

## ÍNDICE

Resumen.....	5
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Estructura de tesis.....	8
1.2. Objetivos del trabajo de tesis.....	9
1.2.1. Objetivos principales.....	9
1.2.2. Objetivos secundarios.....	9
1.3. Justificación del tema elegido.....	9
1.4. Fundamentación del tema elegido.....	10
1.5. Condiciones institucionales.....	12
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO: CALIDAD Y HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS.....	13
2.1. El concepto de calidad y su evolución.....	14
2.2. Importancia de la mejora continua y sus métodos estadísticos.....	15
2.3. Etapas de aplicación de la estadística.....	19
2.4. La estadística en la mejora continua.....	20
2.5. Las herramientas estadísticas para la mejora continúa en la matriz de Hoerl.....	21
2.5.1. Problemas de baja complejidad y solución conocida.....	22
2.5.2. Problemas de baja complejidad y solución desconocida.....	23
2.5.3. Problemas de alta complejidad y solución conocida.....	24
2.5.4. Problemas de alta complejidad y solución desconocida.....	24
2.6. Diseño de experimentos.....	25
2.6.1. ¿Qué es el diseño de experimentos (DOE)?.....	26
2.6.2. Los objetivos del diseño de experimentos.....	26
2.6.3. Diseños de experimentos factoriales.....	27
2.7. Herramientas de la calidad para la mejora continua.....	28

2.7.1. Diagrama de Pareto.....	29
2.7.2. Diagrama causa – efecto .....	30
2.7.3. Histograma .....	31
2.7.4. Diagrama de dispersión.....	32
2.7.5. Gráfico de control .....	34
2.7.6. Indicadores de desempeño.....	41
2.8. Antecedentes de la aplicación de las herramientas de calidad en la industria aeronáutica.....	51
<b>CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES GENERALES: ALUMINIO.....</b>	<b>55</b>
3.1. Características generales del aluminio.....	56
3.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio .....	56
3.3. Propiedades de la aleación de aluminio AA2024 .....	57
3.3.1. Composición química .....	57
3.3.2. Propiedades físicas.....	58
3.3.3. Características de fabricación.....	58
3.4. Tratamiento térmico de la aleación de aluminio .....	59
3.4.1. Solubilización .....	60
3.4.2. Temple.....	61
3.4.3. Envejecido .....	62
<b>CAPÍTULO 4 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y EXPERIENCIAS .....</b>	<b>65</b>
4.1. Descripción del proceso de tratamiento térmico en estudio .....	66
4.1.1. Limpieza y secado de piezas .....	71
4.1.2. Calentamiento del horno .....	71
4.1.3. Carga y calentamiento de piezas.....	71
4.1.4. Tratamiento térmico de solubilizado y temple .....	71
4.1.5 Refrigeración/almacenamiento a baja temperatura.....	73

4.1.6. Envejecido natural .....	73
4.1.7. Inspección final.....	73
4.2. Ensayos sobre los productos finales obtenido en el tratamiento térmico .....	74
4.3. Metodología de análisis, selección de los factores de estudio y sus niveles .....	75
4.3.1. Metodología para el análisis de los resultados .....	75
4.3.2. Factores de estudio.....	75
4.4. Uso del diseño de experimento .....	76
4.4.1. Elaboración de la matriz de diseño de experimento .....	78
4.4.2. Ejecución de corridas en proceso .....	80
CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	83
5.1. Evaluación de los resultados.....	84
5.1.1. Conclusión del diseño de experimento .....	88
5.2. Planificación y diseño de las herramientas de la calidad para la mejora continua .....	89
5.3. Estudio de la aplicación de las herramientas de la calidad para la mejora continua y evaluación de los resultados .....	89
5.3.1. Diagrama de Pareto.....	90
5.3.2. Diagrama causa – efecto .....	91
5.3.3. Gráfico de control .....	96
5.3.4. Indicadores de desempeño.....	99
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	109
6.1. Recomendaciones y estudios de extensión .....	111
6.1.1. Extensión de las propuestas a todo el proceso productivo .....	111
6.1.2. Indicadores de desempeño.....	111
6.1.3. Aplicación del software Future SQC .....	112
ANEXOS .....	113

Anexo 1 Procesamiento de datos estadísticos del diseño de experimento.....	113
Anexo 2 Procesamiento de datos estadísticos de la comparación entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación .....	118
Anexo 3 Tablas de los valores de Cp.....	121
Anexo 4 Software Future SQC.....	122
Anexo 5 Instructivo para la medición de la conductividad eléctrica .....	124
BIBLIOGRAFÍA.....	135
Referencias bibliográficas .....	135
Bibliografía de consulta.....	140
ÍNDICE DE FIGURAS .....	143
ÍNDICE DE TABLAS .....	146

## **Resumen**

En la actualidad, la calidad se gestiona de la misma manera que cualquier otra actividad empresarial. Esta gestión de la calidad, exige un plan estructurado de acciones: la planificación, el control y la mejora, así como los procedimientos que establecen un marco de referencia especialmente útil para lograr los objetivos de calidad.

En nuestro país, la industria aeronáutica pasó por una serie de transformaciones que demoraron el crecimiento tecnológico y el desarrollo de procesos productivos con las exigencias que demanda el mercado aeronáutico mundial, el cual es altamente competitivo y fluctuante. La mayoría de los requisitos de la calidad están involucrados en los productos obtenidos al final de los procesos de producción, exigiendo, principalmente, las condiciones de seguridad a través del cumplimiento de estándares internacionales por medio de normas particulares que establecen las propiedades físicas y químicas que aseguren la integridad final del producto. Sin embargo, dentro de los procesos productivos generales como particulares que permiten la obtención de diferentes piezas de uso aeronáutico en nuestro país, encontramos, en varias ocasiones, la falta de la aplicación de métodos estadísticos y de herramientas de calidad, así como principios del sistema de la calidad para la mejora de los mismos.

En este trabajo se desarrolla una metodología para el control del proceso de tratamiento térmico de la aleación de aluminio AA2024 utilizada en aeropartes y su retroalimentación a los procesos de mejora del sistema de gestión de la calidad.

“Comparto con ustedes el secreto que me llevo a cumplir mis metas: mi fortaleza está en mi tenacidad”.

LOUIS PASTEUR



# CAPITULO 1

# INTRODUCCIÓN

“El secreto para destacarse es empezar. El secreto para empezar es fraccionar las grandes y abrumadoras metas en objetivos pequeños y alcanzables, y empezar con el primero”.

MARK TWAIN

7

### **1.1. Estructura de tesis**

Se inicia el Capítulo 2 analizando el marco teórico de la calidad. Luego la estadística aplicada a la mejora continua. Finalmente un análisis teórico del diseño de experimento y de las herramientas de la calidad para la mejora continua.

En el Capítulo 3 se realiza un repaso de los antecedentes de las características que presenta el aluminio en general. Después se presenta la clasificación de las aleaciones de aluminio. El estudio se centra en la aleación de aluminio AA2024, entonces en este capítulo se desarrolla el análisis de sus propiedades y como se la debe tratar térmicamente.

En el Capítulo 4 se detalla la metodología de trabajo, donde se describe el proceso de tratamiento térmico en estudio, los ensayos que se aplicarán sobre los productos obtenidos en este proceso, la selección de los factores de estudio, fundamentado cada uno de ellos y explicado los niveles que se eligen para aplicar el diseño de experimento.

En el Capítulo 5 se exponen los resultados y las discusiones logradas desde las corridas realizadas en el Capítulo 4, para obtener los parámetros críticos de proceso por medio del diseño de experimento. Finalmente, para analizar el comportamiento del proceso con respecto a su estabilidad y encontrar la solución a la problemática, utilizamos las herramientas de calidad por medio de la matriz de Hoerl.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo, analizando el comportamiento que tuvo el proceso en función del diseño de experimento y las herramientas de calidad. También, se desarrollaron las recomendaciones y el estudio de extensión de las herramientas estadística aplicada a la mejora continua para los distintos sectores de la empresa.



## **1.2. Objetivos del trabajo de tesis**

### ***1.2.1. Objetivos principales***

Establecer mediante métodos estadísticos y herramientas de calidad el control del tratamiento térmico en la aleación de aluminio AA2024 mediante el estudio de los parámetros críticos de dicho proceso, que permita retroalimentarlo para contribuir así a la mejora continua.

### ***1.2.2. Objetivos secundarios***

a- Aplicar un método estadístico de diseño de experimentos para identificar los parámetros de tratamiento térmico de bonificado, que son considerados críticos para obtener las características de calidad exigidas para la aleación AA2024.

b- Analizar y determinar las distintas herramientas estadísticas y de calidad para llevar a cabo la mejora continua de los procesos por medio de la matriz Hoerl (Guillon & Hernández, 2014).

c- Establecer e introducir indicadores de desempeño para productos conformes (PC), para evaluar así la cantidad de productos defectuosos. Además, se generarán los indicadores de variabilidad (Ti) y de capacidad de proceso (Cp), para cumplir con las especificaciones de los productos.

d- Sistematizar los análisis estadísticos por medio del uso de software existentes en el medio, referente a las distintas herramientas estadística y de calidad (ej.: CEP) aplicados a cualquier tipo de industria productiva.

## **1.3. Justificación del tema elegido**

En la fabricación de productos industriales, donde intervienen procesos, la implementación de los principios del sistema de calidad es fundamental para conseguir la mejora continua de los procesos productivos.

Para llegar a la mejora continua, es necesario contar con métodos estadísticos y herramientas de calidad, que puedan facilitar la labor de la retroalimentación de los procesos y poder mejorar continuamente las operaciones y procesos de la organización para alcanzar y mantener aumentos en la productividad, satisfacción del cliente y otros objetivos que la empresa se haya planteado.

Un hecho innegable es que, para poder mejorar, es necesario controlar, y para poder controlar es indispensable medir, así lo pregonó el Dr. Deming producto de sus

experiencias de trabajo con el Dr. Shewhart hace ya algunos años, (Vargas Sarmiento, 2007).

La empresa en estudio tiene implementado el sistema de mejora continua pero tienen el inconveniente que el mismo carece de estudio, análisis e implementación de métodos estadísticos y herramientas de calidad. Esta problemática se manifiesta también en las líneas de producción de aeropartes en el momento de gestionar sus estadísticas de controles de proceso.

Entonces la investigación de este trabajo propone estudiar y analizar qué métodos estadísticos y herramientas de calidad son más adecuadas para el control y la gestión de la mejora continua, para permitir lograr mejorar los procesos de producción.

Utilizando como área piloto el proceso de tratamiento térmico. Dicho procesamiento se realizará sobre chapas de 0,5 a 0,63 mm de espesor de la aleación de aluminio AA2024, utilizando el monitoreo de las variables que intervienen en el mismo, junto a una posterior validación por ensayos de laboratorio de las características de calidad finales de la aleación para retroalimentar al control de calidad del proceso.

#### **1.4. Fundamentación del tema elegido**

En nuestro país, la industria aeronáutica pasó por una serie de transformaciones que demoraron el crecimiento tecnológico y el desarrollo de procesos productivos con las exigencias que demanda el mercado aeronáutico mundial, el cual es altamente competitivo y fluctuante, (Origlia, 2016). La mayoría de los requisitos de la calidad están involucrados en los productos obtenidos al final de los procesos de producción, exigiendo, principalmente, las condiciones de seguridad a través del cumplimiento de estándares internacionales por medio de normas particulares que establecen las propiedades físicas y químicas que aseguren la integridad final del producto, (Bogotá et al, 2015). Sin embargo, dentro de los procesos productivos generales como particulares que permiten la obtención de diferentes piezas de uso aeronáutico en nuestro país, encontramos, en varias ocasiones, la falta de implementación de métodos estadísticos y herramientas de calidad, así como principios del sistema de la calidad para la mejora de los mismos, de acuerdo a lo mencionado por Maffia (2013).

Desde un punto de vista global, el aluminio y sus aleaciones ocupan desde hace más de 30 años un lugar destacado en la industria del transporte y la automoción, (Castro Patiño, 2014a). Este material, cuenta con características especiales de alta

dureza, ligereza, resistencia mecánica, gran resistencia a la corrosión, flexibilidad, apariencia, facilidad de conformado, maquinabilidad, conductividad eléctrica y térmica, las cuales son indispensables para la creación de aeronaves (sector aeronáutico), siendo ésta, una de sus aplicaciones más importantes en la actualidad, según Alu-Stock (2012).

Dentro de los procesos de fabricación de piezas de uso aeronáutico de nuestro país, existen aquellos que generan la transformación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a través del calentamiento y enfriamiento controlado, denominados como procesos de tratamientos térmicos. Los mismos, tienen como finalidad incrementar las propiedades mecánicas de las aleaciones para su uso en las exigencias que demandan los estándares de este tipo de industria, (Castro Patiño, 2014b). Las principales aplicaciones de estos tratamientos térmicos son orientados a las aleaciones ligeras, tales como el aluminio, donde sus propiedades para la construcción de aeronaves, proporcionan a estos vehículos un menor peso, hecho que da ventajas adicionales, tales como la reducción en el consumo de combustibles y una disminución notable de los gases emitidos por los aviones que causan graves daños a la atmósfera, (Maffia, 2013).

En nuestro país, se han adquirido nuevas tecnologías de fabricación para la industria aeronáutica. Una de ellas, consistió en un horno de tratamientos térmicos de gran capacidad, con tecnología de última generación, (Hornos Industriales Alferieff, 2013), que permite efectuar el bonificado de las aleaciones de aluminio para aplicaciones estructurales de las aeronaves, (Grupo Combustol & Metalpo, 2011).

Una vez que se produjo la instalación del horno, las necesidades de producción dejaron relegadas las cuestiones de calidad del proceso productivo. Teniendo en cuenta esta problemática, este trabajo propone una metodología para el control del proceso de tratamiento térmico de bonificado de la aleación de aluminio AA2024 y su retroalimentación a los procesos de mejora del sistema de gestión de la calidad, ejecutadas a través del diseño de experimentos y las herramientas de calidad. Esperando conseguir los parámetros críticos del proceso para la toma de decisiones, mediante acciones correctivas y preventivas que permitan la mejora constante del tratamiento térmico del aluminio, y en forma general, promover la optimización y mejora continua de los procesos intervinientes en la fabricación de productos de la industria aeronáutica de nuestro país.

### **1.5. Condiciones institucionales**

Los trabajos de campo se realizaron en una empresa local, sobre el área de tratamientos térmicos de bonificado de las siguientes piezas aeronáuticas: puerta de carga, recubrimiento exterior y cuadernas, las que se fabrican con chapas de la aleación de aluminio AA2024, de espesores que varían de 0,5 a 0,63 mm.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de materiales de dicha empresa, donde se evidenciaron las calibraciones de los equipos de ensayos, como aquellos que intervienen en la línea productiva.

# **CAPÍTULO 2**

## **MARCO TEÓRICO:**

### **CALIDAD Y**

### **HERRAMIENTAS**

### **ESTADÍSTICAS**

“Lo que no se puede medir no se puede Controlar,  
lo que no se puede controlar no se puede Gestionar,  
lo que no se puede gestionar no se puede Mejorar”.

Peter Druker

13

## 2.1. El concepto de calidad y su evolución

De acuerdo a lo citado por Díaz & Ruiz (2000) podemos decir que calidad es la aptitud de un producto para satisfacer una necesidad al menor costo posible.

La calidad de un producto implica dos aspectos fundamentales:

Calidad del diseño: es el grado de concordancia entre el diseño y el fin para el cual fue creado; en la medida que las características previstas, los materiales y las formas concebidas por el diseñador cumplen con las necesidades del usuario.

Calidad del producto: es el grado de concordancia entre el producto y sus especificaciones. Siendo el grado en el que el proceso de manufactura y mano de obra han reproducido el producto lo más cercano del diseño original.

Castro & González (2000) señalan que la concepción de la calidad ha evolucionado y ha atravesado distintas etapas.

Actualmente, se está imponiendo la filosofía de que la calidad se gestiona de la misma manera que cualquier otra actividad empresarial. Esta gestión de la calidad, exige un plan estructurado de acciones: la planificación, el control y la mejora, procedimientos que constituyen lo que se ha dado en llamar la trilogía de Juran, y que establecen un marco de referencia especialmente útil para lograr los objetivos de calidad.

En la fase de planificación se diseña, no sólo el producto o servicio, sino también el proceso capaz de conseguir ese producto. La planificación es clave en la consecución de objetivos de calidad, es la etapa donde se identifican los clientes y sus necesidades, y entendiendo la calidad como la satisfacción del cliente, es claro que una correcta planificación es el punto de partida para crear calidad.

Ahora bien, después de planificar es necesario controlar, es decir comprobar y vigilar que se están cumpliendo los objetivos de calidad fijados y, si es necesario, actuar sobre la diferencia.

Pero, ¿qué se puede controlar? Tradicionalmente, el control, se dirigía a cuestiones puramente técnicas, como las características de los productos (peso, tamaño, espesor, diámetro), o las condiciones bajo las cuales funciona un proceso (temperatura, tiempo utilizado); sin embargo, en la actualidad su alcance es mucho más amplio y se extiende al control de los resultados de cualquier organización (costes, plazos de entrega, etc.).

Por último, está la mejora, que para que sea efectiva debería ser continua. Siempre habrá algo que corregir; en realidad, la idea que subyace cuando se habla de mejora de la calidad, es que un producto nunca es lo suficientemente bueno y que se debe mejorar continuamente.

## **2.2. Importancia de la mejora continua y sus métodos estadísticos**

Por actividades de mejora continua (Kaizen japonés) entendemos todas aquellas actuaciones dirigidas hacia la mejora constante de los estándares actuales.

Tal como indica Bartes, et al., (1998), todo proceso u operación además de producto físico, genera información suficiente para mejorarlo. Hasta tal punto es cierta esta afirmación que es muy probable que cuando un estándar está en vigor más de seis meses sin ser modificado, ello sea debido a que no es seguido por nadie dentro de la propia organización.

