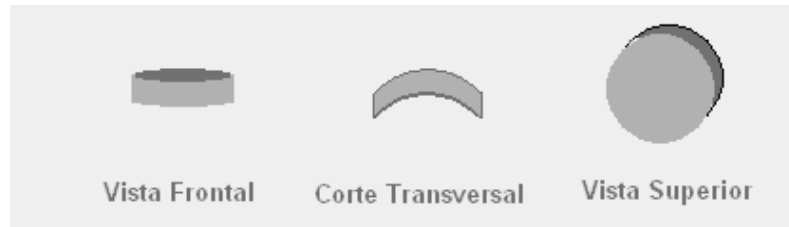


Figura 4. Probetas de Trabajo.

**Desarrollo de Experimentos:** los experimentos se desarrollaron en la sección de electrodeposición con tambores rotatorios de la empresa Fantaxías Ltda. Se procuró que tuvieran lugar dentro del horario de 8:00 a.m. a 5:00 p.m. rango en el cual la caída de Voltaje se mantiene mas estable que en el resto del día. Esto se sabe por experiencia propia de la empresa. Antes de cualquier prueba se determinaba la concentración de Cobre metálico y Cianuro de Sodio Libre en el Baño electrolítico, se realizaba medición de pH, temperatura y densidad, condiciones que se procuró siempre mantener constantes durante todos los ensayos. Información detallada de estas condiciones se muestran en el anexo I.

Durante cada ensayo se introdujeron en el tambor rotatorio 20 probetas de ensayo, junto con la carga a recubrir. Luego de concluida la electrodeposición se tomaban 5 probetas como muestra para la inspección de calidad propuesta por la empresa, consistente en la inmersión de las probetas durante un minuto en una solución acuosa de ácido Sulfúrico al 10%, periodo durante el cual la superficie del recubrimiento debe resistir el ataque químico del ácido. Las pruebas se calificaron como positivas (buen recubrimiento), cuando las probetas no presentaron burbujas en la superficie.

Esta inspección de calidad se denomina *prueba de ácido* y es la que la empresa emplea en sus controles. El diseño se planeó con una sola corrida de los ensayos previstos en el arreglo ortogonal, a pesar de que la repetición de los experimentos representa una disminución en la varianza de la respuesta, puesto que la ejecución de cada repetición representa para la empresa altos costos. También se tuvo en cuenta, para la elección del número de repeticiones, la cantidad de mercancía demandada de material Zamack y lámina de acero durante el periodo previsto para los experimentos, además, durante el desarrollo de cada ensayo, la línea de producción debía parar dando paso a retrasos en el tiempo de entrega de la mercancía ofrecida por la empresa. Estos experimentos se realizaron y en orden aleatorio, disminuyendo la varianza del error y aumentando la significancia de los factores en el proceso.

Una vez terminados los ensayos, ya fueran positivos o negativos, se procedía a depositar sobre las probetas cobrizadas una capa de níquel para proteger el recubrimiento de Cobre. Para la medición de los espesores, las probetas deben estar protegidas además por una resina de embutición. Se utilizó una resina epóxica con un endurecedor de fraguado rápido, para un posterior tratamiento metalográfico. Ver anexo J. La determinación del espesor de cobre se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM B-487-2002, empleando un microscopio óptico de reflexión OLYMPUS OBX adaptado con una cámara de video JBC y un analizador de imágenes Q-500MC LEICA.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 MATERIAL ZAMACK

El procedimiento de la toma de medidas de los espesores de cobre de los lados y de los bordes, se realizó en el microscopio óptico de características antes mencionadas, como se observa en las figuras 5 y 6.

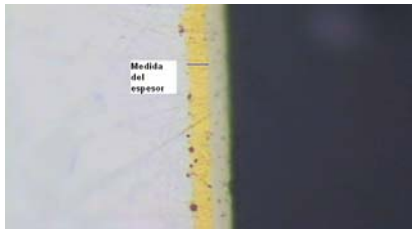


Figura 5. Lado de la probeta

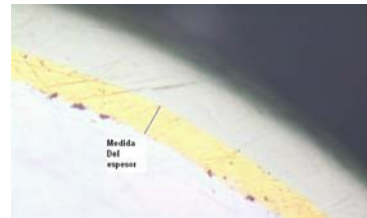


Figura 6. Borde de la probeta

En estas probetas se tomaron veinte mediciones de cada sector (lados y borde). El promedio de estas mediciones se observan en el siguiente cuadro.

Cuadro 10. Datos experimentales de cobre sobre Zamack.

Ensayo	Lados		Borde		% Sobrespesor
	Media (micras)	Desv. estándar	Media (micras)	Desv. estándar	
1	3,16 +/- 0,20	0,54	5,17 +/- 0,56	1,18	63
2	3,94 +/- 0,29	0,91	6,56 +/- 0,46	0,99	66
3	4,23 +/- 0,25	0,79	6,97 +/- 0,56	1,21	65
4	4,83 +/- 0,36	0,78	7,03 +/- 1,04	1,46	45
5	7,63 +/- 0,37	1,15	13,99 +/- 1,44	3,41	83
6	4,64 +/- 0,35	0,85	7,39 +/- 0,68	1,24	59
7	5,13 +/- 0,20	0,55	9,50 +/- 0,57	1,21	85
8	4,75 +/- 0,21	0,56	7,90 +/- 0,40	0,86	66
9	4,24 +/- 0,26	0,61	5,33 +/- 0,59	0,38	26
10	6,37 +/- 0,33	0,62	10,43 +/- 0,78	1,85	64
11	6,85 +/- 0,24	0,57	11,77 +/- 0,44	0,97	72
12	8,71 +/- 0,35	1,03	13,49 +/- 1,13	2,41	55
13	5,74 +/- 0,20	0,43	8,92 +/- 0,84	2,04	55
14	7,74 +/- 0,42	1,12	13,86 +/- 0,54	1,18	79

Ensayo	Lados		Borde		% Sobrespesor
	Media (micras)	Desv. estándar	Media (micras)	Desv. estándar	
15	6,68 +/- 0,25	0,87	10,48 +/- 0,41	0,87	57
16	4,47 +/- 0,32	0,65	6,95 +/- 0,64	1,40	56

Las piezas recubiertas con la técnica corriente directa obtienen espesores y sobre espesores muy altos, que aumentan el costo de producción por el excesivo gasto de materia prima (cobre), a diferencia de la corriente pulsante inversa, obtiene espesores y sobre espesores moderados, de buena adherencia y rugosidad, que cumplen con el control de calidad de la empresa, bajando así el costo de producción, por esta razón el objetivo del análisis de resultados es determinar la condición óptima, identificar la influencia individual de cada factor y estimar la producción en la óptima condición. Para los materiales zamack y lámina de acero, en los experimentos realizados con la técnica de corriente pulsante inversa se pretende encontrar el mejor espesor para aprobar el control de calidad, y al mismo tiempo disminuir el sobre espesor en los bordes, por lo que se escogió el tipo de calidad característica: “el mayor es el mejor”, para el espesor de los lados, y “el menor es el mejor” en el sobre espesor. Para evitar complicaciones por la existencia de dos variables de respuesta (espesor y sobre espesor) de diferente característica de calidad, se aplica el Criterio de Evaluación promedio **OEC**, ver anexo E, combinando el espesor en los lados y el sobre espesor. Los datos del sobre espesor se invierten para obtener un solo tipo de calidad característica: “mayor es el Mejor”.

### 3.1.1 Determinación de los factores influyentes en el zamack

#### Factores influyentes en el espesor de los lados

**Niveles de Importancia:** la determinación de los niveles relevantes en cada factor se realiza como se muestra a continuación:

- Para el factor tiempo de proceso, según el Cuadro 6, los ensayos en los que interviene el nivel 1 están ubicados desde el ensayo 1 hasta el ensayo 4.
- Encontrados los ensayos se identifican sus resultados en el cuadro 10, para luego ser promediados.
- Este procedimiento se realiza con cada nivel de cada factor

El desarrollo matemático del procedimiento anterior se muestra en el anexo K. Los resultados de los valores promediados están consignados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Cuadro de Nivel. Promedio de la respuesta en los niveles de cada factor

<b>Factor</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>	<b>Nivel 4</b>
Tiempo de Proceso	4,04	5,54	<b>6,54</b>	6,16
Tiempo Anódico	5,19	5,67	<b>5,72</b>	5,69
Tiempo Catódico	4,78	<b>6,74</b>	5,24	5,52
Voltaje Anódico	6,19	5,32	<b>5,67</b>	5,10
Voltaje Catódico	4,84	<b>6,30</b>	0,00	0,00
Carga (Peso)	5,54	<b>5,60</b>	0,00	0,00
Interacción	6,00	5,14	0,00	0,00

**Factores relevantes:** los factores relevantes son determinados por comparación de sus varianzas. La técnica conocida como el análisis de varianza (ANOVA) es usada para este propósito, la cual es un instrumento para evaluar las variaciones de los hechos, permiten interpretar mejor las causas de los fenómenos y los efectos de los factores involucrados en el proceso. En el análisis de varianza se computan cantidades conocidas como grados de libertad, suma de cuadrados, suma de cuadrados puros, varianza, error experimental estadístico F y porcentajes de contribución. Todos estos

cálculos fueron realizados con la ayuda del programa statgraphics plus 5.1. En el Cuadro 12 se muestra el análisis de varianza ANOVA.

Los estadísticos F ( $V_{T_{proceso}}/V_{error}$ ) de todos los factores son indeterminados, ya que  $V_{error}$  es igual a cero, tal como lo muestra el cuadro 12. Sin embargo,  $V_{error}$  puede ser combinado (pooled) con factores de pequeña varianza para calcular una nueva varianza del error  $V_{error}$  que puede entonces ser usada para obtener resultados mas significativos.

El proceso de ignorar una contribución de un factor individual al ser combinada con el error, y subsecuentemente ajustar las contribuciones de los demás factores es conocido como **pooling**. (Ver anexo E).

Cuadro 12. Cuadro ANOVA para los espesores de los lados

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza (V)	F	% de Contribución
1	T. Proceso	3	14,51	4,84		38,37
2	T. Anódico	3	0,76	0,25		2,00
3	T. Catódico	3	8,42	2,81		22,28
4	V. Anódico	3	2,70	0,90		7,13
5	V. Catódico	1	8,44	8,44		22,33
6	Carga (Peso)	1	0,02	0,02		0,05
5x6	Interacción	1	2,97	2,97		7,84
Error		0	0,00	0,00		
Total		15	37,81			

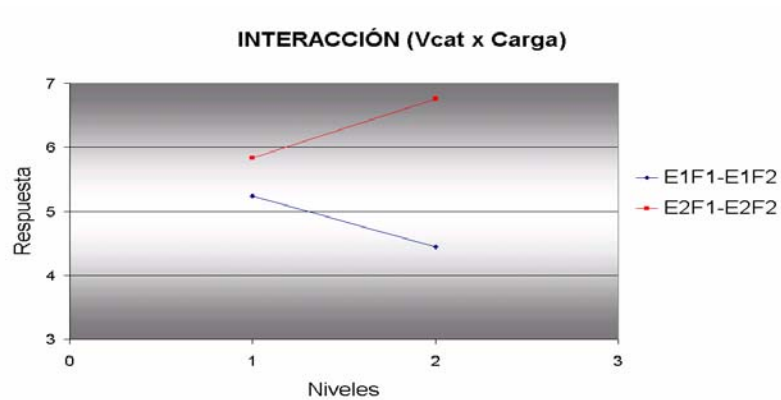
El Cuadro ANOVA muestra que el Factor carga es poco significativo en el proceso, por esta razón se aplica el concepto de *Pooling* sobre él. La varianza del error es recalculada. Tanto los efectos *pooling*, como la varianza del error son mostrados en el cuadro 13.

Cuadro 13. Cuadro Anova Pooled con un  $F_{0,05}$  (95% de confianza)

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	S. Cuadrados Puros ( S' )	% de contribución
1	T. Proceso	3	14,51	4,84	9,75	13,02	34,44
2	T. Anódico	"3"	0,76	Pooled			
3	T. Catódico	3	8,42	2,81	5,66	6,94	18,34
4	V. Anódico	"3"	2,70	Pooled			
5	V. Catódico	1	8,44	8,44	17	7,95	21,01
6	Carga	"1"	0,02	Pooled			
5x6	Interacción	1	2,97	2,97	5,98	2,47	6,53
Error		7	3,47	0,50			
Total		15	37,81				

El estadístico F es una medida de significancia de investigación, con respecto a la varianza de todos los factores, incluyendo la varianza del error. Los valores de F obtenidos en el análisis del cuadro 12 son comparados con valores de tablas estándar de F, con un nivel dado de significancia estadística. Si los valores de F de los factores son menores que los valores de las tablas estándar se aplica de nuevo sobre ellos el concepto de *pooling*, recalculando la varianza del error y en consecuencia los estadístico F, para compararlos nuevamente con las tablas estándar. Este procedimiento se repite hasta encontrar factores con estadísticos F mayores que los de las tablas estándar. Las tablas estándar de F se muestran en el anexo E.

Como se observa en el Cuadro 13, los factores Tiempo Anódico, Voltaje Anódico y Carga presentaron un estadístico F menor que los valores estándar de la tabla F con un 95 % de confianza; mientras que los factores: Tiempo de proceso, Tiempo catódico, y Voltaje catódico tienen un efecto significativo en la ejecución del proceso con porcentajes de 34.44%, 18.34, y 21.01 % respectivamente. También se observa que la interacción entre el voltaje catódico y la carga es significativa en un 6,5%. Dado este hecho se presenta el comportamiento de la interacción en la siguiente gráfica.



**Figura 7.** Análisis de interacción (Vcat x Carga), en los espesores de los lados

La grafica anterior determina que el punto E<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (V<sub>cat2</sub> x Carga<sub>2</sub>) corresponde a la combinación en donde el valor de la respuesta es mayor, influenciada por la interacción. La selección de los niveles de la interacción se realiza con base en el criterio de calidad escogido: “el mayor es el mejor”.

**Valor Óptimo:** para calcular el valor óptimo de la variable de respuesta se recurre a la siguiente expresión mostrada en el anexo E

$$Y_{opt} = \bar{T} + (\bar{A}_i - \bar{T}) + (\bar{B}_i - \bar{T}) + (\bar{C}_i - \bar{T}) + \dots (\bar{Z}_i - \bar{T}) \quad (4)$$

Donde;

- $\bar{T}$  = Promedio de todos los resultados experimentales
- $\bar{A}_i$  = Promedio de los experimentos en el nivel i del factor A
- $\bar{B}_i$  = Promedio de los experimentos en el nivel i del factor B
- $\bar{C}_i$  = Promedio de los experimentos en el nivel i del factor C
- $\bar{Z}_i$  = Promedio de los experimentos en el nivel i del factor Z
- i= 1,2,3 o 4 según corresponda a la selección de los niveles de cada factor

A, B, C...Z = Factores o interacciones relevantes

El valor óptimo se calcula teniendo en cuenta sólo los factores relevantes encontrados estadísticamente en el Cuadro 13. La combinación de los niveles de estos factores son seleccionados con el criterio de característica de calidad “el más grande es el mejor” mostrados en el Cuadro 11 los cuales corresponden a:

Cuadro 14. Factores Relevantes en el espesor de los lados

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de Proceso A	2	80 min
Tiempo Catódico C	2	960 ms
Voltaje Catódico E	2	12 V
Interacción $E_2F_2$	2	---

Para disminuir costos de producción se escogió el nivel 2 (80 minutos), y no el nivel 3 que corresponde a 90 minutos, tiempo de proceso utilizado para la técnica corriente directa.

Según los valores de las variables;  $T_{Prom}$ : 5,57  $\mu\text{m}$ ,  $A_{2 Prom}$ : 5,54  $\mu\text{m}$ ,  $C_{2 Prom}$ : 6,74  $\mu\text{m}$ ,  $E_{2 Prom}$ : 6,30  $\mu\text{m}$ ,  $E_2F_2 Prom$ : 6,76  $\mu\text{m}$ , y la ecuación (4) el óptimo para el espesor de los lados sobre zamack corresponde a:  $Y_{opt}$ : 8,62 micras, este valor teórico equivale a la mitad del espesor promedio en los lados obtenido con corriente directa: 16,49 micras.

### **Factores influyentes en el porcentaje de sobre espesor en los bordes**

**Niveles de Importancia:** los cálculos para encontrar el promedio de la respuesta en los niveles de cada factor son presentados en el anexo L. En el cuadro 15 se consignan los resultados.

Cuadro 15. Cuadro de Nivel. Promedio de la respuesta en Porcentajes en los niveles de cada factor

<b>Factor</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>	<b>Nivel 4</b>
Tiempo de Proceso	60	73	54	62
Tiempo Anódico	56	67	70	56
Tiempo Catódico	63	65	59	62
Voltaje Anódico	71	65	67	47
Voltaje Catódico	60	54	0	0
Carga (Peso)	61	64	0	0
Interacción	56	58	0	0

**Factores relevantes:** en el cuadro 16 se muestra el análisis de varianza ANOVA para el porcentaje de sobre espesor en los bordes

Cuadro 16. Cuadro ANOVA. %Sobre espesor en los bordes

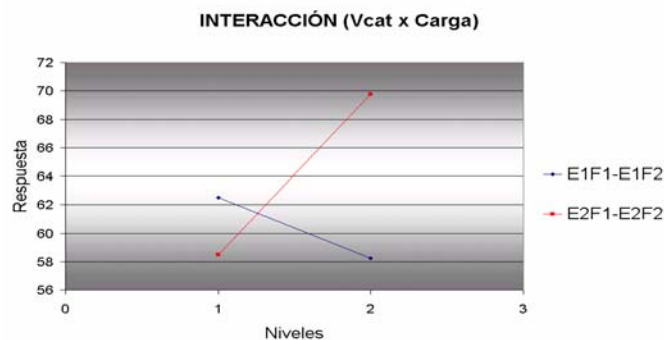
<b>Columna</b>	<b>Factor</b>	<b>DOF</b>	<b>S. Cuadrados</b>	<b>Varianza</b>	<b>F</b>	<b>% de Contribución</b>
1	T. Proceso	3	766	255,33		24,26
2	T. Anódico	3	618,5	206,17		19,59
3	T. Catódico	3	78,5	26,17		2,49
4	V. Anódico	3	1348,5	449,50		42,71
5	V. Catódico	1	56,25	56,25		1,78
6	Carga (Peso)	1	49	49,00		1,55
5x6	Interacción	1	240,25	240,25		7,61
Error		0	0			
Total		15	3157			

Según el Cuadro 16, en los factores Tiempo catódico, Voltaje Catódico y Carga debe aplicarse el concepto de pooling, como se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Cuadro Anova Pooled con un  $F_{0,05}$  (95% de confianza)

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	S. Cuadrados Puros ( S' )	% de contribución
1	T. Proceso	3	766	255,33	6,95	655,75	20,77
2	T. Anódico	3	618,5	206,17	5,61	508,25	16,10
3	T. Catódico	"3"	78,5	Pooled			
4	V. Anódico	3	1348,5	449,50	12,23	1238,25	39,22
5	V. Catódico	"1"	56,25	Pooled			
6	Carga	"1"	49	Pooled			
5x6	Interacción	1	240,25	240,25	6,54	203,5	6,45
Error		5	183,75	36,75			
Total		15	3157				

Como se observa en el Cuadro 17, los factores más relevantes en el porcentaje de sobre espesor son Tiempo de Proceso, Tiempo Anódico, Voltaje Anódico, e Interacción entre el Voltaje Catódico y la carga; cada uno con una influencia de 20.77%, 16.10%, 39.22%, 6.45% respectivamente. En la figura 9, se observa el comportamiento de la interacción entre el Voltaje catódico y la Carga, en los sobre espesores de los bordes, el punto  $E_1F_2$  ( $V_{cat1} \times Carga_2$ ) muestra la combinación donde el valor de la respuesta es menor, favoreciendo la característica de calidad: “el menor es el mejor”.



**Figura 8.** Análisis de interacción ( $V_{cat} \times Carga$ ) en el %sobre espesor de los bordes

**Valor Óptimo:** La combinación de niveles en los factores con efectos importantes son seleccionados en el cuadro 15 de niveles, aplicando el

criterio de característica de calidad “el menor es el mejor”, estas condiciones se muestran a continuación:

Cuadro 18. Factores Relevantes de sobre espesor de los bordes

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de Proceso A	2	73 %
Tiempo Anódico B	1	56 %
Voltaje Anódico D	4	47%
Interacción E <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	2	58%

Con base en la ecuación (4) y los factores relevantes del Cuadro 17, el valor óptimo del %sobre espesor en los bordes es:  $Y_{opt} = 48\%$

El valor Obtenido ( $Y_{opt}$ ) corresponde al porcentaje de sobre espesor de los bordes en Zamack, que son menores en comparación con los valores obtenidos con corriente directa (valores que oscilan entre el 62%)

**Criterio de Evaluación Promedio (OEC):** para combinar todos los resultados anteriores de las dos variables de respuesta en un solo criterio de evaluación, se procede a calcular un solo número cuantificado, el OEC, como se muestra en la ecuación (5) (Criterio de Evaluación Promedio) definido en el anexo E.

$$OEC = \left( \frac{y_1}{y_{1max}} \right) W_1 + \left( \frac{y_2}{y_{2max}} \right) W_2 + \dots \quad (5)$$

Donde,

$y_1, y_2$  = Valores experimentales de las variables de respuesta.