Aguilar (2008) define la mejora calidad de la siguiente manera:

Mejoramiento de la calidad es la reducción de la variabilidad en productos y servicios.

La mejora continua implica cambios constantes, mientras que la estandarización de procedimientos, operaciones, etc. trata de evitar el cambio y apoyarse en el conocido. Una herramienta que permite evaluar y dentro de un ciclo determinar el modelo de mejora a seguir es el método estadístico.

Como los métodos estadísticos tienen un papel importante en el mejoramiento de la calidad, son objeto de estudio de la Ingeniería de calidad. Los datos relacionados con la calidad se clasifican en atributos y en variables. Los atributos son discretos, enteros. Los de variables corresponden a mediciones con valores reales como longitud, voltaje etc. Existen diferentes herramientas estadísticas para tratar con ambos tipos de datos (Aguilar, 2008).

Los productos no conformes o defectivos son los que no cumplen una o varias especificaciones.

Un tipo específico de no cumplimiento de especificaciones es llamado defecto o no conformidad, ver Fig. N° 2.1.

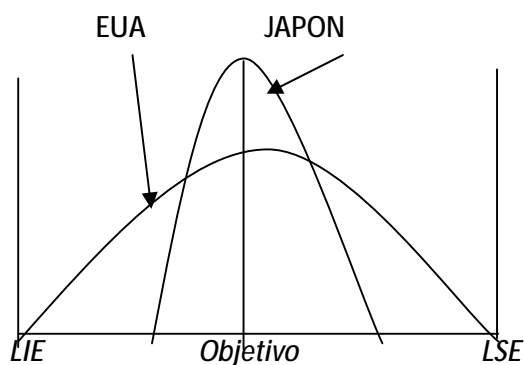


Fig. N° 2.1. Enfoques de conformancia, (Aguilar, 2008).

Las actividades de mejora constante se realizan mediante la secuencia (Plan, Do, Check, Action), es decir, planificar la mejora, implementarla, verificar sus efectos y actuar en función de los resultados de dicha verificación, ver Fig. N° 2.2.

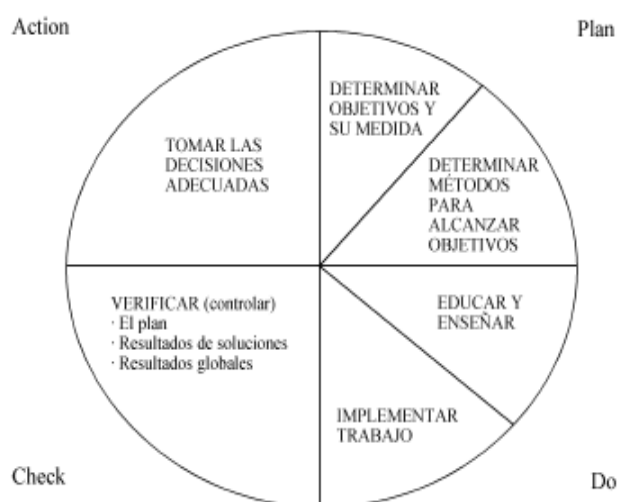


Fig. N° 2.2. El ciclo PDCA o APEV, (Bartes, et al., 1998).

Los pasos para la mejora continua de la calidad son los siguientes, (Bartes, et al, 1998), ver Fig. N° 2.3.:

a- En primer lugar debe planificarse (Plan) la mejora. Se debe analizar y estudiar el proceso decidiendo que cambios pueden mejorarlo y en qué forma se llevará a cabo.

La etapa de planificación comprende, entre otras actividades:

- Definición de los objetivos a alcanzar,



- Definición de medidas que permitan saber en un momento dado el nivel de cumplimiento de sus objetivos,
- Definición del equipo responsable de la mejora,
- Definición de los recursos o medios necesarios para alcanzar los objetivos propuestos.

b- En segundo lugar aparece la ejecución (Do) de las tareas necesarias para implementar la mejora (el cambio y/o las pruebas). En esta etapa es importante considerar la necesidad de educar y entrenar al personal responsable de la implementación de la mejora. La fase de ejecución requiere la puesta en práctica de las modificaciones del producto o del proceso que han sido consideradas como oportunas y efectivas por el equipo de trabajo según la planificación que se haya realizado.

c- En tercer lugar tenemos la etapa de evaluación (Check). Se trata de verificar los resultados de la implementación de la mejora comparándolos con los objetivos iniciales. También podemos decir que en esta etapa, se debe observar y medir los efectos producidos por el cambio realizado al proceso, sin olvidar de comparar las metas proyectadas con los resultados obtenidos.

d- Finalmente, en cuarto lugar, tenemos la etapa de actuación (Action).

De la etapa de verificación debe desprenderse la necesidad de actuar sobre el proceso para corregir los aspectos que hayan merecido una evaluación negativa. La actuación puede implicar y mejorar el propio plan, por ejemplo, fijando nuevos objetivos, o mejorando el proceso de educación del personal, o modificando la asignación de recursos para el proyecto de mejora, etc.

Es decir que en esta etapa se debe estudiar los resultados, corregir las desviaciones observada en la verificación y preguntarnos: ¿Qué aprendimos?, ¿Dónde más podemos aplicarlo?, ¿De qué manera puede ser estandarizado? ¿Cómo mantendremos la mejora lograda? ¿Cómo lo extendemos a otras áreas?

Una vez completado el ciclo es importante seguir dando vueltas al volante PDCA (ver Fig. N° 2.3.), repitiendo las cuatro etapas en un nuevo proceso de mejora y así sucesivamente en forma continua. Sólo mediante esta perseverancia puede una empresa mejorar realmente todos los procesos y, en consecuencia, la calidad de sus productos y servicios.

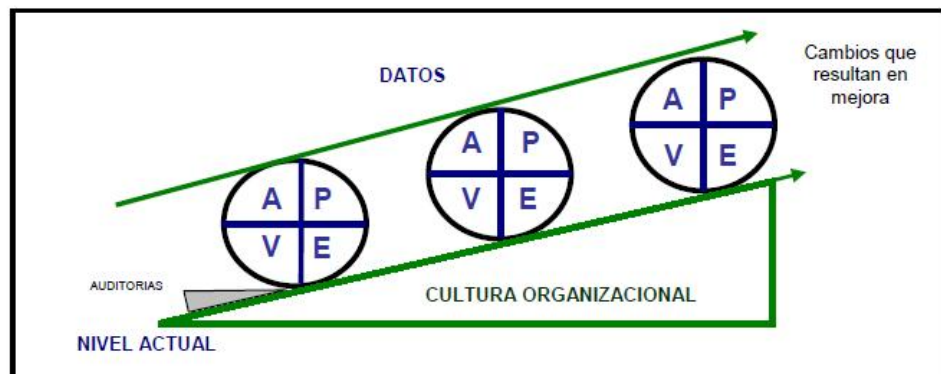


Fig. N° 2.3. Ciclos de mejora continua o ciclo de APEV (Ministerio de salud de la República del Perú, 2012).

Aguilar (2008) menciona que se utilizan tres métodos estadísticos principales para la mejora de la calidad y la solución de problemas: los gráficos de control, el diseño de experimento y el muestreo estadístico, además de las herramientas estadísticas para la solución de problemas en planta por grupos de trabajos o círculos de calidad.

Montgomery (2005) hace mención el papel de algunas de estas herramientas que se ilustra en la Fig. N° 2.4., donde se presenta un proceso de producción como un sistema con una serie de entradas y una salida. Las entradas  $x_1, x_2, \dots, x_p$  son factores controlables, tales como temperaturas, presiones, velocidades de alimentación y otras variables de procesos. Las entradas  $z_1, z_2, \dots, z_q$  son entradas no controlables, tales como los factores ambientales o las propiedades de las materias primas suministradas por el proveedor. El proceso de manufactura transforma estas entradas en un producto terminado que tiene varias características de la calidad. La variable de salida  $y$  es una medida de la calidad del proceso.

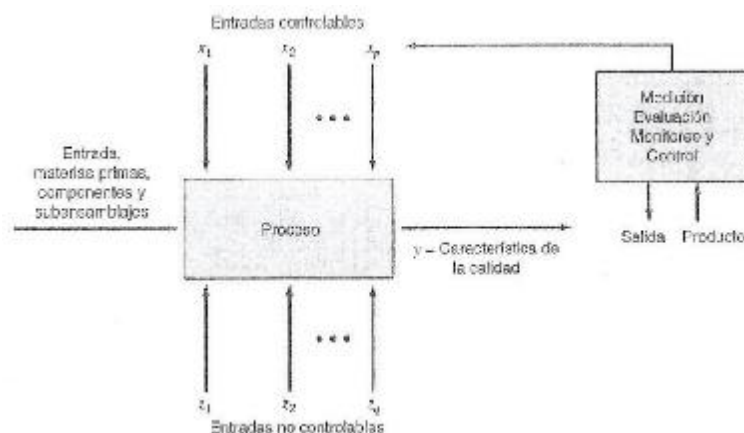


Fig. N° 2.4. Entradas y salidas de un proceso de producción, (Montgomery, 2005).

Llamamos característica de calidad a alguna propiedad distintiva de los productos de la cual es necesario vigilar su desempeño y por ende su variación. También la podemos definir como aquellas propiedades o atributos imprescindibles para que dicho producto logre la aptitud o idoneidad al uso y satisfaga las necesidades del cliente. Esta característica es evaluada respecto a especificaciones. Los productos tienen características de calidad continuas o de atributos. Las continuas son aquellas que se pueden medir con un instrumento de medición (altura, diámetros, profundidades, velocidades etc.). Cuando medimos las características de calidad empezamos a generar datos numéricos continuos.

### 2.3. Etapas de aplicación de la estadística

La aplicación de la estadística en las empresas es gradual, sin embargo, en cada una de las etapas es posible obtener un conocimiento de los procesos tal que sirva como base para la etapa siguiente y sobre todo como apoyo para la toma de decisiones.

En la Tabla 2.1. podemos observar las etapas, sus objetivos y los resultados que se logran:

Tabla 2.1. Etapas de aplicación de la estadística, (Marroquín Barrón, 2003).

<b>Etapas</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>
Muestreo	Detección de defectos	Obtención de datos
Control estadístico	Prevención de defectos	Desarrollo de sistemas
Diseño de experimentos	Optimización de procesos	Aplicación de conocimientos

En la Fig. N° 2.5 se muestra la evolución típica de la utilización de estas técnicas en la mayoría de las organizaciones. En el nivel de madurez más bajo, la administración puede no saber absolutamente nada de cuestiones de calidad, y es posible que no haya ningún esfuerzo organizado efectivo para el mejoramiento de calidad. Con frecuencia habrá aplicaciones modestas de los métodos del muestreo de aceptación, por lo general en la inspección de recepción. La primera actividad cuando aumenta la madurez es intensificar el uso de la inspección de muestras. El uso de muestreo aumentará hasta que

haya conciencia de que la calidad no puede inspeccionarse o probarse dentro del producto.

En ese punto, la organización empieza a enfocarse en el mejoramiento del proceso. El control estadístico del proceso y el diseño experimental tienen un impacto potencial importante sobre la manufactura, las actividades de diseño del producto y el desarrollo del proceso. La introducción sistemática de estos métodos con frecuencia marca el principio de mejoramientos sustanciales de la calidad, de los costos y la productividad en la organización. En los niveles más altos de madurez, las compañías utilizan de manera intensiva los experimentos diseñados y los métodos de control estadísticos de proceso y hacen un uso modesto del muestreo de aceptación (Montgomery, 2005).

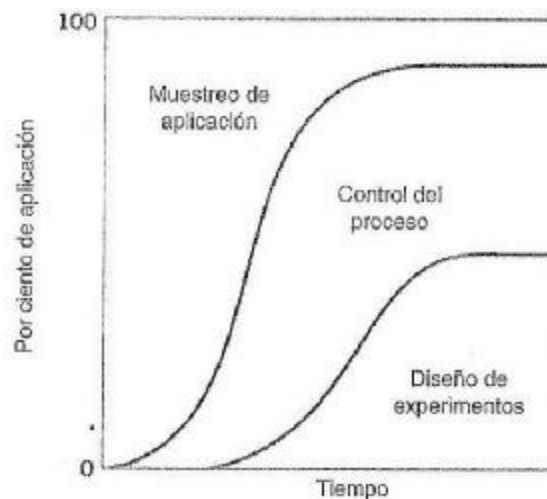


Fig. N° 2.5. Etapas de aplicación estadísticas (Montgomery, 2005).

#### 2.4. La estadística en la mejora continua

Montgomery (2005) menciona que la estadística es un conjunto de técnicas útiles para tomar decisiones acerca de un proceso o población con base en el análisis de la información contenida en una muestra de esa población. También podemos decir que la estadística es una forma eficiente y eficaz de extraer datos, información significativa que permita tomar decisiones para controlar y/o mejorar un proceso.

Guillon & Hernández (2014) citan que las organizaciones deben valerse de técnicas y herramientas que les permitan conocer el comportamiento de sus procesos, interpretar sus resultados y así concretar las acciones de mejora apropiadas. La estadística permite enfocar la resolución de problemas utilizando una base racional en

lugar de una intuitiva a la hora de tomar decisiones y proporciona un lenguaje común para discutir hechos. Además, los datos y el pensamiento estadístico orientan los esfuerzos de los programas de mejora continua, ya que los datos son necesarios para identificar las variables críticas y procesos o áreas a ser mejoradas.

De acuerdo a lo citado por Guillon & Hernández (2014) las organizaciones que tienen como objetivo la mejora continua basan su accionar fundamentalmente en tres principios: interrelación de procesos, decisiones basadas en datos y respuesta ante la variación. Estos tres principios coinciden con las bases del pensamiento estadístico que considera que los datos son intrínsecamente variables y que la identificación, medición, control y reducción de la variación proporcionan oportunidades para mejorar la calidad. Las herramientas estadísticas son un medio para aprovechar esas oportunidades. Es decir, existe una estrecha relación entre mejora continua y estadística.

La estadística ha demostrado ampliamente su utilidad en una diversidad de tareas vinculadas con la mejora continua, como por ejemplo:

- Comprender los hechos vitales, enfocándose en los problemas y causas importantes.
- Identificar dónde, cuándo, cómo y con qué frecuencia se presentan los problemas.
- Detectar con rapidez anomalías en los procesos.
- Encontrar las fuentes de variación, analizar su estabilidad y pronosticar su desempeño.
- Optimizar productos y procesos.
- Evaluar objetivamente el impacto de acciones de mejora.

La facilidad en la actualidad para trabajar con grandes volúmenes de datos, así como para acceder a planillas de cálculo y software estadístico, ha contribuido al uso masivo y creciente de la estadística en las organizaciones como herramienta indispensable para la mejora continua.

## **2.5. Las herramientas estadísticas para la mejora continua en la matriz de Hoerl**

Guillon & Hernández (2014) citan que la mejora continua es el esfuerzo sostenido por las organizaciones para mejorar sus productos o servicios y procesos. La necesidad de mejorar la calidad está presente en todas las actividades y seguirá siendo

así, debido a la creciente competitividad de los mercados. El uso de herramientas estadísticas y del pensamiento estadístico ayuda a las organizaciones en la mejora de sus procesos y productos. El tipo de problema a resolver naturalmente define el método de mejora, pero a menudo es difícil elegir el más apropiado. Para ayudar a caracterizar correctamente el problema, Roger W. Hoerl desarrolló una matriz de 2 filas por 2 columnas para caracterizar un problema de mejora continua, en la que combina la complejidad del problema con el conocimiento de su solución, con el propósito de simplificar y estandarizar el proceso de selección del método más adecuado para resolverlo. Fue presentada en la World Conferencian Quality and Improvement, organizada por la American Society Quality en Indianápolis, E.E.U.U., en mayo de 2013.

La matriz de Hoerl consta de cuatro cuadrantes, como se observa en Fig. N° 2.6.:

	SOLUCION CONOCIDA	SOLUCION DESCONOCIDA
BAJA COMPLEJIDAD	<b>1</b> <i>¿Quién implementará la solución?</i>	<b>2</b> <i>¿Por qué ocurrió el problema?</i>
ALTA COMPLEJIDAD	<b>3</b> <i>¿Cómo se implementará la solución?</i>	<b>4</b> <i>¿Cuál es la solución?</i>

Fig. N° 2.6. Matriz de Hoerl, (Guillon & Hernández, 2014).

Guillon & Hernández (2014) señalan que algunos problemas pueden corresponder a más de un cuadrante. Pero si se logra identificar el o los cuadrantes que el problema ocupa, es más sencillo determinar el método de mejora más apropiado a utilizar. Ahora se analizará cada uno de los cuadrantes:

### **2.5.1. Problemas de baja complejidad y solución conocida**

En el primer cuadrante de la matriz se presentan los problemas de baja complejidad y de solución conocida. En este caso, los problemas se resuelven de manera concreta y en el corto plazo; responden a procesos de mejora del tipo “Just do

it”, es decir, los esfuerzos de la organización deben enfocarse casi exclusivamente a implementar la solución. La herramienta estadística más utilizada, simple pero muy efectiva, es el análisis descriptivo de datos como herramienta de diagnóstico y de medición de la brecha existente entre la situación real y la ideal, que caracteriza el problema a resolver.

### ***2.5.2. Problemas de baja complejidad y solución desconocida***

En el segundo cuadrante se tienen los problemas de baja complejidad y solución desconocida. En esta situación cabe la pregunta “¿por qué ocurrió el problema?”. Es necesario entonces recurrir a herramientas que permitan determinar las causas que lo originaron, es decir, herramientas que posibiliten la obtención de información. Obtenida ésta, el esfuerzo de los equipos de mejora debe orientarse a organizarla y analizarla con un enfoque sistemático, con el objetivo de identificar las causas del problema. Se utilizan las conocidas siete herramientas básicas para la calidad, propuestas por Ishikawa: diagrama de causa-efecto; diagrama de Pareto; hoja de chequeo; histograma; estratificación y gráficos; diagrama de dispersión y gráficos de control, cuya efectividad y practicidad en los procesos de mejora continua es indudable.