$y_1$  = espesor de los lados

$y_2$  = 1 / % de sobre espesor en los bordes

$W_1, W_2$  = Porcentajes de Influencia sobre el proceso.

$Y_{1max}, Y_{2max}$  = Valores máximos esperados de las variables de respuesta.

En este caso se consideran las dos respuestas igualmente importantes, es decir, un valor de 50% de importancia ( $W_1 = W_2 = 0,5$ ). El cuadro 19 muestra los valores de OEC.

Los cálculos para encontrar el promedio de los valores de OEC en los niveles de cada factor son presentados en el anexo M. En el cuadro 20 se consignan los resultados.

Cuadro 19. Valores de OEC

Probeta	Espesor (y1)	% Sobrespesor	1 /% Sobrespesor (y2)	OEC
1	3,16	63	0,02	0,39
2	3,94	66	0,02	0,42
3	4,23	65	0,02	0,44
4	4,83	45	0,02	0,57
5	7,63	83	0,01	0,59
6	4,64	59	0,02	0,49
7	5,13	85	0,01	0,45
8	4,75	66	0,02	0,47
9	4,24	26	0,04	0,74
10	6,37	64	0,02	0,57
11	6,85	72	0,01	0,57
12	8,71	55	0,02	0,74
13	5,74	55	0,02	0,57
14	7,74	79	0,01	0,61
15	6,68	57	0,02	0,61
16	4,47	56	0,02	0,49

Cuadro 20. Promedio en los niveles de cada factor

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Tiempo de Proceso	0,45	<b>0,50</b>	0,66	0,57
Tiempo Anódico	0,57	0,52	0,52	<b>0,57</b>
Tiempo Catódico	0,48	<b>0,59</b>	0,57	0,54
Voltaje Anódico	0,55	0,51	0,52	<b>0,60</b>
Voltaje Catódico	0,52	<b>0,57</b>	0,00	0,00
Carga (Peso)	0,53	<b>0,56</b>	0,00	0,00
Interacción (VcatxPeso)	0,55	0,54	0,00	0,00

Con el anterior cuadro se escogen los niveles de cada factor que favorecen al proceso, las condiciones óptimas serán aquellas en donde los promedios mostrados en el Cuadro 18 sean mayores. Al escoger el nivel 2 del tiempo de proceso se tuvo en cuenta las recomendaciones de los técnicos de la empresa para la disminución de este factor, además, en las mediciones de espesores se encontró que con el nivel 2 (80 minutos) el recubrimiento presenta buenos espesores.

**Condiciones óptimas:** en el Cuadro 21 se consignan las mejores condiciones de operación encontradas.

Cuadro 21. Condiciones óptimas para Zamack

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de proceso	2	<b>80 min</b>
Tiempo anódico	1	<b>150 ms</b>
Tiempo catódico	2	<b>960 ms</b>
Voltaje anódico	4	<b>- 3.8 V</b>
Voltaje catódico	2	<b>12 V</b>
Carga (Peso)	2	<b>28 Kg</b>

### 3.2 MATERIAL LÁMINA DE ACERO

Los datos recolectados de espesores en los lados y sobre espesores en los bordes sobre lámina de acero se muestran en el cuadro 22.

Para el análisis estadístico del material lámina de acero, se realiza el mismo procedimiento aplicado en el Zamack: la selección de factores influyentes, la escogencia de los niveles de importancia, el valor óptimo de los espesores de los lados y en los porcentajes de sobre espesor en los bordes. El análisis completo se está consignado en el anexo N. Los resultados obtenidos se encuentran en el siguiente cuadro.

Cuadro 22. Resultados de espesores y sobre espesores en los lados y en el borde del material Lamina de acero

Ensayo	Lados		Bordes		% de Sobre Espesor
	Media	Desv. Estandar	Media	Desv. Estandar	
1	3,05 +/- 0,23	0,34	4,74 +/- 0,22	0,36	56
2	4,19 +/- 0,30	0,81	5,40 +/- 0,21	0,29	29
3	3,26 +/- 0,13	0,34	5,20 +/- 0,17	0,16	60
4	5,17 +/- 0,36	1,03	10,50 +/- 0,22	0,30	103
5	5,48 +/- 0,32	0,68	10,82 +/- 0,33	0,46	97
6	4,06 +/- 0,17	0,38	9,58 +/- 0,32	0,45	136
7	5,14 +/- 0,15	0,34	11,66 +/- 0,58	0,81	127
8	5,03 +/- 0,12	0,37	10,96 +/- 0,41	0,64	118

Cuadro 23. Condiciones óptimas para lámina de acero

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de proceso	1	<b>60 min</b>
Tiempo anódico	1	<b>180 ms</b>
Tiempo catódico	1	<b>1200 ms</b>
Voltaje anódico	2	<b>- 3.9 V</b>
Voltaje catódico	2	<b>12 V</b>

### 3.3 CORRIDA PARA VALIDACIÓN DE LOS ÓPTIMOS

**3.3.1 Zamack y Lámina de acero.** Las siguientes figuras muestran las diferencias de espesores y sobre espesores experimentales de las técnicas PRC y DC en estos dos materiales.

### COMPARACIÓN DE ESPEORES EN ZAMACK

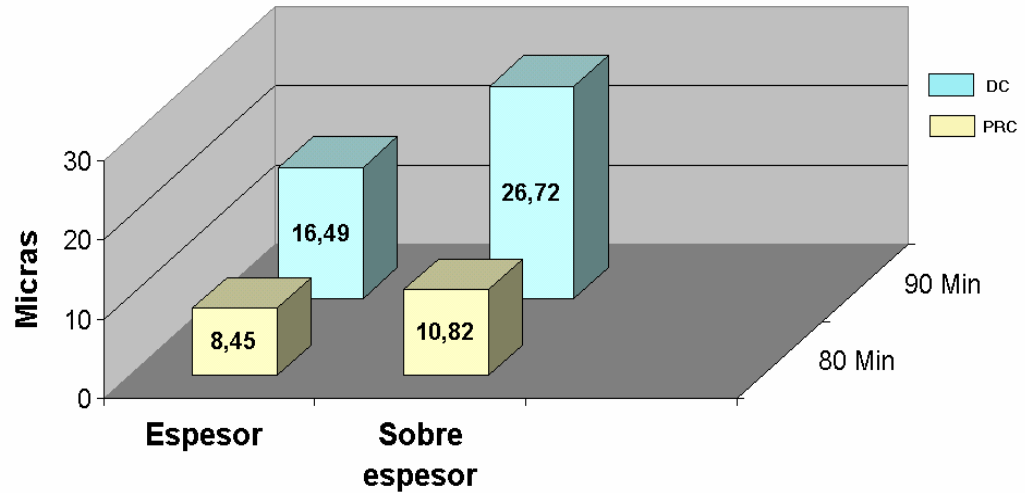


Figura 9. Diferencia de espesores en Zamack.

### COMPARACIÓN DE ESPEORES EN LAMINA DE ACERO

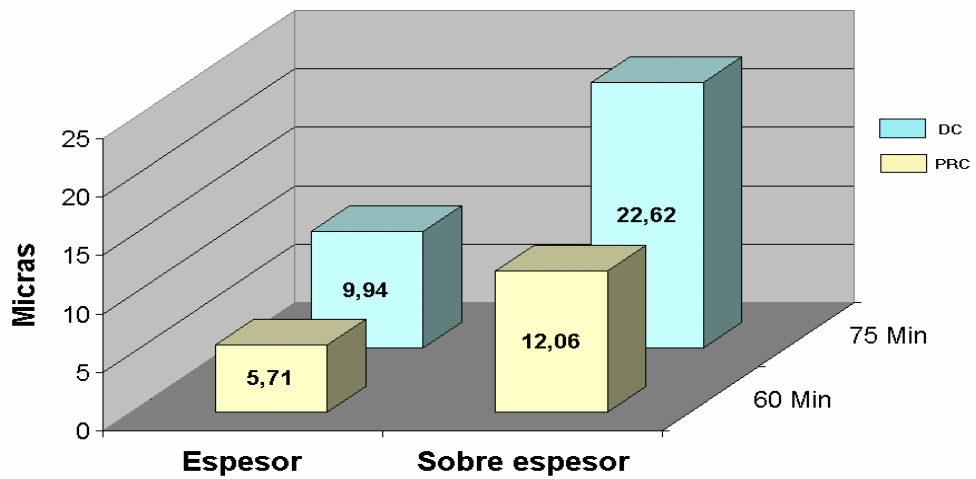


Figura 10. Diferencias en espesores en Lámina de acero.

Las probetas de cobre con corriente pulsante inversa pasaron el control de calidad, tienen menor espesor y sobre espesor como se muestra en la figura anterior, estos resultados finales confirman la disminución en el costo de producción por el menor consumo de materia prima (cobre) y menor tiempo de proceso.

## CONCLUSIONES

- Con la implementación de la técnica corriente pulsante Inversa PRC, en los procesos de electrodeposición de Cobre, son evidente las mejorías en los recubrimientos obtenidos, en comparación con la técnica convencional de corriente directa. La diferencia entre el grosor en los espesores de los lados y los porcentajes de sobre espesor en los bordes disminuye notablemente, ventajas observadas en los materiales de Zamack y lámina de acero, esta mejoría representa ahorros en los costos de producción por la reducción de tiempo de proceso y cobre metálico depositado en exceso.
- El análisis estadístico del método Taguchi muestra que los factores que disminuyen el porcentaje de sobre espesor en los bordes corresponden al tiempo anódico, voltaje anódico y tiempo catódico, variables no modificables con la técnica convencional de corriente directa, por tal motivo, la implementación de las técnica que utiliza ondas de corriente pulsante inversa mejoran la calidad de los recubrimientos de cobre, debido a la posibilidad de manipular dichas variables.
- En la optimización del nuevo proceso, aplicando el método taguchi, se lograron disminuir los tiempos de proceso en un 11.11 % para el material Zamack y 20% para lámina de acero, porcentajes que contribuyen a la reducción de costos de producción.
- Con la combinación de las condiciones óptimas de los factores relevantes, el espesor de los recubrimientos alcanzó un 50% menor que los recubrimientos con corriente directa, ahorrando así un alto porcentaje en la utilización de cobre metálico en los baños

## RECOMENDACIONES

- Para garantizar la efectividad de la técnica de Corriente Pulsante Inversa PRC en la Empresa Fantaxías Ltda., se debe aplicar un control mas riguroso en los voltajes empleados en los baños electrolíticos, pues en ocasiones las caídas de voltaje esperadas se alteran por factores ajenos al alcance de los operarios de la sección de Galvánica, como la no utilización de los equipos eléctricos de las demás secciones. Por tal motivo se recomienda ejecutar esta técnica, dentro del horario de las 8:00 am. a las 5:00 pm, periodo de tiempo donde se presenta un flujo constante de consumo eléctrico.
- Se recomienda la utilización del método Taguchi para la realización de futuros estudios en planta, ya que es un método rápido, menos costoso y tiene alta eficiencia para extraer gran cantidad de información de un experimento por medio de arreglos ortogonales y graficas lineales.