Para su implementación básicamente se requieren: datos confiables y en cantidad suficiente; equipos de trabajo capacitados con amplios conocimientos de la situación en estudio con participación de todos los sectores involucrados, y el ambiente propicio que favorezca el debate e involucramiento del personal.

A excepción del diagrama de causa-efecto y de la hoja de chequeo, las herramientas básicas para la calidad son todas ellas herramientas estadísticas, relativamente sencillas de implementar, comprender e interpretar, aunque un párrafo aparte merece los gráficos de control.

En algunas ocasiones no existe un único camino para la resolución de un problema o el análisis estadístico no permite establecer la causa del problema; en estos casos se recurre a las llamadas siete nuevas herramientas: diagrama de relaciones, diagrama de afinidad, diagrama de árbol, diagrama matriz, matriz de análisis de datos, diagrama del proceso de decisión y el diagrama de flechas. De estas herramientas la única con base estadística es la matriz de análisis de datos. La ventaja que presenta esta

herramienta es que se puede obtener la información de manera ordenada y explorando todas las posibles relaciones entre las variables.

### ***2.5.3. Problemas de alta complejidad y solución conocida***

El tercer cuadrante de la matriz refiere a problemas de alta complejidad y solución conocida. Para estos problemas la pregunta a formularse es “¿cómo implementar la solución?”. Un problema complejo exige el abordaje desde distintos puntos de vista, que culmina, por lo general, en la reingeniería de los procesos, basada en principios Lean, y la aplicación de herramientas del Kaizen para la optimización.

Las herramientas estadísticas más eficaces para la resolución de estos problemas son el control estadístico de procesos (CEP), en especial los gráficos de control y los índices de capacidad de procesos, así como la función pérdida de Taguchi. El propósito fundamental del CEP es identificar y eliminar las causas asignables de variación de los procesos para llevarlos a que estén bajo control estadístico, es decir, que actúe únicamente la variabilidad inherente al proceso. Dentro del CEP se destacan como herramientas para la mejora continua los gráficos de control, que ya fueron analizadas para el segundo cuadrante, y los índices de capacidad de procesos, que evalúan qué tan capaz es un proceso para cumplir con las especificaciones. Para la implementación de estos índices se debe tener en cuenta que los procesos deben estar bajo control estadístico y que la característica de calidad a monitorear debe seguir una distribución aproximadamente normal.

Si bien el CEP es una técnica estadística muy eficaz si se realiza a lo largo del proceso y no solamente al final del mismo, su implementación es una decisión estratégica.

La función pérdida de Taguchi es un indicador de desempeño de un producto a mediano y largo plazo, que permite calcular las pérdidas individual y promedio ocasionadas por los productos o servicios brindados.

### ***2.5.4. Problemas de alta complejidad y solución desconocida***

En el cuarto cuadrante se presentan los problemas de alta complejidad y solución desconocida. Se trata, obviamente, de oportunidades de mejora más difíciles de concretar. En estas situaciones es donde adquieren su máxima relevancia métodos de



gestión integral, como Lean Six Sigma, y métodos estadísticos avanzados, como el diseño de experimentos y el método de Taguchi. Lean Six Sigma es una combinación entre los métodos Lean y el método Six Sigma, cuyo objetivo es lograr procesos de alta calidad, que generen como máximo 3,4 defectos por millón de oportunidades. La esencia de Lean Six Sigma está definida y fundamentada en las herramientas y el pensamiento estadístico; tal es así que los responsables de la implementación de los proyectos de mejora (champion, blackbelt, greenbelt, yellowbelt) requieren amplia formación en estadística, que supera a la estadística elemental y que, por lo tanto, exige la decisión estratégica de destinar los recursos necesarios (tiempo, dinero) para su logro.

## **2.6. Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos es una herramienta muy útil cuando se estudian los efectos que producen en una variable respuesta numerosos factores a la vez, ya que ordena la experimentación y permite un análisis de los datos experimentales más completo y menos oneroso que una investigación no planificada, garantizando la máxima confiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

En muchas industrias el uso efectivo del diseño de experimentos es la clave para obtener altos rendimientos, reducir la variabilidad, reducir los tiempos de entrega, mejorar los productos, reducir los tiempos de desarrollo de nuevos productos y tener clientes más satisfechos (Aguilar, 2006).

El diseño de experimento puede emplearse en la fase de planificación para comparar materiales, componentes o ingredientes distintos, y como ayuda para determinar las tolerancias tanto del sistema como de los componentes.

Se puede utilizar el diseño de experimentos para identificar los factores de mayor influencia en un sistema, la magnitud de esta influencia y sus relaciones (es decir, interacciones) y, si los hubiera, entre diferentes factores. Los hallazgos pueden ser utilizados para facilitar el diseño y el desarrollo de un producto o proceso, o para controlar o mejorar un sistema existente.

### 2.6.1. ¿Qué es el diseño de experimentos (DOE)?

Un diseño de experimentos es una prueba o serie de pruebas en las cuales se hacen cambios a propósito en las variables de entrada de un proceso, de tal forma que se puedan observar e identificar cambios en la respuesta de salida.

El proceso, como se ilustra en la Fig. N° 2.7., puede visualizarse como una combinación de máquinas, métodos y personas que transforman un material de entrada en un producto de calidad. Los productos resultantes tienen una o más características de calidad observables o respuestas. Algunas de las variables del proceso  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$  son controlables o factores de control, mientras que otras  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_q$  no son controlables (a pesar de que pueden ser controladas durante el desarrollo de las pruebas), y se denominan factores de *ruido*.

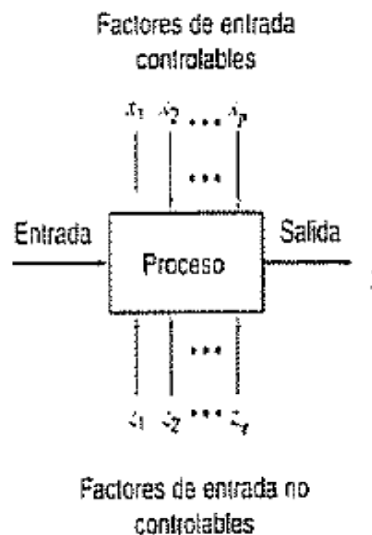


Fig. N° 2.7. Modelo general de un proceso, (Montgomery, 2005).

Montgomery (2005) menciona, que el diseño de experimento es una herramienta de ingeniería de importancia crítica para mejorar un proceso de manufactura. Tiene asimismo amplias aplicaciones en el desarrollo de nuevos procesos.

### 2.6.2. Los objetivos del diseño de experimentos

Determinar cuáles variables tienen más influencia en la respuesta,  $y$ .

- Determinar en donde ajustar las variables de influencia  $x$ , de tal forma que  $y$  se acerque al requerimiento nominal deseado.

- Determinar donde ajustar las variables de influencia  $x$  de tal forma que la variabilidad en  $y$  sea pequeña.
- Determinar donde ajustar las variables de influencia  $x$  de tal forma que los efectos de las variables incontrolables  $z$  sean minimizados.

Con la aplicación del DOE durante el desarrollo de los procesos podemos obtener los beneficios siguientes:

1. Rendimiento mejorado.
2. Variabilidad reducida y comportamiento cercano al valor nominal.
3. Tiempo de desarrollo reducido.
4. Costos totales reducidos.
5. Mejor desempeño y confiabilidad en el campo.

Como ejemplos de aplicaciones del diseño de experimentos tenemos las siguientes:

1. Evaluación y comparación de configuraciones básicas de diseño.
2. Evaluación de alternativas de material.
3. Evaluación de diferentes proveedores.
4. Determinación de parámetros clave de diseño (ej: ángulo, velocidad, método) con impacto en el desempeño.

### ***2.6.3. Diseños de experimentos factoriales***

Los experimentos factoriales se utilizan cuando hay varios factores de interés en un experimento. En los experimentos factoriales se deben utilizar en cada réplica, todas las combinaciones de los factores que se están investigando. Si se tienen dos factores A y B con niveles a y b respectivamente, cada réplica contendrá todas las posibles combinaciones ab.

Definiciones:

- Factores: son las variables controlables en el experimento Ej: temperatura, presión, velocidad; se designan con letras mayúsculas A, B, C.
- Niveles: se refiere a la cantidad de valores que tienen los factores del experimento. Ej: en un experimento tomamos los siguientes valores de temperatura: 15 °C, 20 °C; en este caso tenemos 2 niveles.

Los niveles se designan con números: “1”, “2” o con signos “-”, “+” que representan los niveles “bajo” y “alto” en cada caso.

- Réplica: es el número de repeticiones del experimento.
- Efecto de un factor: es el cambio en la respuesta como resultado de un cambio en el nivel del factor, se denomina efecto principal ya que se refiere a los factores primarios del estudio.

## **2.7. Herramientas de la calidad para la mejora continua**

Algunas de las herramientas que se aplicara de la matriz de Hoerl son las siguientes (Kume 1990,2002):

- Diagrama de Pareto.
- Diagrama causa – efecto.
- Histograma.
- Diagrama de dispersión.
- Gráfico de control.
- Indicadores de desempeño.

Estas herramientas tienen una característica común: todas son visuales y tienen forma de gráficos o diagramas. Es decir que las mismas nos proporcionan información de gran valor en la toma de decisiones relacionadas con la calidad.

El análisis estadístico desempeña un papel importante en el estudio de los procesos. El método de encontrar las causas de los productos con defectos, es lo que se denomina diagnóstico del proceso. Para reducir el número de productos defectuosos la primera acción es la de hacer un diagnóstico correcto para determinar las causas de los defectos.

Existen muchos métodos para hacer un diagnóstico correcto, algunos basados en la intuición y otros en la experiencia. En este trabajo se recurrirá al análisis estadístico de los datos; la forma estadística de considerar las cosas y el uso de los métodos estadísticos constituye un medio muy valioso para hacer las observaciones, (Diaz & Ruiz, 2000).

Kume (2002) menciona que las herramientas de calidad proporcionan un medio eficaz para desarrollar una nueva tecnología y controlar la calidad de los procesos de manufactura. Para utilizar estas herramientas necesitamos ser francos para reconocer los

problemas y la variación, y recoger información sobre ellos. Las mismas constituyen un medio efectivo para controlar la calidad en el proceso de producción; sin embargo, lo importante no es el conocimiento de los métodos estadísticos sino más bien la actitud mental hacia su utilización.

El uso secuenciado de estas herramientas permite identificar oportunidades de mejora, reducir la variabilidad y eliminar desperdicios. Por categoría se clasifican en, ver Tabla N° 2.2.:

Tabla N° 2.2. Las herramientas de calidad y sus finalidad, (Esparza, 2013).

Herramientas de calidad	Finalidad
Diagrama de Pareto Diagrama causa – efecto Histograma Diagrama de dispersión	Análisis
Gráfico de control	Control
Índices de capacidad Indicadores de desempeño	Medición

### 2.7.1. Diagrama de Pareto

Castro & Gonzales (2000) mencionan que el diagrama de Pareto se basa en el principio de Pareto que separa los pocos vitales de los muchos triviales, en un intento de reducir el centro de atención, en la causa que origina la mayoría de los problemas. Entonces el diagrama de Pareto pone de manifiesto que, cuando se analizan las causas de un problema, en general son unas pocas las responsables de su mayor parte. A estas pocas se les llama causas fundamentales, al resto, que son muchas pero ocasionan una pequeña parte del problema se les denomina causas triviales

La representación correspondiente dispone los datos desde la mayor frecuencia a la menor y se completa dibujando una línea que representa la frecuencia acumulada, para indicar la magnitud relativa de los defectos contados (ver Fig. N° 2.8.).

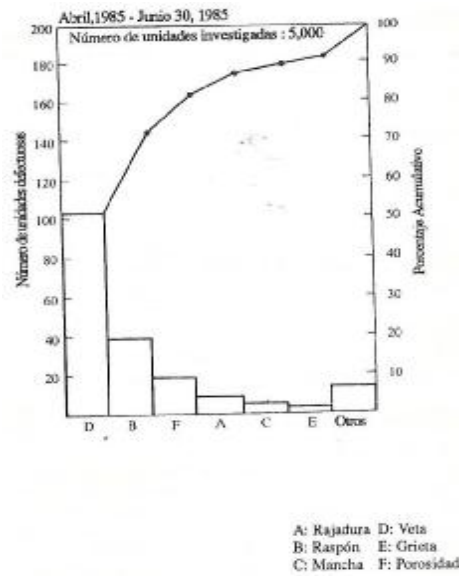


Fig. N° 2.8. Diagrama de Pareto por rubros de defectos, (Kume, 2002).

### 2.7.2. Diagrama causa – efecto

Es un diagrama que presenta la relación entre una característica y los factores de calidad.

El objetivo de un diagrama causa-efecto es identificar y eliminar la causa o las causas que originan los problemas, permitiendo identificarlas y clasificarlas para su análisis. El diagrama consiste básicamente en una línea central y un conjunto de ramas que representan las relaciones entre los efectos observados y las causas que los producen, y que confluyen en dicha línea central. Este diagrama también se denomina diagrama de Ishikawa o diagrama de espina de pescado, pues parece el esqueleto de un pez, ver Fig. N° 2.9.

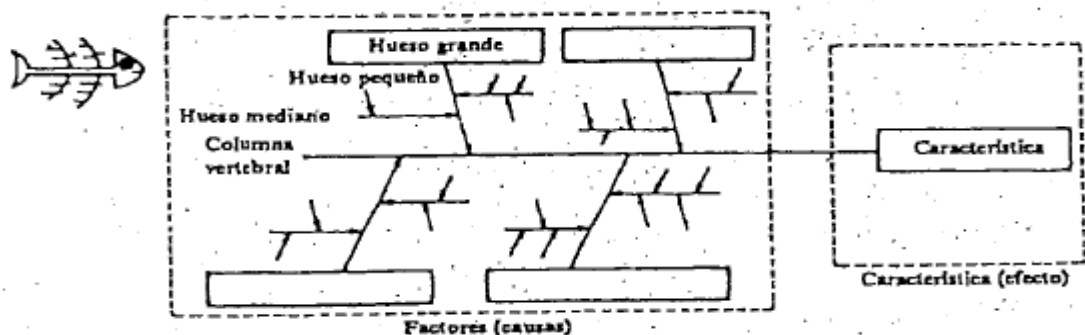


Fig. N° 2.9. Estructura del diagrama de causa-efecto, (Kume, 1990).

Un ejemplo real de aplicación del diagrama causa-efecto cual se presenta a continuación, observar la Fig. N° 2.10.:

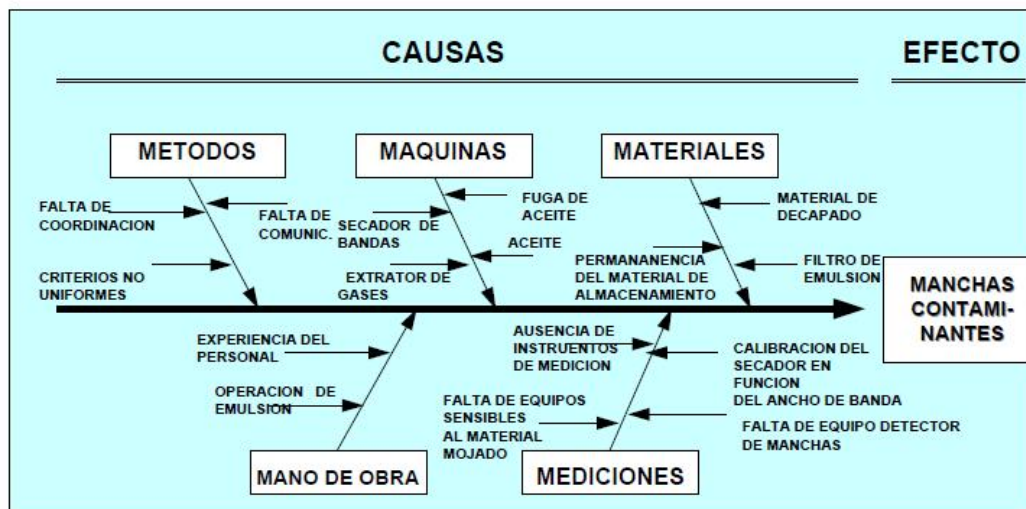


Fig. N° 2.10. Ejemplo de aplicación del diagrama de causa-efecto, (Diaz & Ruiz, 2000).

Bartes, et al., (1998) citan que el diagrama causa-efecto debe ser considerado un diagrama vivo. Es decir, un diagrama que va cambiando a medida que se van adquiriendo nuevos conocimientos sobre el fenómeno estudiado. Algunas causas desaparecen porque se han logrado eliminar, otras porque se ha constatado que no influyen. También pueden aparecer nuevas causas potenciales que en un primer momento no se habían considerado.

### 2.7.3. Histograma

Castro & Gonzales (2000) mencionan que los histogramas es una representación gráfica (ver Fig. N° 2.11.) de un conjunto de datos que se utilizan habitualmente para visualizar los datos generados por las hojas o plantillas donde se ha recopilado la información, es decir que es una gráfica de barras que muestra la frecuencia con que ocurre una determinada característica que es objeto de observación. La forma del histograma suele poner de manifiesto características importantes de la población de la cual se extrajeron los datos, sobre todo si, a la vez que se representa el histograma, se señalan los límites de especificación dentro de los cuales debe permanecer el producto o proceso, es decir utilizada comúnmente cuando se requiere mostrar la distribución de los datos y representar la variación propia de un proceso.