## BIBLIOGRAFÍA

GUTIÉRREZ, P. Humberto y ZALAZAR, D. Román. Análisis y diseños de experimentos. México: McGRAW HILL. 2003.

Manual de procedimiento de la sección de galvanizado, sistema de gestión de calidad de la empresa FANTAXIAS. Ltda.

MONTGOMERY, C. Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Mexico: Grupo editorial iberoamericana. S.A. 3<sup>a</sup> ed. 1991.

MORENO, Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Ediciones UIS. Bucaramanga: 1993

ORDOÑEZ, S. Técnicas experimentales en metalurgia. Metales Handbook. 1948. American society for metals, metals Park, ohio.

PHILLIP, J. Ross. Taguchi techniques for quality engineering. Second Edition. McGRAW HILL. New York. 2000.

RANJIT, K. Roy. A primer on the Taguchi method. Society of manufacturing engineers. Michigan. 1990.

TAGUCHI, Genichi. System experimental of desing. New York 1987.

ROZO, Diana. Obtención de electro recubrimientos de cobre, latón y níquel mediante la técnica de corriente pulsante inversa. Ing. Química Bucaramanga 2006

# **ANEXOS**

## Anexo A. PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS A RECUBRIR

### Tratamiento para piezas de Zamack:

**1. Pulido Manual y Mecánico.** En esta etapa inicial del proceso se debe eliminar asperezas, bordes agudos y filos de las piezas a recubrir, para disminuir la aparición de capas con sobre espesor. Se puede llevar a cabo de forma manual con lijas y esmeril y de forma mecánica con vibradoras o Harper como se muestra a continuación:

Figura A.1 Máquina Harper



**2. Ultrasonido.** El ultrasonido es utilizado para piezas de Zamack. En esta fase se inicia la limpieza de las piezas pues debido a la manipulación previa se han unido a la superficie del material capas de grasa que impiden que el depósito de metal sobre el material base se adhiera se conforme a lo estimado y la calidad del recubrimiento disminuya. Tiempo después el recubrimiento se desliga de la pieza aún cuando la película de grasa haya sido delgada. Las grasas son la parte mas expuesta de todas las impurezas que aniden sobre el material a recubrir. La solución acuosa del desengrase ultrasonido contiene un producto tensoactivo. La inmersión de la mercancía

en este desengrase es de aproximadamente 2 minutos. El equipo para este desengrase se muestra en la figura A.2.

Figura A.2 Equipo para Desengrase con Ultrasonido



**3. Desengrase.** Este es un desengrase electrolítico es una solución alcalina para eliminar el resto de impurezas que se han adherido a la superficie de las piezas. A mayor tensión aplicada al baño se genera mayor liberación de gases que ayudan a la limpieza de forma exclusivamente mecánica. Este proceso dura alrededor de 2 a 3 minutos

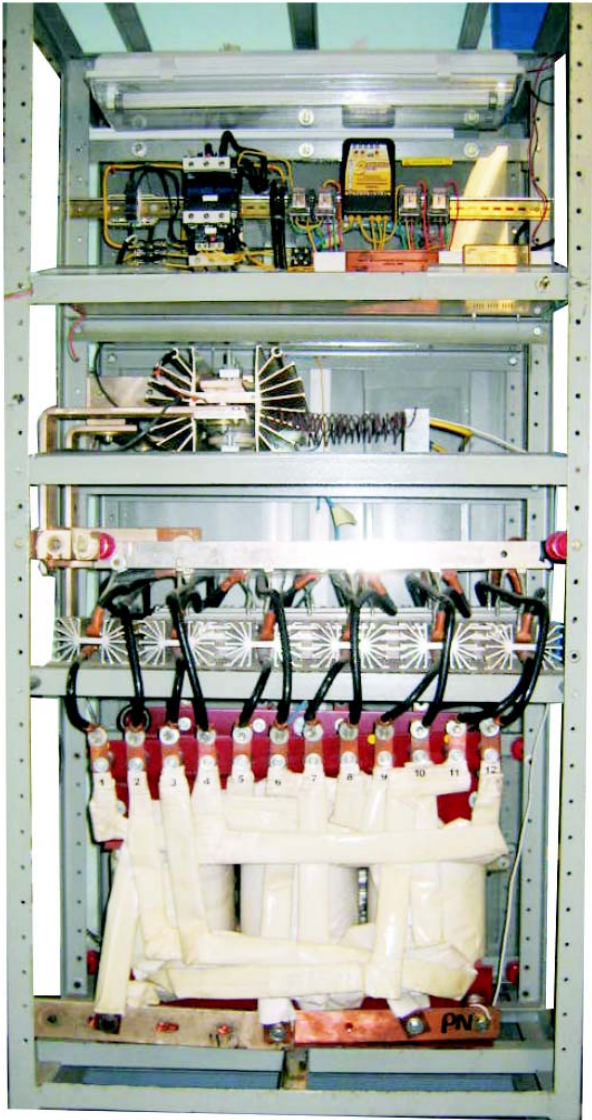
**4. Decapado.** En esta operación las piezas son puestas en contacto con soluciones acuosas de ácido sulfúrico para el ataque químico a las diferentes capas de óxidos que se han formado sobre la superficie por efecto del contacto con el ambiente.

**Tratamiento para de piezas de lámina de acero:** La preparación de estas piezas es similar a la preparación del material zamack. Las láminas de acero no son sometidas al desengrase ultrasonido, en vez de éste, el desengrase se realiza por inmersión estática en una solución de con agentes teso activos durante 30 minutos, posteriormente pasan al desengrase electrolítico que se extiende por 10 minutos. El resto del proceso se lleva a cabo de igual manera.

- 1. Pulido Manual y Mecánico**
- 2. Desengrase por inmersión**
- 3. Desengrase Electrolítico**
- 4. Decapado**

**Anexo B. EQUIPO RECTIFICADOR DE CORRIENTE PULSANTE INVERSA (PRC) UTILIZADO POR LA EMPRESA FANTAXÍAS LTDA.**

Figura B1. Rectificador PRC



## Anexo C. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS

**1. Espesor.** La cantidad de masa depositada sobre el material base debe ser lo mas uniforme posible con superficies lisas que garanticen la calidad de posteriores recubrimientos metálicos. A lo largo de toda la pieza el espesor no el mismo, se presentan mayores concentraciones el los bordes, la medida del espesor es una valor promedio entre todas las zonas de la pieza.

**2. Sobre espesor.** Medida del exceso depositado sobre los bordes de la pieza. Esta característica se desea minimizar.

**3. Rugosidad.** Los productos de la empresa Fantaxías Ltda., requieren que la rugosidad sea mínima para dar mejor aspecto a los recubrimientos finales, aumentar el brillo y disminuir la fricción de las piezas para contrarrestar el desgaste.

**4. Adherencia.** Los recubrimientos metálicos presentan fuerzas atómicas que permiten la unión de diferentes capas metálicas al material base. <sup>5</sup>En los recubrimientos galvánicos se ha observado la aparición de aleaciones en los planos de contacto de ambos metales, originando una íntima relación entre la estructura del metal base y la capa de recubrimiento”.

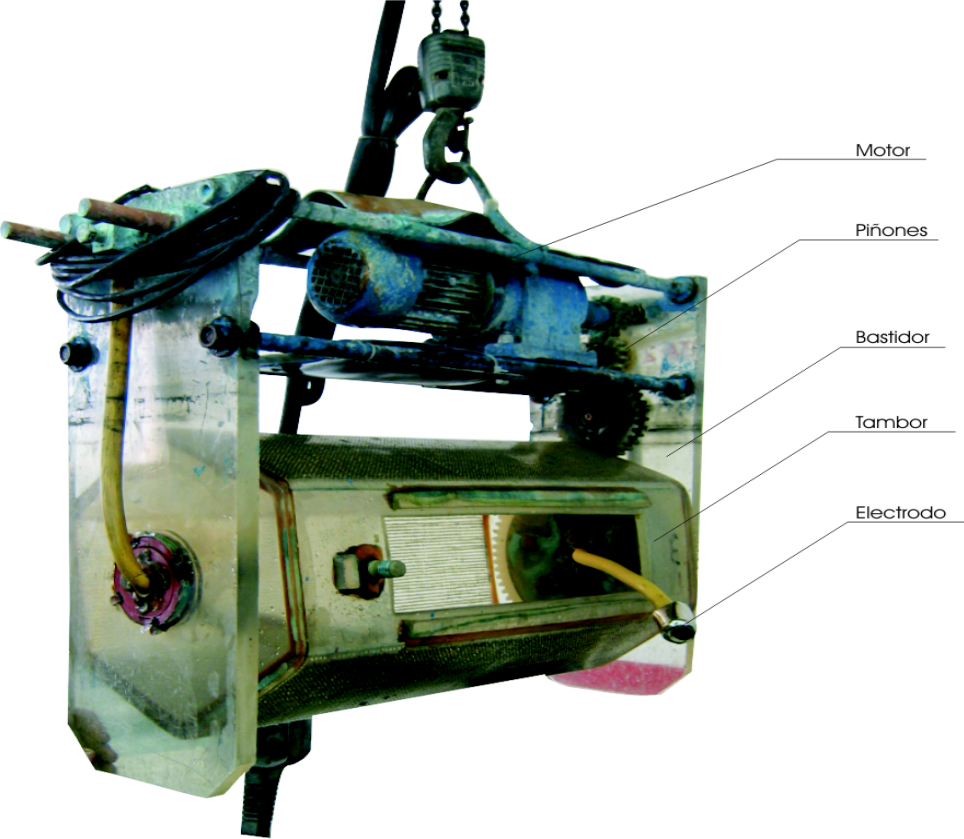
También es importante al evaluar la calidad de un recubrimiento tener en cuenta su brillo, presencia de Burbujas superficiales, manchas, puntos quemados, etc.

---

<sup>5</sup> Fuente: Estudio del efecto de la corriente pulsante inversa sobre las propiedades de recubrimientos multicapas de cobre / níquel, y cobre / latón, electrodepositados sobre substratos de zamac.