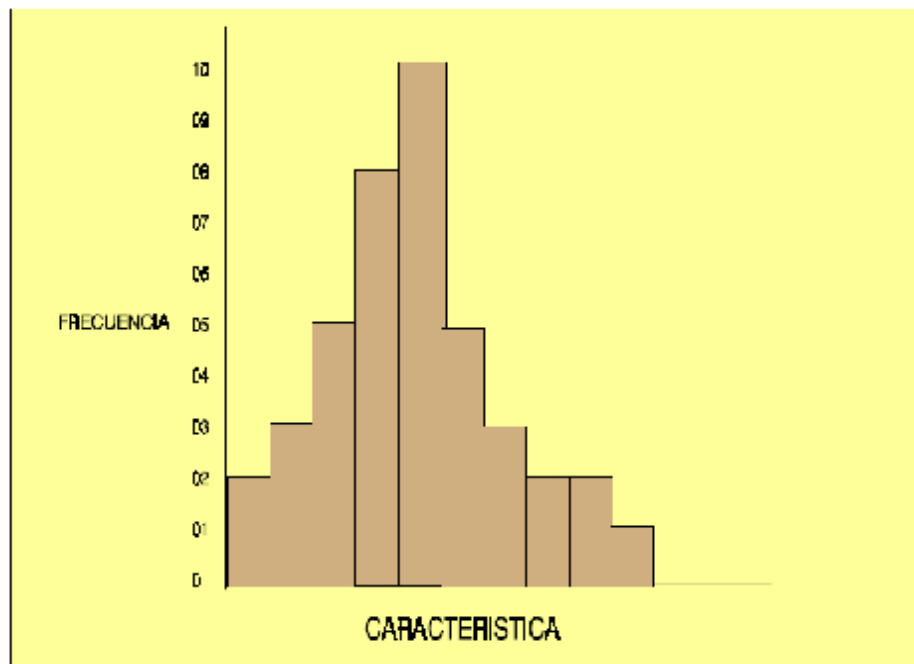


Fig. N° 2.11. Modelo de histograma, (Diaz & Ruiz, 2000).

#### 2.7.4. Diagrama de dispersión

El diagrama de dispersión o diagramas bivariantes es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre dos variables. Por ejemplo, entre una característica de calidad y un factor que le afecta (Aguilar, 2008).

Castro & Gonzales (2000) señalan que los diagrama de dispersión, tienen como finalidad estudiar la relación entre dos variables, ya sea una característica de calidad y un factor que pueda influir en ella, dos características de calidad relacionadas, o dos factores ligados a la misma característica de calidad. Es importante recoger los datos por pares, y aquellos que se crea que son la causa deben colocarse en el eje de abscisas, mientras que los datos correspondientes al efecto se representan en el eje de ordenadas, estableciendo la escala adecuada dependiendo del número de valores de cada variable y de sus valores máximo y mínimo.

Partiendo de la observación de un diagrama de dispersión, se puede obtener información sobre las características de calidad que se estudian, poniendo de manifiesto si existe relación y de qué tipo, si existe una elevada dispersión o si se detectan anomalías. Además de determinar la existencia o no de relación, se puede medir el grado de la misma mediante los coeficientes de correlación, e incluso realizar un análisis de regresión para extrapolar y predecir.



La correlación se utiliza para cuantificar el grado en que una variable provoca el comportamiento de otra.

Para un análisis de correlación o un análisis de regresión, el punto de partida es el diagrama de dispersión.

#### 2.7.4.1 Cálculo de los coeficientes de correlación y la recta de regresión lineal

La variable del eje horizontal  $x$  normalmente es la variable causa, y la variable del eje vertical  $y$  es la variable efecto, ver Fig. N° 2.12.

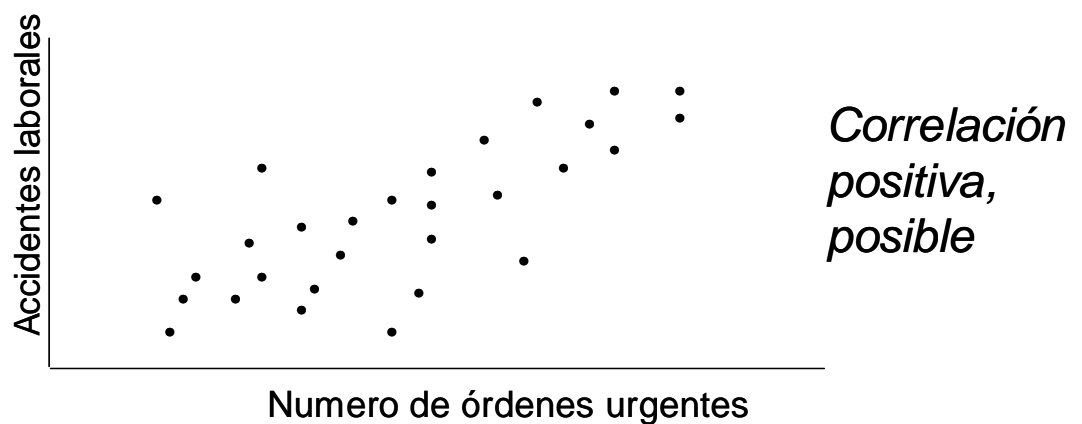


Fig. N° 2.12. Gráfica de dispersión donde se observa una correlación positiva, (Aguilar, 2008).

Aguilar (2008) hace mención que se puede observar que los puntos en un diagrama de dispersión pueden estar muy cerca de la línea recta que los atraviesa, o muy dispersos o alejados con respecto a la misma. El índice que se utiliza para medir ese grado de cercanía de los puntos con respecto a la línea recta es la correlación. En total existen cinco grados de correlación: positiva evidente, positiva, negativa evidente, negativa y nula.

Si todos los puntos estuvieran completamente sobre la recta la ecuación lineal sería  $y = a + bx$ . Como la correlación no siempre es perfecta, se calculan  $a$  y  $b$  de tal forma que se minimice la distancia total entre puntos y la recta. Los cálculos son:

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

La línea de recta se la conoce como regresión lineal, donde y es la variable de respuesta (o variable dependiente) y x es la variable explicatoria (o independiente). Por otra parte a es una constante y a b se la conoce como coeficiente de regresión.

El índice de correlación (r) se puede calcular estadísticamente mediante las ecuaciones que a continuación se presentan:

$$r = \frac{SCxy}{\sqrt{SCx \times SCy}}$$

$$SCxy = \sum xy - \frac{\sum x \times \sum y}{n}$$

$$SCx = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}$$

$$SCy = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}$$

El factor de correlación es un número entre -1 (correlación negativa evidente) y +1 (correlación positiva evidente indica una fuerte correlación entre x e y), y r = 0 indicaría correlación nula. Cuando r=1 los valores forman una línea recta.

### 2.7.5. *Gráfico de control*

El gráfico de control es la más poderosa herramienta del CEP.

El CEP es una actitud (un deseo de todos los individuos en la organización para el mejoramiento continuo de la calidad y productividad por medio de la reducción sistemática de la variabilidad).

El control estadístico de proceso (CEP) es una metodología integral que tiene la capacidad de medir, analizar, mejorar y controlar un proceso, ver Fig. N° 2.13. Una herramienta que permite evaluar y dentro de un ciclo determinar el modelo de mejora continua.

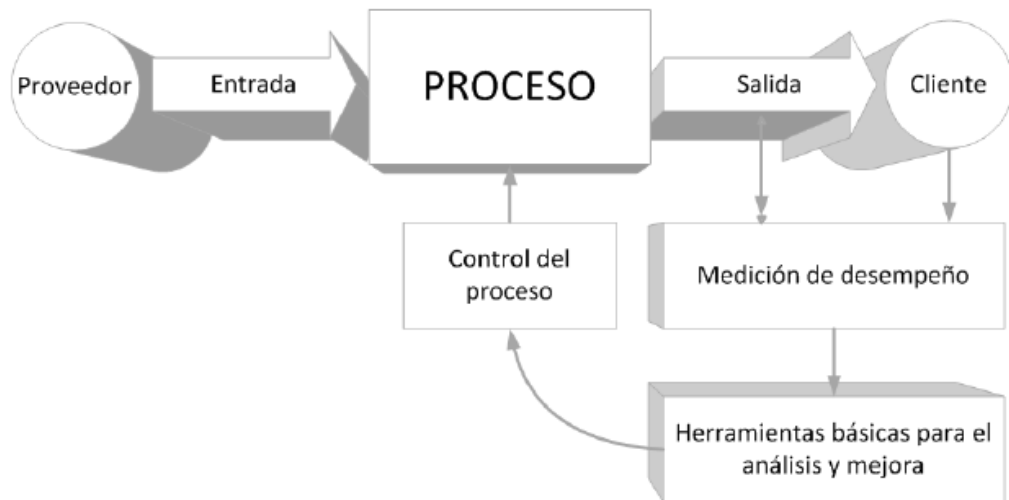


Fig. N° 2.13. Esquema del proceso y sus control según metodología estadística, (Esparza, 2013).

Esparza (2013) menciona que el control estadístico de proceso es una metodología para vigilar un proceso, para identificar las causas especiales de variación y para señalar la necesidad de tomar alguna acción correctiva cuando sea apropiado.

Morales (2004) cita que el control estadístico de procesos (CEP.), también conocido por sus siglas en inglés “SPC” es un conjunto de herramientas estadísticas que permiten recopilar, estudiar y analizar la información de procesos repetitivos para poder tomar decisiones encaminadas a la mejora de los mismos, es aplicable tanto a procesos productivos como de servicios siempre y cuando cumplan con dos condiciones: Que sea medible (observable) y que sea repetitivo. El propósito fundamental de CEP es identificar y eliminar las causas especiales de los problemas (variación) para llevar a los procesos nuevamente bajo control.

El CEP sirve para llevar a la empresa del control de calidad “correctivo” por inspección, de pendiente de una sola área, al control de calidad “preventivo” por producción, dependiente de las áreas productivas, y posteriormente al control de calidad “predictivo” por diseño, dependiendo de todas las áreas de la empresa. En la Fig. N° 2.14. se muestra el ciclo de aplicación del control estadístico de proceso.

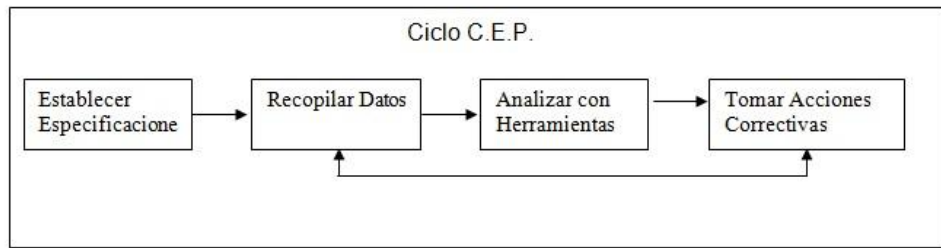


Fig. N° 2.14. Ciclo de aplicación de control estadístico de procesos, (Morales, 2004).

Un gráfico de control típico representando un proceso en control estadístico se muestra a continuación. Contiene una línea central que representa el valor promedio de la característica de calidad correspondiente al estado “en control” y dos líneas adicionales llamadas límites inferior y superior de control (LIC y LSC), los cuales se seleccionan de tal forma que casi la totalidad de los puntos se encuentren dentro de ellos, si esto ocurre no se requiere tomar ninguna acción (Aguilar, 2008). Observar el gráfico en Fig. N° 2.15.

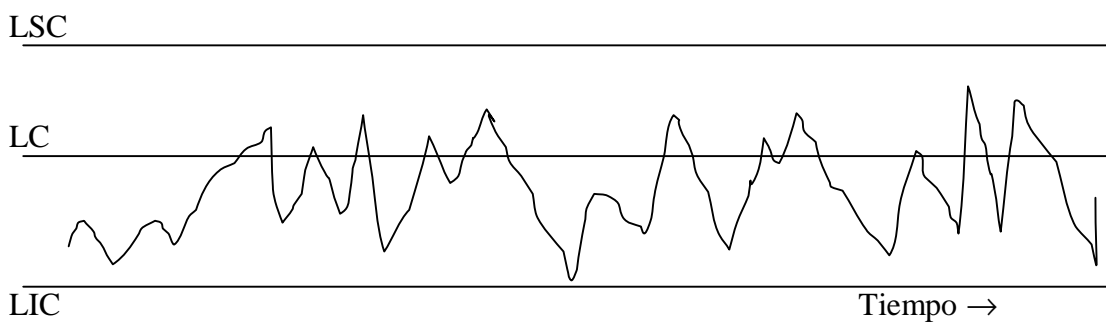


Fig. N° 2.15. Gráfico de control de Shewhart (Aguilar, 2008).

Aguilar (2006) dice que el CEP proporciona un retorno sobre la inversión apreciable cuando se implementa exitosamente, ya que permite la mejora continua a través de la reducción de la variabilidad. Los gráficos de control son una herramienta importante para esta mejora.

El CEP no sirve si se implementa y después no se mantiene, ya que la mejora continua debe ser parte de la cultura de la organización.

Para su implementación es necesario el liderazgo gerencia y el trabajo en equipo, así como evaluar los avances y comunicarlos a la organización, lo cual puede motivar a mejorar otros procesos.

Morales (2004) menciona que una empresa que cuenta con control estadístico puede mejorar sus procesos, reducir retrabajos y desperdicios, lo que genera una reducción de costos ya que el CEP involucra más que sólo crear el producto perfecto, implica además asegurar que los procesos internos son llevados apropiadamente, que al equipo se le da el mantenimiento adecuado y que los recursos suministrados son los adecuados. Es decir que el CEP en los proceso de producción nos permite mejorar los procesos productivos, disminuyendo costos para así ofrecer productos realmente competitivos.

Es importante mencionar que el CEP es solamente una de las grandes herramientas de que disponen los gerentes de las áreas de manufactura para mejorar y hacer más eficientes los procesos, pero desde luego que no es la única, podría decirse que es una de las sencillas y que más rápido brinda resultados en etapas iniciales.

#### *2.7.5.1. Causas comunes y causas especiales de variación*

Las causas de variación en un proceso se pueden clasificar en (Esparza, 2013):

- Causas comunes o aleatorias: las cuales ocurren de manera natural por las características implícitas de la maquinaria (tecnología), personal (conocimiento y destreza), medio ambiente, métodos de trabajo y materiales. Un proceso que opera en estas condiciones se dice que está en control estadístico.
- Causas especiales: las cuales ocurren al presentarse un comportamiento o desempeño anormal en maquinaria, personal, medio ambiente, métodos de trabajo y/o materiales. Regularmente son de origen externo al proceso. Hace que el proceso opere fuera de control estadístico.

En la Fig. N° 2.16. se muestra cuando el proceso está en control, la mayor parte de la producción se encuentra dentro de los límites de control (LSC y LIC). Sin embargo cuando el proceso está fuera de control, una gran proporción del proceso se encuentra fuera de estos límites.

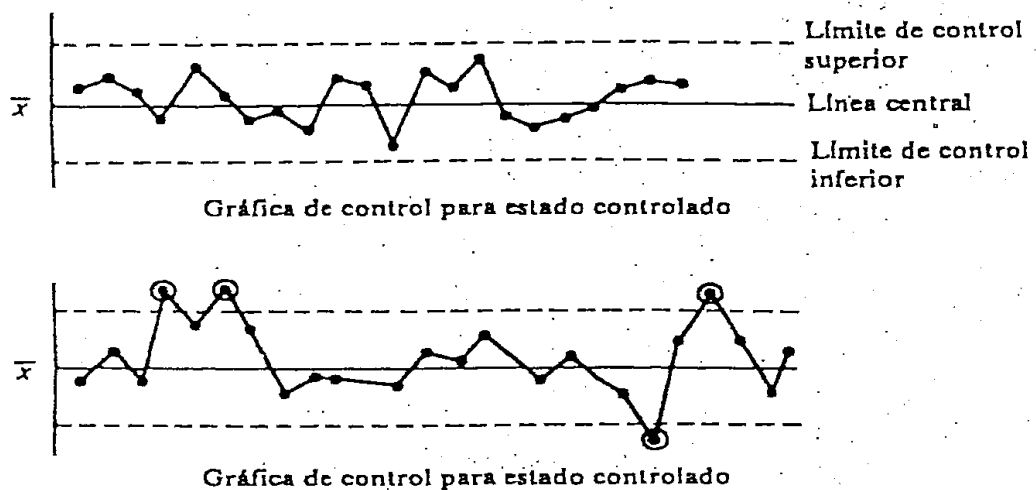


Fig. N° 2.16. Gráficos de control, bajo control y fuera de control, (Kume, 1990).

El objetivo del CEP es la detección oportuna de la ocurrencia de causas especiales para tomar acciones correctivas antes de que se produzcan unidades defectivas o no conformes, para esto se utilizan los gráficos de control en línea, permitiendo también la estimación de la capacidad o habilidad del proceso y la reducción continua de la variabilidad hasta donde sea posible, Aguilar (2008). Entonces podemos decir que los objetivos principales del CEP son los siguientes:

- a) Minimizar la producción defectuosa.
- b) Mantener una actitud de mejora continua del proceso.
- c) Comparar la producción respecto a las especificaciones.

Para poder llevar a cabo estos objetivos hay que tener en cuenta, que todo proceso genera un producto, pero además genera información. La misma se puede obtener tomando datos numéricos de las características de los productos que salen del proceso y tratándola adecuadamente. La información permite escuchar el proceso y poder llevar a cabo los objetivos anteriormente citados.

#### 2.7.5.2. Tipos de gráficos de control y sus bases estadísticas

Existen diferentes tipos de gráficos de control, conforme a los valores característicos o el propósito de los mismos. En cualquier tipo de gráfico de control, el límite de control se calcula mediante la fórmula:

$$(\text{Media}) \pm 3. (\text{Error Estándar}),$$

Estos gráficos de control se denominan gráficos de control 3-sigma (Kume 1990).

Los gráficos de control pueden ser clasificadas en dos clases: por variables (valor continuo) y por atributos (valor discreto) y dependiendo de cómo se evalúe la característica de calidad.