**Anexo D. TAMBORES ROTATORIOS UTILIZADOS EN LA SECCIÓN DE GÁLVANICA DE LA EMPRESA FANTAXÍAS Ltda.**

Figura D1. Tambor rotatorio utilizado para la investigación



## Anexo E. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS

**Media:** cociente entre la sumatoria de los valores de los elementos y el número total de ellos.

$$Media(X) = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} \quad (E.1)$$

**Varianza:** relación entre la suma de los cuadrados de las desviaciones de las respuestas respecto a la media aritmética de la distribución, y el tamaño n de la población de datos.

$$\sigma^2_x = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - Media(X))^2}{n} \quad (E.2)$$

**Desviación Estándar:** es la medida de la variabilidad que indica la dispersión promedio de los valores de una variable con respecto a la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (E.3)$$

**MSD:** es una cantidad estadística que refleja la desviación del valor objetivo. Las expresiones para el MSD son diferentes para cada característica de calidad

**Relación entre el MSD y la característica de calidad.** La desviación del cuadrado medio con respecto al valor objetivo (MSD) se define según característica de calidad seleccionada.

- Mayor es mejor :

$$MSD = \frac{\left( \frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right)}{n} \quad (\text{E.4})$$

- Nominal es mejor :

$$MSD = \frac{\left[ (Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2 \right]}{n} \quad (\text{E.5})$$

- Menor es mejor :

$$MSD = (Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2) \quad (\text{E.6})$$

**Criterio Total de Evaluación:** cuando en un proceso se tienen más de una variable de respuesta se combinan sus contribuciones en un criterio total de evaluación, teniendo en cuenta que tan representativa es dentro del proceso mismo.

$$OEC = \left( \frac{y_1}{y_{1\max}} \right) W_1 + \left( \frac{y_2}{y_{2\max}} \right) W_2 + \dots \quad (\text{E.7})$$

Donde,

$y_1$  = Variable de Respuesta 1

$y_{1\max}$  = Valor máximo esperado para la Variable de Respuesta 1

$W_1$  = Porcentaje de contribución de la Variable al proceso.

$y_2$  = Variable de Respuesta 2

$y_{2\max}$  = Valor máximo esperado para la Variable de Respuesta 2

$W_2$  = Porcentaje de contribución de la Variable al proceso.

**Análisis de Varianza: ANOVA.** El ANOVA es un instrumento para evaluar las variaciones de los hechos, permiten interpretar mejor las causas de los

fenómenos y los efectos de los factores involucrados, hace posible estimar las varianzas con mayor exactitud. Es una herramienta estadística que distribuye la variabilidad de un proceso a diferentes componentes que intervienen en el mismo, esto con el fin de interpretar mejor la contribución de cada componente independiente sobre la dispersión de los resultados. Cuando un ensayo es desarrollado por diferentes analistas y métodos se utiliza para determinar las diferencias de las medidas de tendencia central en los resultados obtenidos. El objetivo del análisis de varianza es probar la hipótesis de igualdad de las respuestas medias.

$$\begin{aligned}
 H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots \tau_k = 0 \\
 H_A : \tau_i \neq 0 \quad \text{para algún } i
 \end{aligned}
 \tag{E.8}$$

$\tau_i$  es el efecto del tratamiento  $i$  sobre la variable de respuesta. <sup>6</sup>Si se acepta  $H_0$ , se confirma que los efectos sobre la respuesta de los  $k$  tratamientos son estadísticamente nulos y en caso de rechazar se estaría concluyendo que al menos un efecto es diferente de cero. Es decir si la Hipótesis nula  $H_0$  es verdadera el cambio en los niveles del factor no tiene efecto sobre la respuesta promedio.

Para probar las hipótesis mediante la técnica de ANOVA con un criterio de clasificación, lo primero es descomponer la variabilidad total de los datos en sus dos componentes: la variabilidad debida a tratamientos y debida al error aleatorio. Una medida de la variabilidad total presente en las observaciones es la **suma total de cuadrados  $SS_T$** .

$$SC_T = SC_{TRAT} + SC_{ERROR} \tag{E.9}$$

---

<sup>6</sup> Fuente: Análisis y Diseño de Experimentos, Humberto Gutierrez Pulido y Román de la Vara Salazar.

Si se divide las sumas de los cuadrados de cada factor por sus grados de libertad respectivos, se obtiene una nueva cantidad con todas las características de una varianza, denominada cuadrados medios, que se denota: Varianza.

**Grados de libertad:** los grados de libertad son una medida de la cantidad de información que puede obtenerse. Para los factores los grados de libertad es igual al número de niveles menos 1, para las interacciones es igual al producto de los grados de libertad de los factores que intervienen, y para la matriz ortogonal es igual al número de experimentos menos 1.

**Estadístico F:** es usado como una medida de significancia de un factor bajo observación, esta dado por el cociente entre la varianza de cada factor y el error se denomina **Razón F**. Esta relación permite evaluar que tan importante es cada factor al ubicar la varianza de los datos con respecto a la curva normal estándar. El valor F obtenido en el análisis es comparado con los valores de F en tablas estándar para un determinado nivel de significancia estadístico. Los factores con razón F mayor que los proporcionados por la tabla F son los de mayor relevancia. En la tabla E.1 se muestra la tabla estándar del estadístico F utilizado en los cálculos estadísticos.

$$F_0 = \left( \frac{V_{factor}}{V_{ERROR}} \right) \quad (E.10)$$

**Pooling:** el pooling es un proceso que selecciona un factor de pequeña contribución para combinarlo con el error y volver ajustar las contribuciones de los demás factores.

Un camino seguro para determinar si el efecto de un factor o interacción podría ser pooled es mediante un test de significancia, generalmente el nivel

de confianza del test está entre el 90 y 95%. Por ejemplo el factor tiempo de proceso en el espesor de los lados del Zamack, tiene 3 grados de libertad debido a sus cuatro niveles, el error tiene 7 grados de libertad debido su combinación con los factores: carga, tiempo anódico y voltaje anódico. Para el ejemplo localizamos el estadístico F de la tabla E.1 en el cruce entre los grados de libertad del numerador (factor tiempo de proceso) y los grados de libertad del denominador (error), como se muestra a continuación:

Tabla E.1 Estadístico F

Table F<sub>05</sub>(f<sub>1</sub>,f<sub>2</sub>), 95% Confidence

f<sub>1</sub> = Number of degrees of freedom of numerator  
f<sub>2</sub> = Number of degrees of freedom of denominator

f <sub>1</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.09	251.14	252.20	253.25	254.32
2	18.513	19.000	19.614	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396	19.413	19.429	19.446	19.454	19.462	19.471	19.479	19.487	19.496
3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8868	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5265
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3883	6.2560	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6878	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3984	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2830	4.2066	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6688
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5108	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8378	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2840	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8626	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6021	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2230	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4035	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3808	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9796	1.9302	1.8780
20	4.3513	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3661	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8895	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8649	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4026	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7897	1.7331
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9751	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7307	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2782	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6377
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0848	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2540	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3993
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2900	2.1750	2.0867	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

**Suma pura de Cuadrados:** medida de la varianza de un tratamiento en conjunto con la varianza debida al error.

$$S'_i = S_i - (V_e * f_i) \quad (\text{E.11})$$

**Porcentajes de contribución:** medida de la contribución porcentual de cada factor a la variabilidad total 100%. Es el porcentaje de la suma pura de cuadrados con respecto a la suma de cuadrados total

$$P(\%) = \left( \frac{S'}{SS_T} \right) * 100 \quad (\text{E.12})$$

## Anexo F. ARREGLOS ORTOGONALES

Para referirse a un arreglo ortogonal se utiliza la notación **L<sub>a</sub> (b<sup>c</sup>)**, en donde **a** indica el número de experimentos (filas), **b** los niveles de cada Factor y **c** el número de factores (columnas).

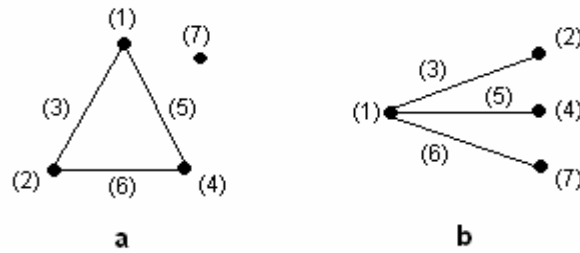
Por ejemplo,  $L_8(2^7)$  representa un AO en el que se analizan 7 factores de 2 niveles cada uno, con un total de 8 experimentos como se observa en la figura D.1.

Los arreglos ortogonales estándar de Taguchi permiten evaluar por separado el efecto de cada una de las variables que intervienen en el proceso sin necesidad de realizar la totalidad de los ensayos que requerirían las combinaciones posibles entre niveles. Con los arreglos ortogonales el investigador puede hallar las mejores condiciones de operación de cada factor para el proceso aún cuando experimentalmente estas combinaciones no hayan sido probadas.

La respuesta de los procesos puede ser influenciada por el efecto combinado de dos o más factores que intervienen en la característica de calidad evaluada. Estas interacciones deben ser ubicadas en los arreglos ortogonales y reciben igual tratamiento estadístico que los demás factores.

**Uso de las gráficas Lineales.** Los Factores se asignan a los puntos de las gráficas, en tanto que la línea que une un par de puntos es la interacción entre estos dos. Como se puede ver en la figura G.1, en un arreglo ortogonal  $L_8$  interacción entre los factores 1 y 2 se ubicara en la columna 3 del arreglo.

**Figura F.1.** Gráfica Lineal para una arreglo Ortonal  $L_8$ .



**Como usar los Diagramas triangulares.** Las Diagramas triangulares al igual que las gráficas lineales dan la posición de las interacciones dentro del arreglo Ortogonal.

Así por ejemplo para el Arreglo Ortogonal  $L_8$  diagrama triangular para un será:

**Cuadro F.1** Diagrama Triangular - Arreglo Ortogonal  $L_8$

Columna	1	2	3	4	5	6	7
(1)	3	2	5	4	7	6	
(2)		1	6	7	4	5	
(3)			7	6	5	4	
(4)				1	2	3	
(5)					3	2	
(6)						1	
(7)							1

La ubicación de una interacción entre los factores 2 y 6 del arreglo  $L_8$  ( $2^7$ ), tendrá lugar en la columna número 4 del arreglo. La diagonal de números entre paréntesis indica los factores principales del OA; para el ejemplo localizamos el cruce entre los factores 2 y 6 uniendo la línea horizontal y vertical respectivamente.

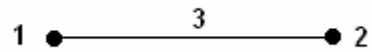
## Algunos Arreglos

### Ortogonales:

Cuadro F.2  $L_4 (2^3)$

Factor	1	2	3
Exp.			
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

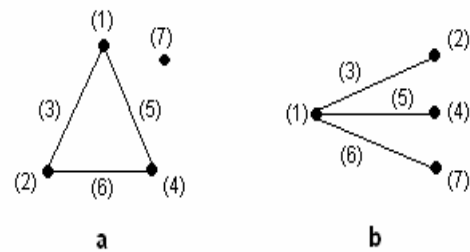
Figura F.2 Gráfica lineal  $L_4 (2^3)$



Cuadro F.3  $L_8 (2^7)$

Factor	1	2	3	4	5	6	7
Exp.							
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

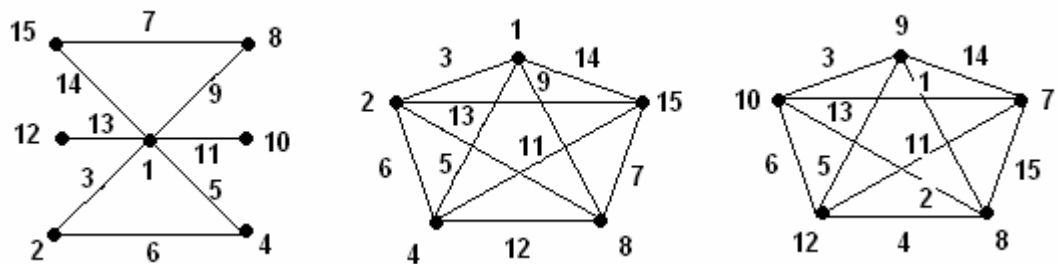
Figura F.3 Graficas lineales  $L_8 (2^7)$



Cuadro F.4  $L_{16} (2^{15})$

Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Exp.															
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Figura F.4 Graficas lineales  $L_{16} (2^{15})$



## **Anexo G. MODIFICACIÓN DE UN ARREGLO ORTOGONAL $L_{16}(2^7)$ ESTÁNDAR A UN $L_{16}(4^4 \times 3^2)$**

La modificación de este arreglo ortogonal estándar es debido a que algunos factores son muy importantes como para tomar solamente dos valores. Un factor columna de dos niveles puede ascender a tres niveles o cuatro niveles, antes de la modificación hay que recalcar acerca de los grados de libertad (DOF), para una columna de dos niveles tiene 1 DOF, una de tres niveles 2 DOF y una de cuatro niveles 3 DOF.

Así para crear una columna de cuatro niveles son necesarias combinar tres columnas de dos niveles para proporcionar los mismos grados de libertad. Para la preparación de las cuatro columnas de cuatro niveles a partir de quince columnas de dos niveles se realiza los siguientes pasos.

- Para una grafica lineal de L16 seleccionar tres columnas de interacción para cada factor columna de cuatro niveles.
- Para cada grupo de tres columnas seleccionar dos columnas y combinarlas fila por fila como se muestra en la siguiente tabla, ignorando la tercera columna.

Cuadro G.1. Combinación de Columnas

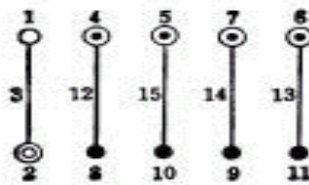
<b>Niveles de la primera columna</b>	<b>Niveles de la segunda columna</b>	<b>Niveles de la nueva columna</b>
1	1	1
1	2	2
2	1	3
2	2	4

Las otras columnas restantes no son modificadas. El arreglo ortogonal estándar y su gráfica lineal se muestran a continuación:

Cuadro G.2. ARREGLO ORTOGONAL ESTÁNDAR L16 ( $2^7$ )

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Figura G.1 Gráfica lineal L16 ( $2^7$ )



Con cuatro de estas interacciones se puede modificar el arreglo ortogonal obteniendo un  $L_{16}(4^4 \times 3^2)$ .

En el Cuadro G.3 se muestra el procedimiento completo de la combinación de columnas para obtener el arreglo modificado.

Cuadro G.3 Columnas modificadas

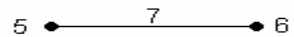
1	2	Nueva (1)	4	8	Nueva (2)	5	10	Nueva (3)	7	9	Nueva (4)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2
1	1	1	2	1	3	2	1	3	2	1	3
1	1	1	2	2	4	2	2	4	2	2	4
1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	3
1	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	4
1	2	2	2	1	3	2	2	4	1	1	1
1	2	2	2	2	4	2	1	3	1	2	2
2	1	3	1	1	1	2	1	3	2	2	4
2	1	3	1	2	2	2	2	4	2	1	3
2	1	3	2	1	3	1	1	1	1	2	2
2	1	3	2	2	4	1	2	2	1	1	1
2	2	4	1	1	1	2	2	4	1	2	2
2	2	4	1	2	2	2	1	3	1	1	1
2	2	4	2	1	3	1	2	2	2	2	4
2	2	4	2	2	4	1	1	1	2	1	3

En el Cuadro G.4 y la figura G.2 se muestra el arreglo ortogonal para la ejecución de los ensayos en el material Zamack.

Cuadro G.4 Arreglo ortogonal  $L_{16}(4^4 \times 3^2)$  para Zamack

<b>Factores</b> <b>Exp.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	1	1	1	1	1	1	1
<b>2</b>	1	2	2	2	1	2	2
<b>3</b>	1	3	3	3	2	1	2
<b>4</b>	1	4	4	4	2	2	1
<b>5</b>	2	1	2	3	2	2	1
<b>6</b>	2	2	1	4	2	1	2
<b>7</b>	2	3	4	1	1	2	2
<b>8</b>	2	4	3	2	1	1	1
<b>9</b>	3	1	3	4	1	2	2
<b>10</b>	3	2	4	3	1	1	1
<b>11</b>	3	3	1	2	2	2	1
<b>12</b>	3	4	2	1	2	1	2
<b>13</b>	4	1	4	2	2	1	2
<b>14</b>	4	2	3	1	2	2	1
<b>15</b>	4	3	2	4	1	1	1
<b>16</b>	4	4	1	3	1	2	2

Figura G.2 Gráfica lineal  $L_{16}(4^4 \times 3^2)$



## Anexo H. GENERALIDADES DE LAS PIEZAS A RECUBRIR

Las características químicas de los materiales Zamack y Lámina de acero se presentan en las siguientes tablas:

Cuadro H.1 Características de la Aleación Zamack

<b>MATERIAL ZAMACK</b>	
<b>Composición</b>	Aluminio 3.6%
	Cobre 3.3%
	Magnesio 0.1%
	Zinc 93%
<b>Resistencia a la tracción</b>	32 - 34 Kg/mm <sup>2</sup>
<b>Dureza Brinell</b>	95
<b>Densidad</b>	6.7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Temperatura de Fusión</b>	386° C

Cuadro H.2 Características de la Aleación Lámina de Acero.

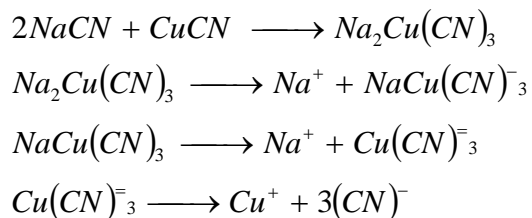
<b>MATERIAL LÁMINA DE ACERO</b>	
<b>Composición</b>	Carbono 0.42 % – 0.55 %
	Manganeso 0.60% – 0.90 %
	Fósforo 0.04 %
	Azufre 0.05 %
	Silicio 0.10% - 0.35%

## Anexo I. CARACTERÍSTICAS DEL BAÑO DE COBRE

Para los procesos de electrodeposición de Cu se puede elegir entre baños ácidos y alcalinos. Con los baños ácidos los tiempos de deposición son cortos y se obtiene espesores gruesos que generalmente poseen superficies rugosas, su rendimiento electrolítico es alto. Con los baños alcalinos-cianurados (Cu monovalente) se consiguen recubrimientos de grano fino y buena adherencia. La empresa fantaxías Ltda. para la electrodeposición del Cu utiliza baños alcalino-cianurados. Los baños se encuentran en cubas con una capacidad de 1000 l. Una típica cuba de los baños de Cobre se muestra en la figura I.1

**Cuadro I.1.** Composición del baño alcalino-cianurado de Cu.

<b>BAÑO DE COBRE</b>	<b>Variable</b>	<b>Óptimo</b>
	<b>PH</b>	13
	<b>T(°C)</b>	38
	<b>°B</b>	20
	<b>Voltaje (V)</b>	10
	<b>CuCN<sub>2</sub>(g/L)</b>	42
	<b>NaCN (g/L)</b>	56
	<b>Rochel (g/L)</b>	45
	<b>Abrillantante (cm<sup>3</sup>/L)</b>	12
	<b>Carbonatos (g/L)</b>	25
	<b>Ánodos</b>	100% Cu
	<b>Tiempo (min)</b>	90



En la siguiente figura se muestra las cubas utilizadas para los baños de cobre

Figura I.1 Cubas utilizadas para los baños de Cobre



## **Anexo J. ANÁLISIS METALGRÁFICO PARA LA MEDICIÓN DE ESPESORES**

Para el análisis metalográfico se realizó una preparación mecánica que incluye las siguientes etapas.

- **Embutición de la muestra:** una buena resina no debe tener contracción y una resistencia a los reactivos químicos ordinarios. Se realizó una embutición en frío mezclando una resina epóxica con un endurecedor en un molde plástico, a los 15 minutos se procedió a desmoldar.
- **Desbaste:** con una lija número 150 se desbastó la parte superior del molde, hasta encontrar las probetas a analizar.
- **Prepulido y Pulido:** el prepulido y el pulido obtiene una muestra, libre de rayas y altamente especular. Para el prepulido se utilizó una lija número 180 hasta la lija 800, girando 90 grados cada cambio de lija. En el pulido se realizó sobre un paño verde de pulido microclop, utilizando una pasta alúmina con un tamaño de grano de 0.1 micras.