- a) Si la característica de calidad se puede evaluar y expresar como un número real en alguna escala de medición continua, se denomina una variable. En tales casos se utilizan gráficos de control de medias, que describan la tendencia central y gráficos de control basadas en rango o desviación estándar para controlar la variabilidad del proceso.
- b) Muchas características de calidad no pueden ser medidas en una escala continua, en esos casos se puede juzgar cada producto como conforme o como no conforme sobre la base de que posea o no ciertos atributos, o se pueden contar el número de no conformidades o defectos que aparecen en una unidad de producto. Los gráficos de control para tales características de calidad, se denominan gráficos de control por atributos.

Los tipos de gráficos prescritos por JIS (normas industriales Japonesa o Japanese Industrial Standards) se incluyen en la Tabla N° 2.3. sus líneas de control figuran en la Tabla N° 2.4.

Tabla N° 2.3. Tipos de gráficos de control, (Kume 1990).

Valor característico	Denominación
Valor continuo	Grafico $\bar{\bar{x}}-R$ (promedio y rango)
	Grafico $\bar{\bar{x}}$ (promedio)
Valor discreto	Grafico pn (cantidad de unidades defectuosas)
	Grafico c (cantidad de defectos)
	Grafico u (cantidad de defectos por unidad)

De todos estos gráficos el que vamos a utilizar para este estudio es de  $\bar{\bar{x}}-R$ , que se utiliza para controlar y analizar un proceso, empleando valores continuos de calidad del producto, tales como longitud, peso o concentración (característica de calidad) y de esto se obtiene la mayor parte de la información sobre el proceso.  $\bar{\bar{x}}$  representa el valor promedio de un subgrupo y R representa el rango de este subgrupo. Generalmente se

utiliza un gráfico R en combinación con un gráfico  $\bar{X}$  para controlar la variación dentro de un subgrupo. Estos gráficos tienen por objetivo evitar o minimizar que se tengan productos fuera de especificaciones y estabilizar los procesos.

Un gráfico  $\bar{X}$  muestra las variaciones en el valor medio de las muestras.

El gráfico R muestra variaciones en los rangos (diferencias entre los valores mayor y menor de la muestra) de las muestras, es decir, cuánto varían las amplitudes de las muestras.

Tabla N° 2.4. Lista de fórmulas para líneas de control, (Kume 1990).

Tipo de gráfico	Límite superior de control (UCL), línea de control central (CL), Límite inferior de control (LCL)
$\bar{x}$	UCL = $\bar{x} + A_2\bar{R}$ CL = $\bar{x}$ LCL = $\bar{x} - A_2\bar{R}$
R	UCL = $D_4\bar{R}$ CL = $\bar{R}$ LCL = $D_3\bar{R}$
$\bar{x}$	UCL = $\bar{x} + 2.66\bar{R}_s$ CL = $\bar{x}$ LCL = $\bar{x} - 2.66\bar{R}_s$
pn	UCL = $\bar{p}n + 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$ CL = $\bar{p}n$ LCL = $\bar{p}n - 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$
p	UCL = $\bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$ CL = $\bar{p}$ LCL = $\bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$
c	UCL = $\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$ CL = $\bar{c}$ LCL = $\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$
u	UCL = $\bar{u} + 3\sqrt{\bar{u}/n}$ CL = $\bar{u}$ LCL = $\bar{u} - 3\sqrt{\bar{u}/n}$

Un factor importante en la aplicación de los gráficos de control es su diseño, es decir la selección de tamaño de muestra, límites de control y frecuencia de muestreo. Para los gráficos de control por variables del ejemplo se utilizó una muestra de 5 partes, límites de control a 3-sigma y una frecuencia de muestreo cada hora.



### **2.7.6. Indicadores de desempeño**

La norma ISO 9001:2015, define a la mejora continua como la actividad recurrente para aumentar el desempeño. El seguimiento y medición de los procesos a través de los indicadores, permite la obtención de datos que serán analizados con la finalidad de conocer las características y desempeño actuales de los procesos. Entonces podemos decir que los indicadores son clave para la toma de decisiones y por lo tanto, para la mejora continua. A partir de este análisis se podrá conocer:

- Que procesos no presentan un desempeño adecuado y no alcanzan los resultados planificados.
- En que procesos existen oportunidades de mejora.

Estos datos deben servir de información de entrada para la mejora continua, la cual debe ser un pilar dentro de la organización que permita aumentar la eficacia, eficiencia y/o capacidad del proceso.

Para desarrollar este tema se dividirá en dos partes:

- 1) Indicadores de gestión
- 2) Cuadro de mando

#### **2.7.6.1. Indicadores de gestión**

El control y seguimiento puede realizarse mediante indicadores, dentro de los cuales la organización establece que es necesario medir para conocer el comportamiento y desempeño de uno o varios procesos.

Beltrán (1999) menciona que el indicador es la relación entre las variables cuantitativas o cualitativas, que permite observar la situación y las tendencias de cambio generadas en el objeto o fenómeno observado, respecto a objetivos y metas previstas e influencias esperadas. Es decir que el indicador es un instrumento de medición que establece una relación entre dos o más datos significativos, importantes de relevancia y que proporciona información sobre el estado de eficiencia, eficacia, en que se encuentra un proceso.

Estos indicadores pueden ser valores, unidades, índices, series estadísticas, etc. Son factores para establecer el logro y el cumplimiento de la misión, objetivos y metas de un determinado proceso.

Como todo indicador permiten establecer comparaciones entre distintos procesos dentro de una misma empresa o entre procesos similares de distintas empresas (Barbiero, et al, 2005).

Los indicadores de gestión son, ante todo, información, es decir, agregan valor, no son solo datos. Siendo información, los indicadores de gestión deben tener los atributos de la información, tanto en forma individual como cuando se presentan agrupados. Los indicadores no son fines, sino medios, para ayudarnos a lograr los fines.

Beltrán (1999) define que los atributos que debe cumplir la información de los indicadores son los siguientes:

- Exactitud
- Forma
- Frecuencia
- Extensión
- Origen
- Temporalidad
- Relevancia
- Integridad
- Oportunidad

En la Fig. N° 2.17. se muestra como el sistema de medición (indicadores) permite controlar los diferentes factores que afectan al proceso o procesos que se estén evaluado por parte de la organización.

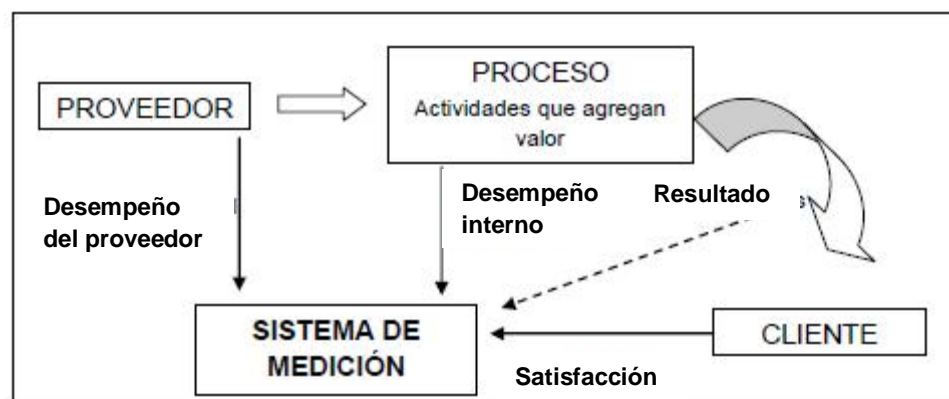


Fig. N° 2.17. Sistema de medición (Beltrán, 1999).

Un proceso puede tener uno o más indicadores, los cuales deben ser lo suficientemente representativos y útiles para poder evaluar el desempeño del proceso y deben establecerse en coordinación entre el responsable del proceso y su jefe superior, de manera que lleguen a un consenso que permita establecer de manera coherente los resultados y objetivos que se desea lograr.

El comportamiento de los indicadores puede identificar que procesos requieren mejoras y proponer los cambios a realizar o ejecutarlos si esto se encuentra dentro de su alcance. Es importante que los indicadores permitan la evaluación continua del estado del proceso, generen alarmas de comportamiento que permitan prevenir inconvenientes a futuro. Estos indicadores permiten a los supervisores del proceso tener una visión que vaya más allá de informes mensuales que le indiquen como se comportó su proceso y que fallas tuvo, sino que de manera previa le permitan prever posibles fallas futuras para actuar oportunamente en pro de la organización.

La ventaja de los indicadores dentro del seguimiento y control de los procesos, es que permiten recabar de manera adecuada toda la información que la organización considere relevante sobre el desempeño de sus procesos, de manera que se pueden identificar puntos de mejora a través de su análisis, tomando en cuenta el valor que adopte el indicador y su evolución a lo largo del tiempo.

INLAC (2001) menciona que un indicador es una herramienta que nos permite medir la efectividad (eficacia + eficiencia) de las acciones emprendidas a objeto de resolver un problema. Entonces los indicadores pueden ser de eficacia o eficiencia; cuando se mide que tanto un proceso cumple con las expectativas de los destinatarios del mismo (cliente interno o externo), se habla de un indicador de eficacia ejemplo:

- Número de inspecciones por mes.
- Número de reclamos recibidos.

Los indicadores de eficiencia son cuando se miden el consumo de recursos del proceso, ejemplo:

- Número de inspecciones realizadas/número de inspectores.
- Número de diseños/\$ gastados.

En la Fig. N° 2.18. se puede observar que la utilización simultánea de ambos tipos de indicadores, es conveniente puesto que ayudan a evaluar el proceso, por ejemplo si

medimos la eficacia desde el punto de vista del cumplimiento de las expectativas de los clientes externos y la eficacia desde el punto de vista de operación y costo.

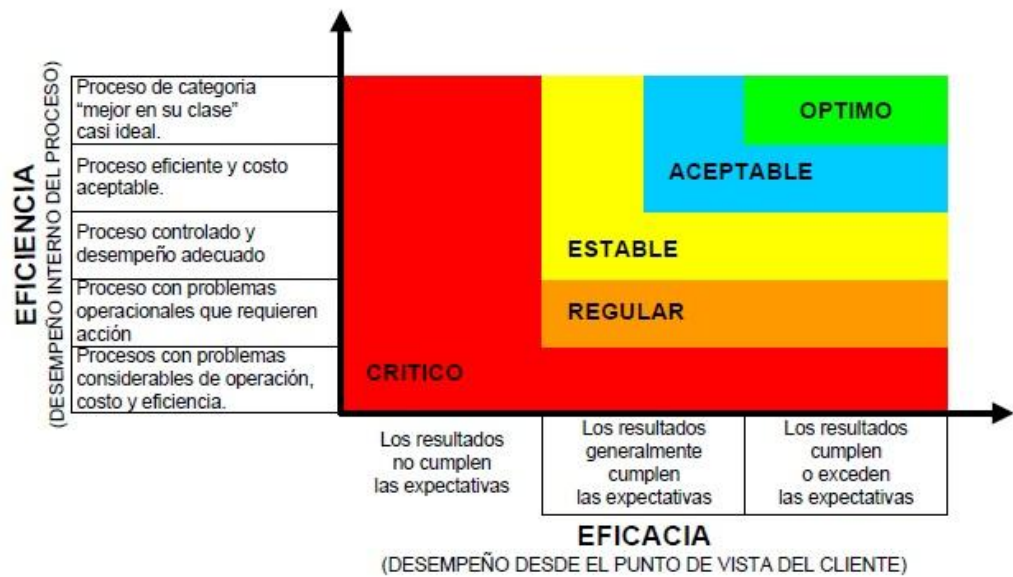


Fig. N° 2.18. Evaluación de un proceso, (INLAC, 2001).

Ahora se ampliará el concepto de los indicadores de eficacias y de eficiencias:

a) Indicadores de eficacias: según ISO 9000:2015 la eficacia se refiere al grado en el cual se realizan las actividades planificadas y se alcanzan los resultados planificados. Es decir es la medida del grado de cumplimiento de los objetivos. Una actividad es eficaz si consigue los resultados que pretendía conseguir.

Estos indicadores están relacionados con aspectos externos (cliente). Alcanzan o no alcanzan los resultados.

Se asocia al concepto de eficacia el valor de actualidad (capacidad) es el resultado obtenido al analizar la situación real de la empresa en este momento.

b) Indicadores de eficiencia: según ISO 9000:2015 la eficiencia es la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados. Es decir que es una medida de la utilización de los recursos necesarios para conseguir un objetivo planificado. Una actividad es eficiente si reduce al mínimo la utilización de los recursos, o producen mejores resultados con los mismos recursos. La eficiencia se relaciona entonces con el grado de aprovechamiento de los recursos.

El valor de potencialidad se asocia con el concepto de eficiencia y por lo tanto, con el de productividad. Se orienta a la mejor situación posible, con los recursos disponibles.

Estos indicadores están relacionados con aspectos internos. Son mejores o peores que algo (relativos). Dados en unidades producidas por recursos utilizados con respecto a lo esperado. Orientados al manejo de los parámetros de los procesos.

Según Beltrán (1999) un indicador correctamente compuesto tiene las siguientes características:

- a- Nombre del indicador.
- b- Procedimiento de cálculo.
- c- Unidad.
- d- Fuente de información.
- e- Frecuencia de la toma de datos.
- f- Valor de actualidad (capacidad).
- g- Meta.
- h- Frecuencia de análisis.
- i- Responsables del análisis.

Los elementos mencionados van a permitir realizar el diseño de los indicadores de gestión.

Para el estudio que estamos investigando los indicadores de gestión que se seguirán, medirán y analizarán van ser los de eficacias (asociados a resultados) para obtener el seguimiento, medición y análisis del proceso. Son los siguientes:

- a. Índice de capacidad de proceso (ICP)
- b. Índice de productos conformes (IPC)
- c. Índice de objetivos (Ti)

Estos indicadores cumplen con las condiciones definidas en la norma ISO internacional que son:

- Ser de fácil acceso y cálculo.
- Ser representativo de procesos relevantes.
- Permitir el establecimiento de juicios sobre resultados.

Ahora definiremos los indicadores de gestión antes mencionados:

a. Índices de capacidad de proceso (ICP)

Kume (1990) cita una vez que hayamos comprobado que el proceso está bajo control (entonces cumple con una distribución normal), se realiza un estudio de las capacidades del proceso. Esto es para averiguar si el proceso cumple o no con las especificaciones.

Aguilar (2008) menciona que la capacidad de los procesos para cumplir las especificaciones se refiere a la uniformidad de los procesos medida como la variabilidad del producto, hay dos formas de pensar en esta variabilidad:

La variabilidad natural en un cierto tiempo (variabilidad instantánea), que determina la capacidad del proceso a corto plazo.

La variabilidad en el transcurso del tiempo, que determina la capacidad del proceso a largo plazo.

Es usual tomar  $6\sigma$  de la población, donde  $\sigma$  es la dispersión en la distribución de la característica de calidad del producto como medida de la capacidad del proceso.

Cuando el proceso está en estado de control, a la amplitud del intervalo de variabilidad de las observaciones individuales, se la denomina capacidad. A tal capacidad contribuirán entre otros, las características de las máquinas, el personal, el servicio de mantenimiento del proceso, que varían a lo largo del tiempo. Por este motivo se habla de capacidad a largo plazo, ver Fig. N° 2.19., (Bartes, et al, 1998).

También podemos preguntarnos sobre la capacidad de la máquina por sí sola. En tal caso nos referimos estrictamente a la variabilidad atribuible a la máquina cuando el resto de las características permanecen lo más homogéneas posible, lo cual ocurre a corto plazo y, por lo tanto, se denomina a esta capacidad de máquina, capacidad a corto plazo, (Bartes, et al, 1998).

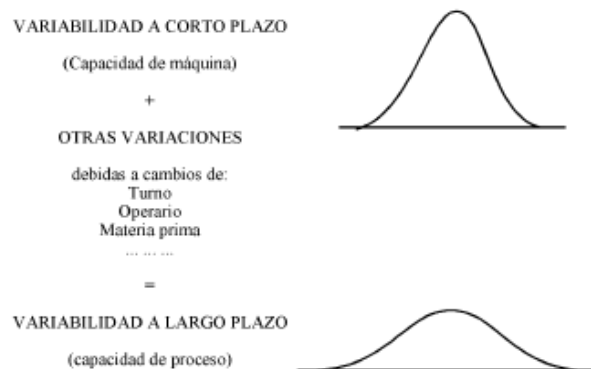


Fig. N° 2.19. Capacidad de máquina y de proceso, capacidad a corto y a largo plazo, (Bartes, et al, 1998).

Bartes, et al., (1998) menciona, que el cálculo de la capacidad de una máquina el proceso a seguir es el siguiente:

- a. Asegurarse de que la máquina se encuentra en estado de control.
- b. Tomar un mínimo de 50 unidades consecutivas (normalmente entre 50 y 100), midiendo para cada una la característica que se quiere estudiar.
- c. Verificar la normalidad de los datos. Esta verificación suele hacerse representando la función de distribución de los datos en diagramas probabilístico normal. Actualmente se prueba la normalidad mediante pruebas como Shapiro-Whils, Anderson Darling, etc.
- d. Estimar la desviación tipo del proceso o, directamente su capacidad.

La capacidad del proceso se determina igual que la capacidad de una máquina pero a partir de muestras tomadas en toda la variedad de condiciones en que debe trabajar la máquina (variedad de turnos, operarios, materias primas, etc.), y se toma el intervalo de  $6\sigma$  para definirla.

Bartes, et al., (1998) señalan que dado un proceso y su especificación diremos que es capaz, si puede producir dentro de las especificaciones exigidas, es decir, si su capacidad es menor que las tolerancias. Para poder comparar estas dos características se define un índice, el índice de capacidad, que es una medida de lo que se puede conseguir con el proceso teniendo en cuenta las especificaciones.

Los índices de capacidad son estimaciones numéricas de la capacidad del proceso, es decir, nos dan una idea de cuan capaz es el proceso (a que nivel cumple con las especificaciones). Estos estadísticos son muy útiles ya que no tienen unidades de

medida, por lo que permiten comparar distintos procesos. Básicamente, son el cociente entre la amplitud tolerable del proceso (distancia entre los límites de tolerancia o límites especificación), y la amplitud real o natural del proceso (distancia entre los límites de control es de  $6\sigma$ ).

Los índices de capacidad asociados con la variación a corto plazo son Cp, Cpk, CPS y CPI; por otro lado, los asociados con la variación a largo plazo son Pp, Ppk, PPS y PPI.

A continuación se muestran algunas referencias sobre cuando usar cada uno de los índices capacidad (IC), ver Tabla N° 2.5. (Mosquera-Artamonov, et al, 2014):

Tabla N° 2.5. Las fórmulas de los índices de capacidad, (Mosquera-Artamonov, et al, 2014).

Índice	Uso	Formula
Cp o Pp	El proceso está centrado en los límites de especificación.	$\frac{LSE - LIE}{6s}$
Cpk o Ppk	El proceso no está centrado en los límites de especificación, pero está contenido en ellos.	$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{LSE - m}{3s} \\ \frac{m - LIE}{3s} \end{array} \right\}$
CPS o PPS	El proceso solo tiene un límite de especificación superior.	$\frac{LSE - m}{3s}$
CPI o PPI	El proceso solo tiene un límite de especificación inferior.	$\frac{m - LIE}{3s}$

En la práctica, se suele considerar que es 1,33 es valor mínimo aceptable para un índice de capacidad (es decir, cualquier valor por debajo de esta cifra indicaría que, aunque este bajo control estadístico, el proceso no cumple con las especificaciones deseadas), un resumen de lo mencionado, se puede observar en la Tabla N° 2.6. (Mosquera-Artamonov, et al., 2014):



Tabla N° 2.6. Tabla de decisiones según el valor de ICP, (Mosquera-Artamonov, et al., 2014).

ICP	Decisión
$IC \geq 1,33$	Más que adecuado (Capaz)
$1,00 \leq IC < 1,33$	Adecuado para lo que fue diseñado.
$0,67 < IC < 1,00$	No es adecuado para cumplir con el diseño inicial (No es capaz).

El análisis de la capacidad de proceso proporciona una evaluación de la variabilidad inherente de un proceso y una estimación del porcentaje de elementos no conformes que pueden esperarse. Esto permite que la organización estime los costos de la no conformidad, y pueda ayudar a guiar las decisiones con respecto a la mejora del proceso.

Estos índices permiten analizar cuando el proceso requiere de un mantenimiento y cuando sólo se requiere cambiar cierto parámetro de la operación.

Con estos indicadores nos permitirá conocer que procesos necesitan mejorar su desempeño o en cuales existe una oportunidad de mejora, para establecer medidas oportunas que permitan corregir los procesos con mal desempeño y permitir que estos logren sus propósitos y metas establecidos.

b. Índice de productos conformes (IPC)

Este indicador nos va permitir medir la cantidad de producto conforme que entrega el proceso y su fórmula es:

$$\text{Índice Producto Conforme} = \frac{(\text{Productos suministrados} - \text{Productos devueltos}) \times 100}{\text{Productos suministrados}}$$

c. Índice de objetivos (Ti)

El Ti indica qué tan cercano se encuentra el promedio de los resultados obtenidos en la inspección con respecto al objetivo. Un Ti igual a cero significa que el producto acuerda con el objetivo. Cuanto más cerca este de cero, mejor. En la Fig. N° 2.20., se muestra la ecuación del índice (Yep leung, 2011).

$$T_i = k = \frac{|\mu - T|}{\frac{1}{2}(U - L)}$$

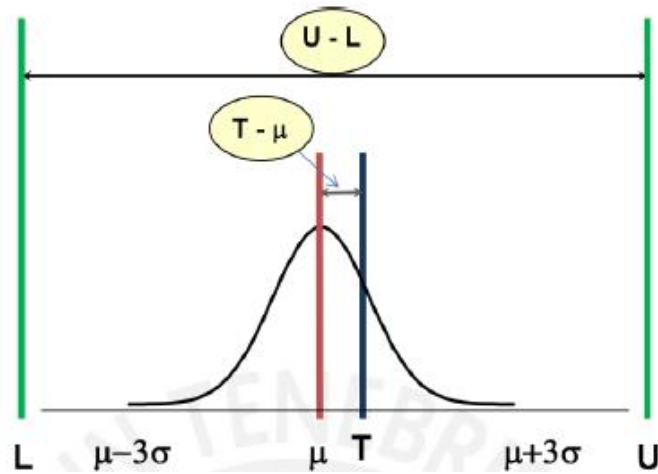


Fig. N° 2.20. Gráfica y la ecuación  $T_i$ , (Yep leung, 2011).

#### 2.7.6.2. Cuadro de mando

El cuadro de mando deriva del concepto denominado tableau de bord en Francia, que traducido de manera literal vendría a significar algo así como tablero de mandos o cuadro de instrumentos, puede también ser expresado en el idioma español como tablero de abord o tablero comando. Esto parece ser debido a que sus resultados son mostrados como tablas dinámicas donde se reflejan los resultados de objetivos, indicadores y estrategias. Es de señalar que los cuadros de mando no solo muestran los resultados de las variables, también pueden acceder a reportes, bases de datos y facilitar etapas de control y comunicación.

La norma UNE 66175:2003 define como cuadro de mando a la herramienta de gestión que facilita la toma de decisiones, y que recoge un conjunto coherente de indicadores que proporcionan a la alta dirección y a las funciones responsables una visión comprensible del negocio o de su área de responsabilidad. La información aportada por el cuadro de mando, permite enfocar y alinear los equipos directivos, las unidades de negocio, los recursos y los procesos con las estrategias de la organización.

El cuadro de mando es una herramienta de acción a corto plazo de implementación rápida y estrechamente ligado a los puntos clave de decisión y de responsabilidad de la empresa. En términos generales el cuadro de mando es una herramienta de ayuda a la gestión, en sí mismo no es un objetivo, sino un efecto que ha de estar orientado hacia la acción.

Un cuadro de mando es la representación simplificada de un conjunto de indicadores que dan una idea de cómo se está comportando un área o un proceso de nuestra empresa. La finalidad de un cuadro de mando es la de evidenciar la necesidad de tomar acciones para alcanzar los objetivos previstos y mejorar los procesos. El cuadro de mando permite monitorear el indicador de forma sencilla, son herramientas para la medición de diferentes variables.

ICONTEC (2016) señala que las características de los cuadros de mando son:

- Presentar solo información relevante de una forma sencilla y resumida.
- Evidenciar los parámetros que no evolucionan como estaba previsto.
- Simplificar su presentación mediante gráficos, tablas, curvas, cuadros de datos, etc. (juego de colores).
- Uniformidad en su elaboración para facilitar el contraste de resultados entre procesos.
- Se elaboran periódicamente y facilitan la evaluación en el corto plazo.

Los principios para el uso de los cuadros de mando son los siguientes (ICONTEC 2016):

- En estructura organizacional bien definida con responsabilidades predeterminadas.
- Para flujo permanente, sistemático y objetivo de la información.
- Para lograr la convergencia de objetivos, coherencia de políticas y unidad de criterio respecto a los factores clave de desarrollo.

## **2.8. Antecedentes de la aplicación de las herramientas de calidad en la industria aeronáutica**

Históricamente, los altos requisitos de seguridad en el sector aeronáutico resultaban en que la industria (constructores y proveedores) centraran sus esfuerzos en el ámbito de calidad en aspectos fundamentalmente concernientes al producto. Sin embargo, en los últimos años este sector comparte con otros segmentos de actividad industrial, como automoción o electrónica, la necesidad de ser competitivos en coste y plazo, garantizando a la vez la calidad en producto, (Hernán, 2009).

AERTEC Solutions (2016) cita que la industria aeronáutica se parece cada día más a la industria de automoción, al menos en los aspectos relacionados con la

optimización de los procesos productivos. Las técnicas de mejora que habitualmente se asociaban al sector del automóvil, han ido progresivamente incorporándose en el sector aeronáutico, de forma cada vez más consolidada y personalizada a las necesidades de fabricación.

En la última década, los ingenieros que trabajan en este sector han incorporado nuevos términos al vocabulario sobre mejora de procesos, de esta forma hablamos cada vez con más frecuencia de modelos de gestión y técnicas tales como Lean Manufacturing y sus herramientas (5S, Estandarización, VSM, etc.), 6Sigma, TQM, Just in time. Esta tendencia se debe fundamentalmente al fuerte crecimiento de las unidades producidas y a las previsiones de aumento de la flota mundial de aeronaves.

La evolución de los métodos de mejora en el sector aeronáutico ha sido mucho más pronunciada con el boom tecnológico, siguiendo el ritmo de la evolución de la potencia de los ordenadores y de los programas de simulación de procesos productivos.

La industria aeronáutica, como todas las demás, está sometida a un continuo proceso de mejora e innovación. Sin embargo, cada pequeño desarrollo en este campo es mucho más delicado, largo y costoso que en cualquier otro sector.

Hernán (2009) hace mención que la tendencia es claramente la mejora de procesos desde el punto de vista de Lean Manufacturing a través de la implantación de sistemas de mejora continua que permiten analizar y localizar desperdicios (calidad, eficiencia, plazo) en base al análisis de indicadores de proceso, y la definición de planes de acción para eliminar los desperdicios. Estos sistemas de mejora continua sólo pueden funcionar si se entienden como una parte más del proceso productivo y constan de todos los elementos, métodos de trabajo y sistemas de soporte necesarios.

TÜV SÜD (2017) menciona que la aviación está comprometida con la seguridad. De ahí la importancia de los sistemas de gestión de calidad de acuerdo con la norma SAE/AS 9100 et seq. en la industria aeroespacial. Estos sistemas permiten cubrir todos los requisitos de calidad de la empresa y el enfoque hacia la mejora constantemente.

SAE/AS 9100 et seq., “Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos para las organizaciones de aviación, espaciales y de defensa”. Es decir que esta norma establece el procedimiento de certificación de organizaciones y define la acreditación de las empresas certificadoras.

Las series SAE/AS 9100 están apoyadas y adheridas a los mayores fabricantes de la industria aeronáutica. Basada en la ISO 9001:2000, hace especial hincapié en la calidad, seguridad y tecnología. Todas las áreas de la industria y de la cadena de suministro están incluidas. Esta norma está compuesta de la siguiente manera, ver Fig. N° 2.21.:

La mejora se presenta como un objetivo permanente de las empresas. La gestión de la calidad es el cumplimiento de los requisitos pactados con el cliente pero además de esto, la gestión de la calidad se ha convertido en la herramienta para llevar a cabo la mejora continua de los procesos.



Fig. N° 2.21. Esquema de la norma AS/EN9100, (International Dynamic Advisors, 2016).

El estado del arte de los métodos estadísticos para el control y la mejora continua aplicado a los procesos metalúrgicos referentes a la fabricación de aeropartes lo propone, Jiménez (2015). Aplicó la metodología Seis Sigma para solventar un problema real: la necesidad de reducir los defectos que se producían en la instalación de unas piezas críticas en la línea de montaje. Los defectos causaban la inutilidad de piezas, horas excesivas de reparaciones, número elevado de hojas de no conformidad. Se aplicó la metodología Seis Sigma mediante el proceso DMAIC, debido a que además de ser el proceso más comúnmente utilizado, era el más adecuado para el problema, puesto a que se trataba de mejorar un proceso ya existente. Como resultados lograron que en los meses estudiados se cumplieran los objetivos establecidos, se pasó de un nivel sigma de 2.65 al 3.85, muy próximo al nivel 4 $\sigma$  exigido en el sector aeronáutico.

Estas herramientas son propuestas también por, Cardenas & Guerra (2009) para aplicarlas en una empresa de forjado de Colombia, para el rubro automotriz, petróleo y otros sectores. Con el objetivo de diseñar e implementar un sistema de control estadístico de proceso bajo la metodología seis sigmas, que le permita a la empresa contar con información clara veraz y oportuna acerca del desempeño y la capacidad de los procesos de fabricación de las líneas de juntas fijas, espigos, tripodes y bocin. Como resultado lograron que gracias a la realización de los estudios preliminares, la empresa por primera vez pudo contar con información clara y veraz (basada en datos estadísticos), acerca del comportamiento de los procesos de forja, lo cual, a su vez, impulso un proceso de análisis y comprensión más profunda de los problemas de variabilidad y sus principales causas, que permitió que se tomaran importantes decisiones con miras a eliminar dichas causas.

# **CAPÍTULO 3**

## **ANTECEDENTES**

### **GENERALES:**

#### **ALUMINIO**

“Puedes hacer todo lo que piensas que puedes, pero nunca más que eso; si tienes miedo de ti mismo, no habrá mucho para ti, pues el fracaso viene desde el interior. Puedes ganar, aun enfrentando lo peor, solo si piensas y sientes que podrás hacerlo”.

EDGAR A. GUES

### **3.1. Características generales del aluminio**

Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar (con respecto a los aceros) en los materiales que se utilizan con fines estructurales. Tienen una densidad de solo 2,7 g/cm<sup>3</sup> (aproximadamente un tercio del acero (7,83g/cm<sup>3</sup>); 28316 cm<sup>3</sup> de acero pesa alrededor de 222 Kg; 28316 cm<sup>3</sup> de aluminio, solo alrededor de 77 Kg. Este peso tan leve, junto con la alta resistencia en algunas aleaciones de aluminio (próxima o similar a la de algunos aceros estructurales), permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, particularmente ventajosas en vehículos espaciales, aviones, y en todo tipo de vehículos terrestres y náuticos, de acuerdo a lo citado por Maffia (2013).

El aluminio y sus aleaciones ocupan desde hace más de 30 años un lugar destacado en la industria del transporte y la automoción, pues el material cuenta con características especiales de alta dureza, ligereza, resistencia mecánica, gran resistencia a la corrosión, flexibilidad, apariencia, facilidad de conformado, maquinabilidad, conductividad eléctrica y térmica, las cuales son indispensables para la creación de aeronaves (sector aeronáutico), siendo ésta, una de sus aplicaciones más importantes en la actualidad, (Polmear, 1981).

Precisamente, la condición de ligereza que presentan las aleaciones de aluminio, ha conllevado a la industria a emplearlas en la construcción de aeronaves, proporcionándole a estos vehículos un menor peso, hecho que da ventajas adicionales, tales como la reducción en el consumo de combustibles y una disminución notable de los gases emitidos por los aviones que causan graves daños a la atmósfera.

### **3.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio**

Maffia (2013) menciona que las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grupos, dependiendo del proceso de fabricación:

- Aleaciones forjables (wrought alloys)
- Aleaciones fundidas (casting alloys)

De estos dos tipos de aleaciones nos vamos a centrar en las aleaciones forjadas que se dividen en dos grupos:

- Aleaciones no tratables térmicamente.
- Aleaciones tratables térmicamente.



Las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente no pueden ser endurecidas por precipitación y solamente pueden ser trabajadas en frío para aumentar su resistencia.

Algunas aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente pueden ser endurecidas por precipitación con tratamientos térmicos, como ser las series 2xxx(Al-Cu, Al-Cu-Mg), 6xxx(Al-Mg-Si) y 7xxx(Al-Zn-Mg).

### **3.3. Propiedades de la aleación de aluminio AA2024**

El aluminio y sus aleaciones son comúnmente agrupados en series y se rigen principalmente por las normas AA (Aluminum Association).

Las principales series utilizadas en la industria aeroespacial son la 2xxx, 6xxx y 7xxx, aunque suelen ser utilizadas algunas otras como la serie 5xxx.

La aleación de uso aeronáutico que se estudió es la AA2024 (denominada Duraluminio) que pertenece al primer grupo, porque se puede lograr productos en forma de: placas laminadas (mayor de 6 mm de espesor), chapas (0,15 a 6 mm), papel de aluminio (menos de 0,15 mm espesor), extrusiones, tubos, varillas, barras y alambres. Estos productos son producidos a partir de lingotes fundidos, cuyas características estructurales son considerablemente modificadas por las variadas operaciones de deformación y tratamientos térmicos.

La aleación AA2024 también presenta resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga (tracción y cortadura) y permeabilidad magnética.

En los aviones se utiliza para construir piezas que están solicitada por fatiga, rigidez y resistencia, por ejemplo estructuras de fuselaje, partes de las alas que están bajo tensión, cinta de corte y cordones, recubrimientos de fuselaje, recubrimientos de las alas y áreas del motor donde se encuentran afectadas a temperaturas del orden de 121°C.

#### **3.3.1. Composición química**

La aleación de aluminio AA2024 presenta al cobre como el principal elemento de aleación (Al-Cu) y el magnesio como una adición secundaria. En la Tabla 3.1. se detalla la composición química.

Tabla 3.1. Composición química de la aleación AA2024, (Bogotá Anzola & Galindo Pabón, 2015).

Elemento	Mín. (%)	Máx. (%)
Silicio	---	0,5
Hierro	---	0,5
Cobre	3,8	4,9
Magnesio	1,2	1,8
Manganeso	0,3	0,9
Cromo	---	0,1
Zinc	---	0,25
Titanio	0	0,15
Aluminio	El resto	

### 3.3.2. Propiedades físicas

En la Tabla 3.2. se detalla la conductibilidad eléctrica de la aleación AA2024 para diferentes estados de tratamiento térmico.

Tabla 3.2. Conductibilidad eléctrica de la aleación AA2024 (ASM Handbook, 1990).

Estado de tratamiento térmico	Conductibilidad eléctrica en % IACS
O	50
T3, T36, T351, T361, T4	30
T6, T81, T851, T861	38

### 3.3.3. Características de fabricación

Temperatura de recocido: 413 °C

Temperatura de solubilizado: 493 °C

Temperatura de envejecido: T6 y T8: 191 °C (375 °F) de 8 a 16 hs a temperatura.