## Anexo K. RESULTADOS DE ESPESORES EN LOS LADOS DE LA PROBETA DE ZAMACK

### Experimentos por nivel en cada factor

Cuadro K.1. Tiempo de proceso

Tiempo de proceso				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Experimento	1	5	9	13
	2	6	10	14
	3	7	11	15
	4	8	12	16

Cuadro K.2. Tiempo de anódico

Tiempo de anódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Experimento	1	2	3	4
	5	6	7	8
	9	10	11	12
	13	14	15	16

Cuadro K.3. Tiempo de catódico

Tiempo de catódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Experimento	1	2	3	4
	6	5	8	7
	11	12	9	10
	16	15	14	13

Cuadro K.4. Voltaje anódico

Voltaje anódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Experimento	1	2	3	4
	7	8	5	6
	12	11	10	9
	14	13	16	15

Cuadro K.5. Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6
	9	11
	10	12
	15	13
	16	14

Cuadro K.6. Carga (peso)

Carga (peso)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7
	10	9
	12	11
	13	14
	15	16

Cuadro K.7. ( $V_{cat}$  x Carga)

Interacción ( $V_{cat}$ x Carga)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	5	6
	8	7
	10	9
	11	12
	14	13
	15	16

## Valores de espesores en micras de los niveles en cada factor

Cuadro K.8. Tiempo de proceso

Tiempo de proceso				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	3,16433	7,62525	4,24208	5,7445
	3,9445	4,6412	6,36813	7,73733
	4,22625	5,12867	6,84625	6,67878
	4,833	4,748	8,714	4,47105

Cuadro K.9. Tiempo de anódico

Tiempo de anódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	3,16433	3,9445	4,22625	4,833
	7,62525	4,6412	5,12867	4,748
	4,24208	6,36813	6,84625	8,714
	5,7445	7,73733	6,67878	4,47105

Cuadro K.10. Tiempo de catódico

Tiempo de catódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	3,16433	3,9445	4,22625	4,833
	4,6412	7,62525	4,748	5,12867
	6,84625	8,714	4,24208	6,36813
	4,47105	6,67878	7,73733	5,7445

Cuadro K.11. Voltaje anódico

Voltaje anódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	3,16433	3,9445	4,22625	4,833
	5,12867	4,748	7,62525	4,6412
	8,714	6,84625	6,36813	4,24208
	7,73733	5,7445	4,47105	6,67878

Cuadro K.12. Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	3,16433	4,22625
	3,9445	4,833
	5,12867	7,62525
	4,748	4,6412
	4,24208	6,84625
	6,36813	8,714
	6,67878	5,7445
	4,47105	7,73733

Cuadro K.13. Carga (peso)

Carga (peso)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	3,16433	3,9445
	4,22625	4,833
	4,6412	7,62525
	4,748	5,12867
	6,36813	4,24208
	8,714	6,84625
	5,7445	7,73733
	6,67878	4,47105

Cuadro K.14. Interacción (Vcat x Carga)

Interacción (Vcat x Carga)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	3,16433	3,9445
	4,833	4,22625
	7,62525	4,6412
	4,748	5,12867
	6,36813	4,24208
	6,84625	8,714
	7,73733	5,7445
	6,67878	4,47105

**Anexo L. RESULTADOS DEL %SOBRE ESPESORES EN LOS BORDES DE LA PROBETA DE ZAMACK**

**Experimentos por nivel en cada factor**

Cuadro L.1. Tiempo de proceso

Tiempo de proceso				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	5	9	13
	2	6	10	14
	3	7	11	15
	4	8	12	16

Cuadro L.2. Tiempo de anódico

Tiempo de anódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	5	6	7	8
	9	10	11	12
	13	14	15	16

Cuadro L.3. Tiempo catódico

Tiempo catódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	6	5	8	7
	11	12	9	10
	16	15	14	13

Cuadro L.4. Voltaje anódico

Voltaje anódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	7	8	5	6
	12	11	10	9
	14	13	16	15

Cuadro L.5. Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6
	9	11
	10	12
	15	13
	16	14

Cuadro L.6. Carga (peso)

Carga (peso)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7
	10	9
	12	11
	13	14
	15	16

Cuadro L.7. Interacción (Vcat x Carga)

Interacción (Vcat x Carga)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	5	6
	8	7
	10	9
	11	12
	14	13
	15	16

**Valores de % de Sobre espesor de los niveles en cada factor**

**Cuadro L.8. Tiempo de proceso**

Tiempo de proceso				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Resultados	63	83	26	55
	66	59	64	79
	65	85	72	57
	45	66	55	56

**Cuadro L.9. Tiempo de anódico**

Tiempo de anódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Resultados	63	66	65	45
	83	59	85	66
	26	64	72	55
	55	79	57	56

**Cuadro L.10. Tiempo de catódico**

Tiempo de catódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Resultados	63	66	65	45
	59	83	66	85
	72	55	26	64
	56	57	79	55

**Cuadro L.11. Voltaje anódico**

Voltaje anódico				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Resultados	63	66	65	45
	85	66	83	59
	55	72	64	26
	79	55	56	57

**Cuadro L.12. Voltaje catódico**

Voltaje catódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Resultados	63	65
	66	45
	85	83
	66	59
	26	72
	64	55
	57	55
	56	79

Cuadro L.13. Carga (peso)

Carga (peso)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	63	66
	65	45
	59	83
	66	85
	64	26
	55	72
	55	79
	57	56

Cuadro L.14. Interacción (Vcat x Carga)

Interacción (Vcat x Carga)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	63	66
	45	65
	83	59
	66	85
	64	26
	72	55
	79	55
	57	56

## Anexo M. RESULTADOS DE OEC EN LA PROBETA DE ZAMACK

### Experimentos por nivel en cada factor

Cuadro M.1. Tiempo de proceso

Tiempo de proceso				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	5	9	13
	2	6	10	14
	3	7	11	15
	4	8	12	16

Cuadro M.2. Tiempo de anódico

Tiempo de anódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	5	6	7	8
	9	10	11	12
	13	14	15	16

Cuadro M.3. Tiempo de catódico

Tiempo de catódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	6	5	8	7
	11	12	9	10
	16	15	14	13

Cuadro M.4. Voltaje anódico

Voltaje anódico				
Experimento	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	1	2	3	4
	7	8	5	6
	12	11	10	9
	14	13	16	15

Cuadro M.5. Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6
	9	11
	10	12
	15	13
	16	14

Cuadro M.6. Carga (peso)

Carga (peso)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7
	10	9
	12	11
	13	14
	15	16

Cuadro M.7. Interacción (Vcat x Carga)

Interacción (Vcat x Carga)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	5	6
	8	7
	10	9
	11	12
	14	13
	15	16

### Valores de OEC en los niveles de cada factor

Cuadro M.8. Tiempo de proceso

Tiempo de proceso				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	0,38791508	0,5941552	0,74340602	0,56597691
	0,42330089	0,48664608	0,56852149	0,60851668
	0,44249771	0,44721878	0,57338606	0,61129143
	0,56620126	0,46940486	0,73636364	0,48868693

Cuadro M.9. Tiempo de anódico

Tiempo de anódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	0,38791508	0,42330089	0,44249771	0,56620126
	0,5941552	0,48664608	0,44721878	0,46940486
	0,74340602	0,56852149	0,57338606	0,73636364
	0,56597691	0,60851668	0,61129143	0,48868693

Cuadro M.10. Tiempo de catódico

Tiempo de catódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	0,38791508	0,42330089	0,44249771	0,56620126
	0,48664608	0,5941552	0,46940486	0,44721878
	0,57338606	0,73636364	0,74340602	0,56852149
	0,48868693	0,61129143	0,60851668	0,56597691

Cuadro M.11. Voltaje anódico

Voltaje anódico				
Resultados	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	0,38791508	0,42330089	0,44249771	0,56620126
	0,44721878	0,46940486	0,5941552	0,48664608
	0,73636364	0,57338606	0,56852149	0,74340602
	0,60851668	0,56597691	0,48868693	0,61129143

Cuadro M.12. Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	0,38791508	0,44249771
	0,42330089	0,56620126
	0,44721878	0,5941552
	0,46940486	0,48664608
	0,74340602	0,57338606
	0,56852149	0,73636364
	0,61129143	0,56597691
	0,48868693	0,60851668

Cuadro M.13. Carga (peso)

Carga (peso)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	0,38791508	0,42330089
	0,44249771	0,56620126
	0,48664608	0,5941552
	0,46940486	0,44721878
	0,56852149	0,74340602
	0,73636364	0,57338606
	0,56597691	0,60851668
	0,61129143	0,48868693

Cuadro M.14. Interacción (Vcat x Carga)

Interacción (Vcat x Carga)		
Resultados	Nivel 1	Nivel 2
	0,38791508	0,42330089
	0,56620126	0,44249771
	0,5941552	0,48664608
	0,46940486	0,44721878
	0,56852149	0,74340602
	0,57338606	0,73636364
	0,60851668	0,56597691
	0,61129143	0,48868693

## ANexo N. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LÁMINA DE ACERO

### Determinación de los factores influyentes en el espesor en los lados sobre lámina de acero

#### Niveles de Importancia

La determinación de los niveles relevantes en cada factor se realiza como se muestra a continuación:

- Para el factor tiempo de proceso según el Cuadro F.3 los ensayos en los que interviene el nivel 1 están ubicados desde el ensayo 1 hasta el ensayo 4.
- Encontrados los ensayos se identifica sus resultados en el Cuadro 22, para luego ser promediados.
- Este procedimiento se realiza con cada nivel de cada factor como se muestra a continuación:

#### Experimentos por nivel en cada factor

Cuadro N.1 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	1	5
	2	6
	3	7
	4	8

Cuadro N.2 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	1	3
	2	4
	5	7
	6	8

Cuadro N.3 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6

Cuadro N.4 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	5	6
	7	8

Cuadro N.5 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7

Cuadro N.6 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	5	6
	8	7

Cuadro N.7 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	6	5
	7	8

**Valores de espesores en micras de los niveles en cada factor**

Cuadro N.8 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	3,04727	5,48
	4,18567	4,05524
	3,25818	5,14478
	5,17242	5,02649

Cuadro N.9 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	3,04727	3,25818
	4,18567	5,17242
	5,48	5,14478
	4,05524	5,02649

Cuadro N.10 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	3,04727	3,25818
	4,18567	5,17242
	5,14478	5,48
	5,02649	4,05524

Cuadro N.11 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	3,04727	4,18567
	3,25818	5,17242
	5,48	4,05524
	5,14478	5,02649

Cuadro N.12 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	3,04727	4,18567
	3,25818	5,17242
	4,05524	5,48
	5,02649	5,14478

Cuadro N.13 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	3,04727	4,18567
	5,17242	3,25818
	5,48	4,05524
	5,02649	5,14478

Cuadro N.14 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	3,04727	4,18567
	5,17242	3,25818
	4,05524	5,48
	5,14478	5,02649

Los resultados de los valores promediados están consignados en el Cuadro N.15

Cuadro N.15 Promedio en los niveles de cada factor

Col Number	Factor	Nivel 1	Nivel 2
1	Tiempo de Proceso	<b>3,915885</b>	<b>4,9266275</b>
2	Tiempo Anódico	4,192045	4,6504675
3	Tiempo Catódico	4,3510525	4,49146
4	Voltaje Anódico	4,2325575	<u>4,609955</u>
5	Voltaje Catódico	3,846795	<b>4,9957175</b>
6	Interacción (VcatxTcat)	4,681545	4,1609675
7	Interacción (VcatxTanod)	4,3549275	4,487585