### **3.4. Tratamiento térmico de la aleación de aluminio**

Para obtener mejores propiedades mecánicas, las aleaciones AA2024 son tratadas térmicamente, logrando propiedades que exceden a aquellas de los llamados aceros de bajo carbono o dulces.

Los tratamientos térmicos son un modo importante de cambiar la resistencia, dureza, ductilidad y otras propiedades de los metales. Los tratamientos térmicos involucran varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios de la estructura metalúrgica o el estado de esfuerzos residuales en un producto metálico. Finalmente, podemos decir que la función de un tratamiento térmico es desarrollar un balance deseado de propiedades mecánicas requeridas para su servicio en forma consistente.

Los tratamientos térmicos que se puede realizar sobre el aluminio y sus aleaciones forjadas son los siguientes:

- Solubilización
- Temple
- Envejecido artificial y natural
- Recocido de ablandamiento, estabilización
- Recocido de restauración y recristalización
- Recocido homogeneización.

El estudio se va centralizar en el tratamiento térmico de bonificado que consta de tres etapas perfectamente definidas: solubilización, temple y envejecido (Roldán Galán, 2013).

En primer lugar, se ha de calentar la aleación a temperatura y tiempo determinados, seguido de un enfriamiento brusco, como se observa en la Fig. N° 3.1.

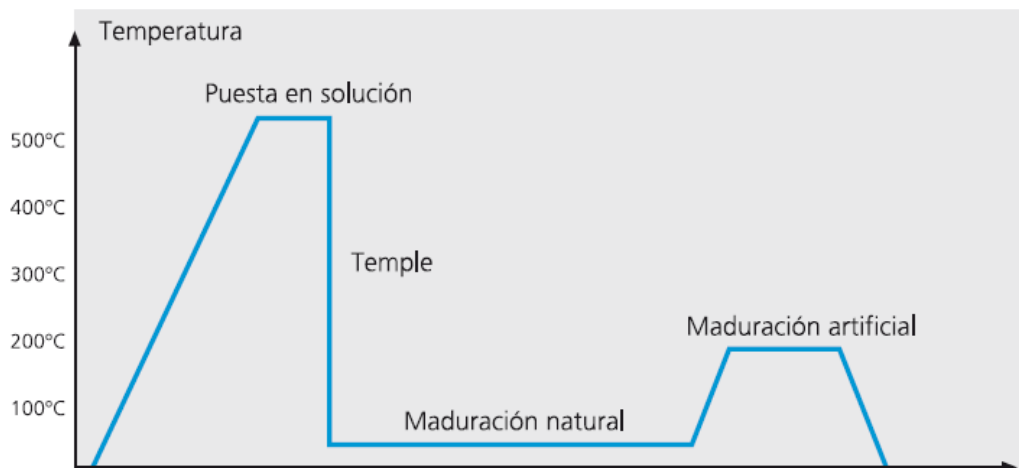


Fig. N° 3.1. Representación del ciclo de calentamiento y enfriamiento del tratamiento térmico de bonificado (Alu - Stock, 2012).

El aluminio puede formar soluciones sólidas con la mayoría de los metales considerados como elementos de aleación (Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ti, Si y Zn). Las modificaciones de las propiedades, logradas por el tratamiento térmico de bonificado de las aleaciones de aluminio, son debidas a reacciones de solución y precipitación de ciertos constituyentes en función de la temperatura. Este tratamiento sirve entonces para aumentar la resistencia mecánica en la aleación por medio de un endurecimiento por precipitación.

A continuación, se desarrollara cada una de las etapas del tratamiento térmico de bonificado.

### 3.4.1. Solubilización

Consiste en calentar a los componentes a temperaturas de 430 y 550 °C, manteniéndolas un tiempo determinado para obtener una solubilidad completa de los elementos de aleación (región de una sola fase), y al enfriar la aleación se obtienen condiciones inestables (región de sobresaturación de soluto en la fase).

Durante el mantenimiento prolongado a esta temperatura, los compuestos intermetálicos del tipo  $Mg_2Si$  para aleaciones de la serie 6XXX, del tipo  $Al_2Cu$  para series 2XXX, se re disuelven y la aleación forma entonces una solución solida homogénea.

La temperatura de solubilización, para un tiempo determinado de las aleaciones de aluminio de endurecimiento estructural, debe ser regulada con precisión para no alcanzar las temperaturas eutécticas, ver Fig. N° 3.2.

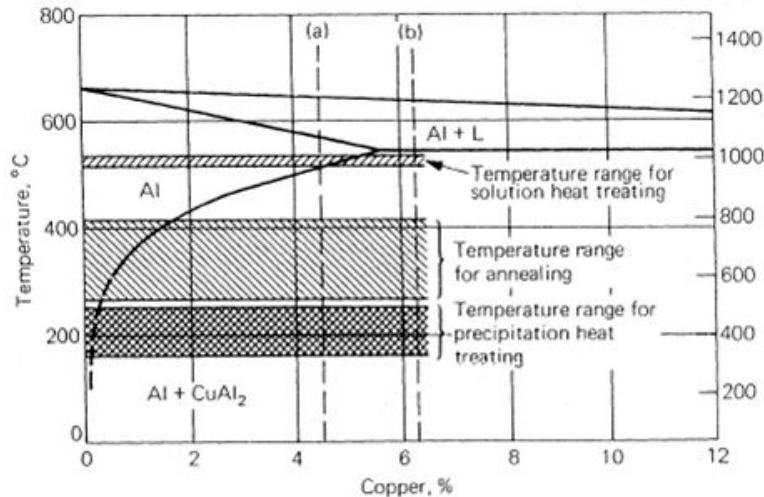


Fig. N° 3.2. Diagrama parcial de equilibrio Al-Cu (Roldán Galán, 2007).

El tiempo a una temperatura nominal para que se lleve a cabo completamente el tratamiento de solubilización, es una función de la microestructura antes del tratamiento y de las dimensiones de la pieza. Este tiempo a temperatura puede variar desde menos de un minuto para láminas delgadas hasta 20 hs para masas grandes.

### 3.4.2. Temple

El enfriamiento rápido se relaciona con la rapidez con la que el metal pierde temperatura desde el tratamiento de solubilizado (típicamente entre 465-565 °C, para aleaciones de aluminio), hasta la temperatura ambiente y se aplica después del tratamiento de solubilización. Después del temple las aleaciones son fácilmente deformables, por tanto para obtener la tenacidad máxima la velocidad de temple debe ser tres veces más rápida que la velocidad crítica de temple.

El objetivo principal es el mantener la estructura de solubilidad completa, pero a temperatura ambiente estará en un estado metaestable llamándole en ese momento una solución sólida sobresaturada (SSS) de los elementos de aleación en el aluminio. Un medio de enfriamiento comúnmente usado es agua a temperaturas inferiores a 40 °C.

Se desprende que en esta operación son varios los factores a considerar para obtener velocidad de enfriamiento adecuada, entre los que figuran como principales la

naturaleza (calor específico) y temperatura del fluido utilizado, que definen su potencial refrigerante, la repartición de masas en el material a enfriar, que viene definida por la relación superficie volumen de las piezas tratadas, y por último, el tiempo transcurrido desde que el material pasa de la temperatura inicial a la final, dependiente del grado de mecanización de la operación de temple.

La velocidad crítica de temple puede definirse como la mínima velocidad de enfriamiento que es capaz de retener los átomos de soluto en solución, es decir, que evita la descomposición de la solución sólida y depende principalmente de la composición de la aleación.

La velocidad de enfriamiento, además de afectar las características mecánicas, tiene una influencia significativa sobre la resistencia a la corrosión de la mayoría de aleaciones de aluminio.

### **3.4.3. Envejecido**

Es el último paso en el tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio. Consiste en mantener la muestra a cierta temperatura durante un tiempo para que precipiten los elementos de aleación.

Se obtiene una descomposición controlada de la solución sólida sobresaturada (SSS) para formar precipitados finos y dispersos, usualmente, por tiempos convenientes a temperaturas por debajo de la línea de solubilidad en el diagrama de fases.

Después del temple, la SSS está en un estado metaestable. La vuelta al equilibrio, es decir, la precipitación de los compuestos intermetálicos que provocan el endurecimiento estructural, se puede hacer de dos maneras:

a- Por envejecido (maduración) a temperatura ambiente (envejecido natural o age hardening). Después de un reposo de varias horas, que depende de las aleaciones, la dureza y las características mecánicas no aumentan. La precipitación y el endurecimiento estructural han terminado.

b- Por envejecido artificial (endurecimiento por precipitación o precipitation hardening), es decir un calentamiento de varias horas (5 a 48 hs) entre 115 y 190 °C. Este envejecido acelera la precipitación. Se realiza inmediatamente después del temple. Las condiciones de este envejecimiento dependen de las aleaciones.

La tercera etapa del tratamiento de bonificado cuando se realiza el envejecido natural, se caracteriza por la formación de aglomeraciones submicroscópicas de átomos que dificultan las deformaciones plásticas y endurecen la aleación.





# **CAPÍTULO 4**

## **DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y EXPERIENCIAS**

“Nuestras vidas mejoran cuando tomamos riesgos, el primero y más difícil de todos los riesgos es el de ser honestos con nosotros mismos”.

WALTER ANDERSON

65

El presente trabajo se llevó en campo, en forma aplicada, controlando las variables del proceso productivo, de manera tal de analizar los eventos producidos de manera habitual. Para obtener información relevante del proceso, se efectuó un estudio experimental mediante el diseño de experimentos y a partir de los resultados obtenidos se propusieron cambios que permiten promover la mejora continua.

De esta manera, este trabajo consistió en desarrollar una metodología para el control y la toma de decisiones que promueva la mejora continua del proceso productivo objeto de estudio. La metodología consiste en alcanzar los objetivos planteados por medio de una investigación exploratoria y descriptiva.

#### **4.1. Descripción del proceso de tratamiento térmico en estudio**

Para la investigación se utilizará un horno de tratamiento térmico para piezas de aluminio del sector aeronáutico de alta precisión de temperatura. Éste, se encuentra montado en una línea de producción.

Las partes principales que componen el horno son las siguientes, observar Fig. N° 4.1.:

1- Horno: tiene una puerta en la parte inferior tipo guillotina con desplazamiento horizontal, para carga/descarga del canasto. El rango de temperatura es de 100 a 600 °C y uniformidad de temperatura  $\pm 5$  °C, (ver Fig. N° 4.2.).

Para la medida de la temperatura en el horno se utilizan 20 termopares de chromel-alumel. La instalación de medida de temperatura consta del termopar, los cables compensadores y el instrumento de medida.

2- Carro: permite el desplazamiento del canasto de carga/descarga y la cuba de enfriamiento en agua.

3- Cuba de enfriamiento: está montada sobre el carro para recibir el canasto caliente con piezas del horno y hacer el enfriamiento rápido de la carga. Usa como líquido de enfriamiento agua. El tiempo transferencia desde horno al tanque de temple es: regulable de 6 a 10 seg. Esta cuba tiene una capacidad de almacenamiento de 33500 litros de agua limpia y tratada.

La indicación de la temperatura del agua se realiza por dos termocuplas, montadas en el tanque, una en la parte inferior y la otra en la parte superior. La temperatura del agua es menor a 38 °C.

4- Canasto de carga: en este se montan las piezas para ser tratadas.

5- Instalación: totalmente automática, los comandos son manejados por medio de computadora.

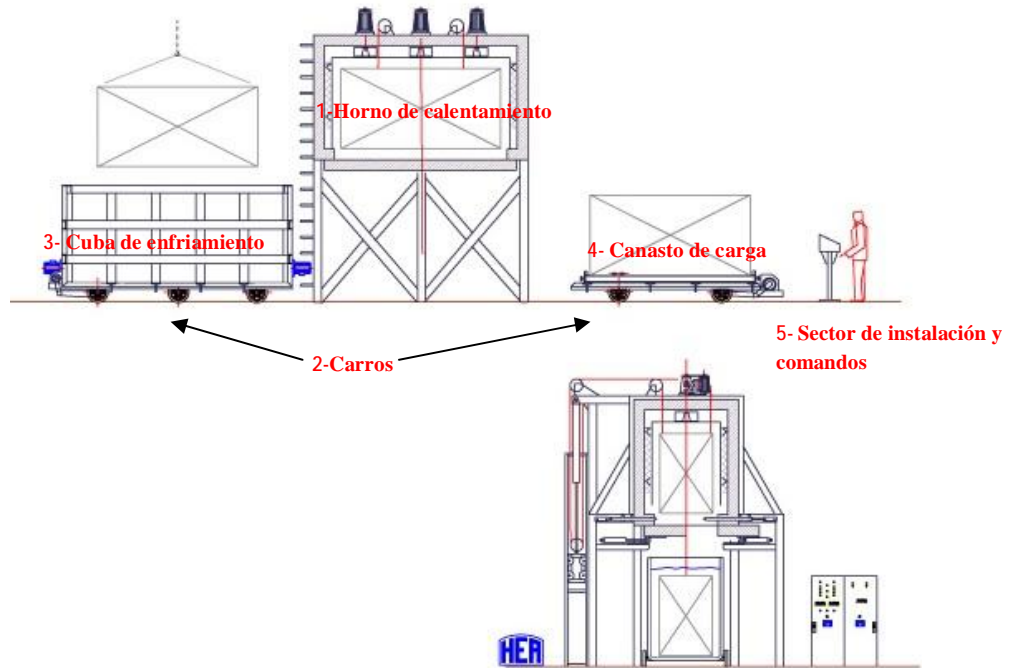


Fig. N° 4.1. Esquema del horno de tratamiento térmico (Hornos Industriales Alferieff, 2013).

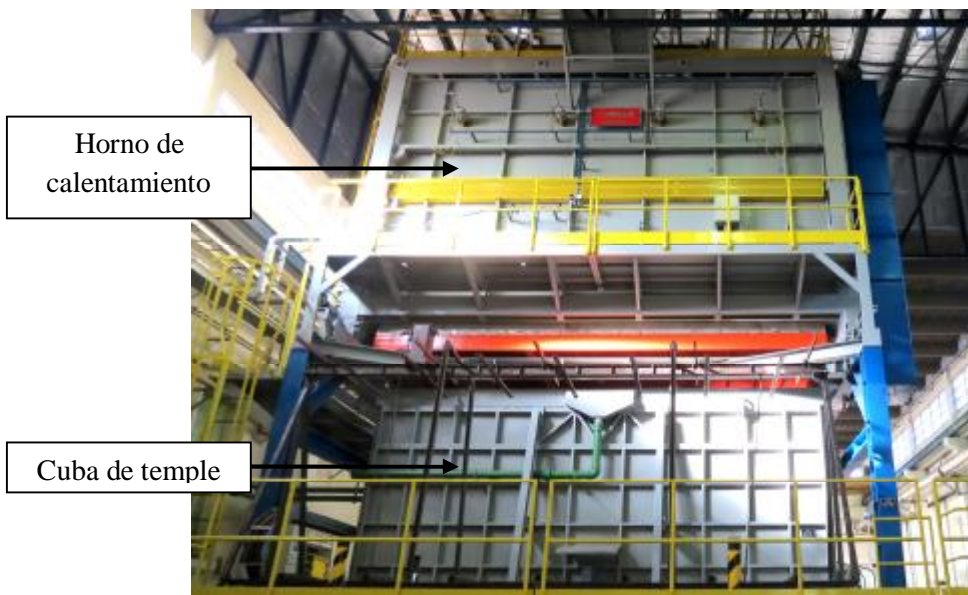


Fig. N° 4.2. Horno de tratamiento térmico para aleaciones de aluminio (Secretaría de Ciencia, Tecnología y Producción para la Defensa, 2013).

Para el relevamiento de los parámetros del proceso del horno, se utiliza el sinóptico del horno (Fig. N° 4.3.), que nos permite acceder a los comandos, mostrar el equipo para el control de la temperatura, ciclo de horno, tipo de programa del tratamiento térmico a realizar, control de la temperatura (tanque de agua, de mantenimiento), set point de la temperatura, tiempo de proceso (calentamiento e inmersión en el tanque de agua), estado de los motores, puertas, comandos de calentamiento, carro y ascensor.

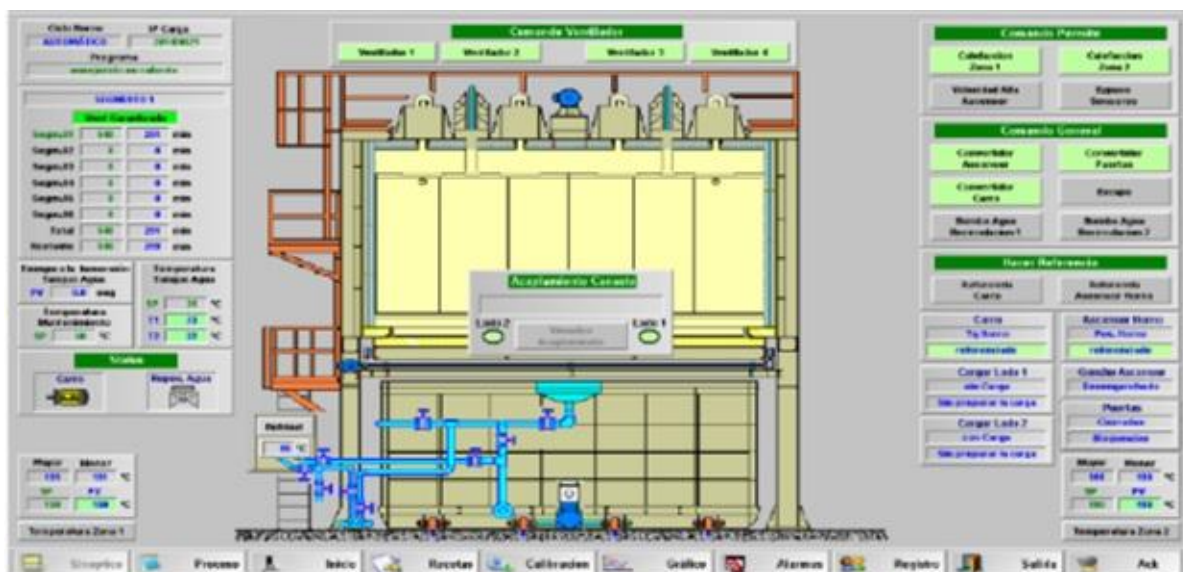


Fig. N° 4.3. Sinóptico del horno (Grupo Combustol & Metalpo, 2011).