**Factores influyentes en el espesor de los lados.** Los factores relevantes son determinados por comparación de sus varianzas. La técnica conocida como el análisis de varianza (ANOVA) es usada para este propósito, como se muestra en el Cuadro N.16

Cuadro N.16 Cuadro Anova para los espesores de los lados con un  $F_{0,5}$  (95% de confianza)

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	% de Contribución
1	T. Proceso	1	2,0432	2,0432		34,02477237
2	T. Anódico	1	0,420302	0,420302		6,999158123
3	T. Catódico	1	0,0394285	0,0394285		0,656590514
4	V. Anódico	1	0,284858	0,284858		4,743651433
5	V. Catódico	1	2,64005	2,64005		43,96392928
3x5	Interacción	1	0,542002	0,542002		9,025790268
2x5	Interacción	1	0,035196	0,035196		0,586108011
Error		0	0			
Total		7	6,0050365			

Según el Cuadro ANOVA, existen en el proceso factores de poca significancia por lo que se aplica el concepto de Pooled sobre ellos así:

Cuadro N.17. Cuadro Anova Pooled

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	S. Cuadrados (S')	% de contribución
1	T. Proceso	1	2,0432	2,0432	7,72893353	1,7788427	29,6225127
2	T. Anódico	"1"	0,420302	Pooled			
3	T. Catódico	"1"	0,0394285	Pooled			
4	V. Anódico	"1"	0,284858	Pooled			
5	V. Catódico	1	2,64005	2,64005	9,98667334	2,3756927	39,56166961
3x5	Interacción	"1"	0,542002	Pooled			
2x5	Interacción	"1"	0,035196	Pooled			
Error		5	1,3217865	0,2643573			
Total		7	6,0050365				

Como se muestra en el Cuadro ANOVA Pooled, los factores mas representativos en el proceso de electrodeposición de Cobres sobre lámina de acero, son el factor tiempo de proceso en un 29,62% y el voltaje catódico en un 39,56%.

**Valor Óptimo.** La combinación de niveles, de los factores con efectos importantes vistos en el Cuadro ANOVA son seleccionados en el Cuadro N.15 de niveles, utilizando el criterio de característica de calidad “el mayor es el mejor” los cuales corresponden a:

Cuadro N.18 Factores Relevantes

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de Proceso A	1	60 min
Tiempo Catódico E	2	12 ms

La selección del Nivel 1 en el tiempo de proceso (60 minutos) para disminuir el alto costo que acarrea el tiempo de producción.

$$Y_{opt} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{E}_2 - \bar{T})$$

$$\bar{T} = 35,37 / 8 = 4,421256 \text{ micras}$$

$$\bar{A}_1 = 3,9159 \text{ micras}$$

$$\bar{E}_2 = 4,9957 \text{ micras}$$

$$Y_{opt} = 4,49034 \text{ micras}$$

El valor teórico de  $Y_{opt}$  de 4.49 mc que se obtuvo con la técnica de

### **Factores influyentes en el porcentaje de sobre espesor en el borde sobre Lámina de Acero**

**Niveles de Importancia.** La determinación de los niveles de importancia se realiza de igual manera que para el espesor en los lados así:

## Experimentos por nivel en cada factor

Cuadro N.19 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	5
	2	6
	3	7
	4	8

Cuadro N.20 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	5	7
	6	8

Cuadro N.21 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6

Cuadro N.22 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	5	6
	7	8

Cuadro N.23 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7

Cuadro N.24 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	1	2
	4	3
	5	6
	8	7

Cuadro N.25 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	1	2
	4	3
	6	5
	7	8

**Valores de %sobre espesores de los niveles en cada factor**

Cuadro N.26 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	56	97
	29	136
	60	127
	103	118

Cuadro N.27 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	56	60
	29	103
	97	127
	136	118

Cuadro N.28 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
	Nivel 1	Nivel 2
Experimento	56	60
	29	103
	127	97
	118	136

Cuadro N.29 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	56	29
	60	103
	97	136
	127	118

Cuadro N.30 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	56	29
	60	103
	136	97
	118	127

Cuadro N.31 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	56	29
	103	60
	97	136
	118	127

Cuadro N.32 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	56	29
	103	60
	136	97
	127	118

Los resultados de los valores promediados están consignados en el Cuadro N.33

Cuadro N.33 Promedio en los niveles de cada factor

Columna	Factor	Nivel 1	Nivel 2
1	Tiempo de Proceso	62	120
2	Tiempo Anódico	80	102
3	Tiempo Catódico	83	99
4	Voltaje Anódico	85	97
5	Voltaje Catódico	93	89
6	Interacción (VcatxTcat)	94	88
7	Interacción (VcatxTanod)	106	76

**Factores influyentes en el porcentaje de sobre espesor de los bordes sobre Lámina de acero:** el análisis de varianza ANOVA determina los factores influyentes como se muestra en el siguiente Cuadro N.34

Cuadro N.34 Cuadro Anova para los espesores de los lados con un  $F_{0,5}$   
(95% de confianza)

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	% de Contribución
1	T. Proceso	1	6612,5	6612,5		64,4524587
2	T. Anódico	1	1012,5	1012,5		9,868901993
3	T. Catódico	1	544,5	544,5		5,307276183
4	V. Anódico	1	264,5	264,5		2,578098348
5	V. Catódico	1	24,5	24,5		0,238803061
3x5	Interacción	1	60,5	60,5		0,589697354
2x5	Interacción	1	1740,5	1740,5		16,96476436
Error		0	0			
Total		7	10259,5			

El resultado del proceso de pooling se muestra a continuación:

Cuadro N.35 Cuadro Anova Pooled

Columna	Factor	DOF	S. Cuadrados	Varianza	F	S. Cuadrados (S')	% de contribución
1	T. Proceso	1	6612,5	6612,5	10,8788045	6004,666667	58,52786848
2	T. Anódico	"1"	1012,5	Pooled			
3	T. Catódico	"1"	544,5	Pooled			
4	V. Anódico	"1"	264,5	Pooled			
5	V. Catódico	"1"	24,5	Pooled			
3x5	Interacción	"1"	60,5	Pooled			
2x5	Interacción	"1"	1740,5	Pooled			
				Pooled			
Error		6	3647	607,833333			
Total		7	10259,5				

Como se observa en el Cuadro N.35 el único factor influyente en el sobre espesor es el tiempo de proceso en un 58.53 %.

### Valor Óptimo

$$Y_{opt} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T})$$

$\bar{T}$  = Promedio de todos los experimentos

$\bar{A}_1$  = Promedio de los experimentos en el nivel 1 del factor Tiempo del proceso

$$\bar{T} = 726 / 8 = 90,75\%$$

$$\bar{A}_1 = 62\%$$

$$Y_{opt} = 62\%$$

**Criterio de Evaluación Promedio (OEC).** Para combinar las variables de respuesta, espesor de los lados y el porcentaje de Sobre espesor del borde, se procede a realizar un solo numero cuantificado: el OEC (Criterio de Evaluación Promedial) con los valores de:

$$w_1 = 0,5$$

$$w_2 = 0,5$$

Los valores encontrados para el OEC en lámina de acero se muestran a continuación:

Cuadro N.36 Valores de OEC

Ensayo	Espesor (y1)	%Sobre espesor	1 /% Sobrespesor (y2)	OEC
1	3,04727	56	0,017857143	0,55349765
2	4,18567	29	0,034482759	0,90461428
3	3,25818	60	0,016666667	0,55662369
4	5,17242	103	0,009708738	0,6407767
5	5,48	97	0,010309278	0,67921723
6	4,05524	136	0,007352941	0,49862371
7	5,14478	127	0,007874016	0,61150137
8	5,02649	118	0,008474576	0,6087748

## Niveles de Importancia en OEC

### Experimentos por nivel en cada factor

Cuadro N.37 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	5
	2	6
	3	7
	4	8

Cuadro N.38 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	5	7
	6	8

Cuadro N. 39 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	3
	2	4
	7	5
	8	6

Cuadro N.40 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	5	6
	7	8

Cuadro N.41 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	3	4
	6	5
	8	7

Cuadro N.42 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	5	6
	8	7

Cuadro N.43 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	1	2
	4	3
	6	5
	7	8

**Valores de OEC de los niveles en cada factor**

Cuadro N.44 Tiempo de proceso

Tiempo de proceso		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,67921723
	0,90461428	0,49862371
	0,55662369	0,61150137
	0,6407767	0,6087748

Cuadro N.45 Tiempo anódico

Tiempo anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,55662369
	0,90461428	0,6407767
	0,67921723	0,61150137
	0,49862371	0,6087748

Cuadro N.46 Tiempo catódico

Tiempo catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,55662369
	0,90461428	0,6407767
	0,61150137	0,67921723
	0,6087748	0,49862371

Cuadro N.47 Voltaje anódico

Voltaje anódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,90461428
	0,55662369	0,6407767
	0,67921723	0,49862371
	0,61150137	0,6087748

Cuadro N.48 Voltaje catódico

Voltaje catódico		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,90461428
	0,55662369	0,6407767
	0,49862371	0,67921723
	0,6087748	0,61150137

Cuadro N.49 Interacción (Tcat x Vcat)

Interacción (Tcat x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,90461428
	0,6407767	0,55662369
	0,67921723	0,49862371
	0,6087748	0,61150137

Cuadro N.50 Interacción (Tanod x Vcat)

Interacción (Tanod x Vcat)		
Experimento	Nivel 1	Nivel 2
	0,55349765	0,90461428
	0,6407767	0,55662369
	0,49862371	0,67921723
	0,61150137	0,6087748

El promedio de los valores de OEC en los niveles de cada factor son presentados en el Cuadro N.51

Cuadro N.51 Promedio en los niveles de cada factor

Columna	Factor	Nivel 1	Nivel 2
1	Tiempo de Proceso	<b>0,66387808</b>	0,59952928
2	Tiempo Anódico	<b>0,65898822</b>	0,60441914
3	Tiempo Catódico	<b>0,66959703</b>	0,59381033
4	Voltaje Anódico	0,60020999	<b>0,66319737</b>
5	Voltaje Catódico	0,55437996	<b>0,7090274</b>
6	Interacción (VcatxTcat)	0,6205666	0,64284076
7	Interacción (VcatxTanod)	0,57609986	0,6873075

En el Cuadro N.52 se muestra las condiciones óptimas de nivel en cada factor, seleccionadas según el criterio de calidad “el mayor es el mejor”.

Cuadro N.52 Condiciones óptimas para lámina de acero

Factor	Nivel	Valor
Tiempo de proceso	1	<b>60 min</b>
Tiempo anódico	1	<b>180 ms</b>
Tiempo catódico	1	<b>1200 ms</b>
Voltaje anódico	2	<b>- 3.9 V</b>
Voltaje catódico	2	<b>12 V</b>