El tratamiento térmico que se estudió en este trabajo consiste un proceso integral de solubilizado, seguido de un temple, con un posterior envejecido natural, denominado tratamiento térmico de bonificado. El ciclo básico de calentamiento para llevar a cabo el tratamiento térmico de bonificado es el que se muestra en la Fig. N° 4.4.

Como mencionamos anteriormente el material que se empleó para el estudio consiste en chapas de espesor variables de 0,5 a 0,63 mm, fabricadas de la aleación de aluminio AA2024.

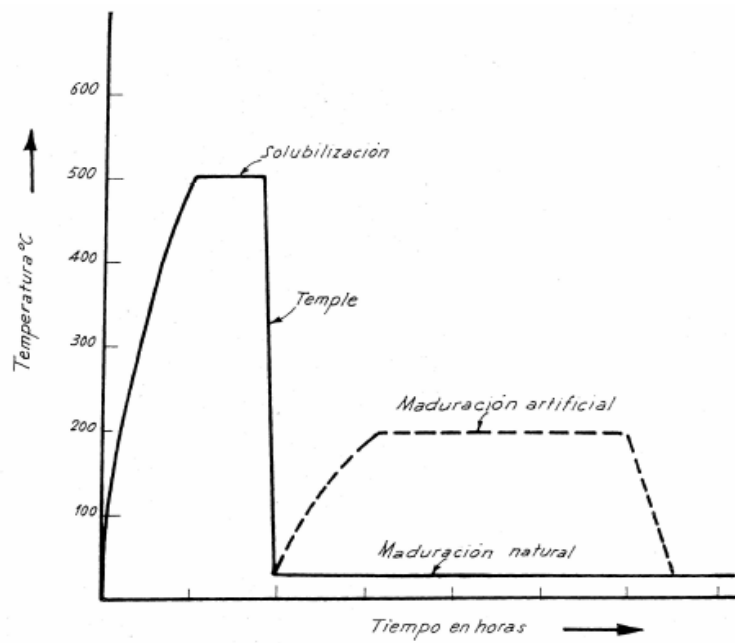


Fig. N° 4.4. Ciclo de calentamiento del tratamiento térmico de bonificado (Roldán Galán, 2007).

Flujograma del proceso de tratamiento térmico de bonificado e incluye las siguientes etapas, según norma MIL-H-6088G, mostradas en la Fig. N° 4.5.:

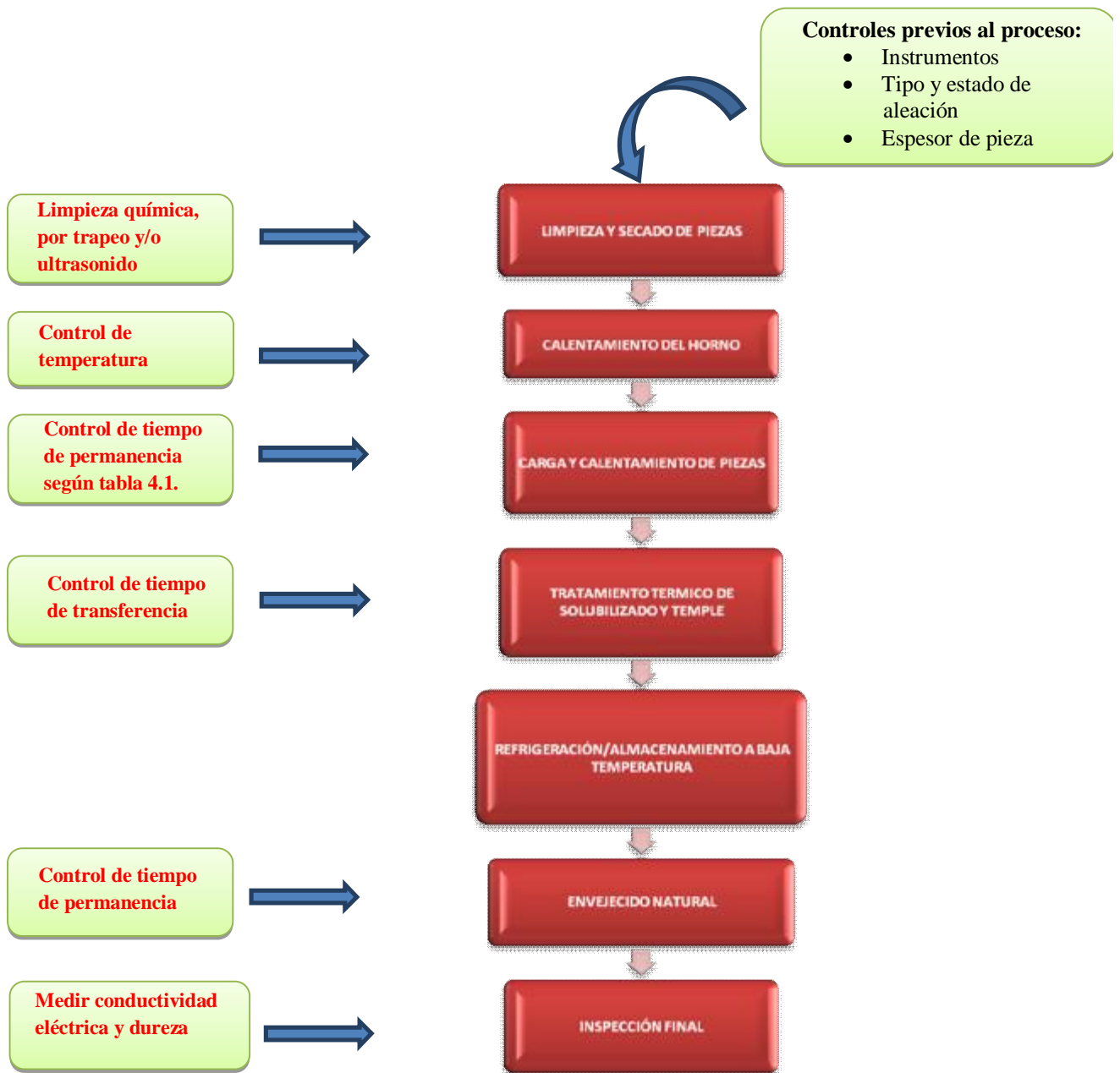


Fig. N° 4.5. Flujo de proceso del tratamiento térmico de bonificado (norma MIL-H-6088G).

A continuación, se efectúa una breve descripción de las etapas del proceso:

#### ***4.1.1. Limpieza y secado de piezas***

Se realizó previamente al tratamiento de solubilizado. Todas las piezas estuvieron libres de polvo, grasa, aceite, residuos metálicos, óxidos u otros elementos que pueden perjudicar el proceso. Además, antes de ingresar las piezas al horno estuvieron completamente secas.

#### ***4.1.2. Calentamiento del horno***

Para este estudio se utilizó una temperatura de solubilizado de 493 a 498 °C, siendo esta, la temperatura de trabajo.

#### ***4.1.3. Carga y calentamiento de piezas***

Una vez que las piezas son ensambladas en el canasto de carga, se desplazó el carro con el canasto hasta alinearlos con el horno. Luego, se abrió la puerta de fondo del horno y se elevó el canasto de carga para realizar el tratamiento térmico correspondiente.

En el momento que se cerró la puerta del horno se movió el carro del canasto de carga y se alineó con la cuba de temple (Fig. N° 4.2.).

El agua de la cuba se encontraba inicialmente a una temperatura de 32 °C.

#### ***4.1.4. Tratamiento térmico de solubilizado y temple***

Inmediatamente después de la estabilización de la temperatura, con la carga completa, se controló el tiempo de permanencia para el tratamiento de solubilizado, el cual depende del espesor de la pieza ver Tabla 4.1.

Se comenzó a contabilizar el tiempo de permanencia a partir del momento en que el horno alcanzó el rango correcto de temperatura del tratamiento de solubilizado.

Tabla 4.1. Tiempo de permanencia de solubilización en función del espesor de la chapa, (Grupo Combustol & Metalpo, 2011).

\* Se debe comenzar a contabilizar el tiempo de permanencia a partir del momento en que el horno alcance el rango correcto de temperatura del tratamiento de solubilizado.

Espesor (mm)	Tiempo de permanencia a temperatura (minutos)*
0,41 – 1,60	30
1,61 – 2,29	35
2,30 – 3,17	40
3,18 – 6,35	50

Cuando se cumplió el mantenimiento a temperatura en el tratamiento de solubilizado, se abrió la puerta del horno y se introdujo el canasto con piezas por gravedad en la cuba de agua para su temple en un tiempo máximo de demora en la transferencia de carga que es en función del espesor mínimo, y se efectuó de acuerdo a la Tabla 4.2. El tiempo de inmersión en la cuba comienza desde que se abre la puerta del horno y finaliza cuando la última pieza de la carga se sumerge en la cuba de enfriamiento.

Tabla 4.2. Tiempo máximo de transferencia de carga al medio templante, (norma MIL-H-6088G).

Espesor mínimo		Tiempo máximo (segundos)
Mm	Pulgadas	
Hasta 0,41 inclusive	Hasta 0,016 inclusive	5
0,41 a 0,79	0,016 a 0,031	7
0,79 a 2,29	0,031 a 0,090	10
Por encima de 2,29	Por encima de 0,090	15

Luego que el material se ha retirado del medio de enfriamiento se obtiene una condición que se denomina AQ(As-Quenched), este estado dura 15 minutos en el material AA2024. Una vez que se supera el tiempo mencionado, el material pasa a la condición W (la cual es inestable) estando el mismo a temperatura ambiente.

La condición AQ favorece la operación de conformado.



#### **4.1.5 Refrigeración/almacenamiento a baja temperatura**

Cuando sea necesario mantener una condición AQ por mayor tiempo que lo indicado en Tabla 4.2., para una posterior conformación u otro tipo de procesamiento que requiera esta condición, se debe conservar en refrigeración a baja temperatura conforme a lo indicado en Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Prolongamiento de condición, (norma SAE AMS 2770E).

Temperatura de almacenamiento(AQ) (°C)	Máximo tiempo de almacenamiento
-12 máxima	1 día
-18 máxima	30 días
-23 máxima	90 días

#### **4.1.6. Envejecido natural**

Una vez que se produjo el conformado de las chapas que se encontraban en la cámara frigorífica, se estableció un tiempo de 96 hs de permanencia a temperatura ambiente. De esta forma, se esperó que la aleación AA2024 logre una estabilidad o transformación espontánea y relativamente lenta, conocida como envejecimiento natural, pasando al estado de tratamiento térmico que se designa como T42.

#### **4.1.7. Inspección final**

Finalizado el proceso de envejecido natural se midió la conductividad eléctrica, la dureza y se controló que las piezas no hayan sufrido deformación, oxidación de su superficie, etc.

#### 4.2. Ensayos sobre los productos finales obtenido en el tratamiento térmico

Los controles que se realizan en el proceso se detallan en la Tabla 4.4.:

Tabla 4.4. Ensayos efectuados en el producto, (norma MIL-H-6088G).

Material	Ensayos	Especificación
AA2024-O	Conductividad eléctrica	27,5 – 35% IACS
	Dureza	100 HB mín. 16 Hw mín.
	Resistencia a la tracción	44 kg/mm <sup>2</sup> mín.
	Límite de fluencia	27 kg/mm <sup>2</sup> mín.
	Alargamiento	11% mín.
	Corrosión intergranular	0,125 mm máx.
	Porosidad y fusión	Libre
AA2024-O	Difusión de Alclad	40 % máx. espesor

De estos controles, se usó para el estudio, el ensayo de la conductividad eléctrica (ver Tabla 4.5.), que se tomó sobre las piezas con tratamiento térmico de bonificado.

Tabla 4.5. Ensayo a efectuar en el estudio, (norma MIL-H-6088G).

Material	Ensayos	Especificación	Técnica de medición
AA2024	Conductividad eléctrica	27,5 – 35% IACS	Instructivo IC-01 (ver Anexo 5)

No se consideró el resto de los ensayos porque generalmente son utilizados para poner en evidencia fallas que ocurre en el proceso de solubilizado y temple, y no para determinar el estado que se logró gracias al tratamiento térmico.

### **4.3. Metodología de análisis, selección de los factores de estudio y sus niveles**

#### **4.3.1. Metodología para el análisis de los resultados**

Para realizar el estudio de los factores intervinientes del proceso y determinar cuáles son los más significativos sobre la característica de calidad del producto como por ejemplo la conductividad eléctrica, se aplicó el método estadístico de diseño de experimentos (DOE) del tipo factorial (Montgomery, 2004). Se aplicó este método dado que nos permite investigar mejoras en el proceso.

Teniendo en cuenta la matriz de Hoerl, se planificó y estudió que herramientas estadística y de calidad son las más adecuada de acuerdo a la problemática a solucionar.

La complejidad de las organizaciones requiere la estandarización de los procesos, incluidos los vinculados con la mejora continua. En este sentido, la matriz de Hoerl brinda una forma sencilla de estandarizar la selección de las herramientas adecuadas para la resolución de problemas relacionados con la mejora continua, teniendo en cuenta la complejidad del problema a analizar y el conocimiento que se tenga de su solución.

#### **4.3.2. Factores de estudio**

En función de la experiencia previa que existe sobre el tratamiento térmico de aluminio y sus aleaciones, se establecen los factores que mayor influencia tienen sobre los niveles de la conductividad eléctrica (características de calidad).

Durante el proceso de tratamiento térmico de bonificado intervienen cuatro factores del proceso fundamentales:

1. Temperatura de mantenimiento.
2. Tiempo de permanencia a temperatura.
3. Tiempo de inmersión en el tanque de agua.
4. Temperatura del tanque de agua.

En el gráfico de la Fig. N° 4.6. se indica en que parte del proceso aparecen los factores que participan en el diseño del experimento.



**Temperatura de mantenimiento (Factor N° 1)**

**Tiempo de permanencia a temperatura (Factor N° 2)**

**Tiempo de inmersión en el tanque de agua (Factor N° 3)**

**Temperatura del tanque de agua (Factor N° 4)**

Fig. N° 4.6. Alineación del horno con la cuba de enfriamiento con la identificación de los factores (Secretaría de Ciencia, Tecnología y Producción para la Defensa, 2013).

La variable respuesta será la conductividad eléctrica, que será determinada sobre las piezas al final del tratamiento, según el instructivo de control IC-01(ver Anexo 5). De forma general, el ensayo se realizó sobre piezas.

Las piezas que se utilizaron para realizar el estudio corresponden al recubrimiento exterior, constituido de la aleación de aluminio AA2024, en forma de chapas de espesor que varían de 0,5 a 0,63 mm. Estas piezas forman parte del fuselaje y se utilizan para evitar la influencia del aire sobre las uniones remachadas y soldadas.

#### **4.4. Uso del diseño de experimento**

Los diseños experimentales son ampliamente utilizados en casos en que intervienen varios factores y se desea estudiar el efecto conjunto de éstos sobre alguna variable de respuesta. En la industria se usa el diseño de experimento para mejorar la productividad, reducir la variabilidad obtener buenos productos y procesos de manufactura.

El diseño experimental es una estrategia de combinación de la estructura de tratamientos (factores de interés) con la estructura de unidades experimentales (parcelas, individuos, etc.), de manera tal que las alteraciones en las respuestas, al menos en algún

subgrupo de unidades experimentales, puedan ser atribuidas solamente a la acción de los tratamientos excepto por variaciones aleatorias (Balzarini, et al, 2008).

En la Tabla 4.6. se sintetizan los factores y la variable respuesta a utilizar:

Tabla 4.6. Factores y variable respuesta seleccionados.

Factor N° 1	Factor N° 2	Factor N° 3	Factor N° 4	Variable respuesta N° 1
Temperatura de mantenimiento	Tiempo de permanencia a temperatura	Tiempo de inmersión en el tanque de agua	Temperatura del tanque de agua	Conductividad eléctrica

Para el estudio de la conductividad eléctrica, se trabajó sobre los cuatro factores a dos niveles cada uno con 3 repeticiones, que se llevaron a cabo simultáneamente. Esta condición determina un experimento factorial con las siguientes corridas experimentales o cantidad de ensayos (Montgomery, 2004):

$$2^4 \times 3 = 48$$

Una vez lograda la combinación óptima de los factores y sus niveles, se realizó una prueba de confirmación. De esta manera, se esperaron obtener las conclusiones que permitieron establecer los factores más importantes y sus niveles recomendables.

La elección de estos niveles son empíricos o basados en especificaciones de clientes, (ASM Handbook, 1990). Sin embargo, con el nivel de conocimiento actual, se puede generar un estudio experimental que permita determinar interacciones y niveles óptimos de estos factores; sin generar scrap de piezas o tiempos de prueba extensos.

La selección de los niveles para el estudio son los siguientes:

a- Niveles elegidos de temperatura de mantenimiento

Nivel 1: 493 °C

Nivel 2: 498 °C

b- Niveles elegidos de tiempo de permanencia a temperatura

Nivel 1: 30 minutos

Nivel 2: 50 minutos

c- Niveles elegidos de tiempo de inmersión en el tanque de agua

Nivel 1: 7 segundos

Nivel 2: 15 segundos

d- Niveles elegidos de temperatura del tanque de agua

Nivel 1: 25 °C

Nivel 2: 30 °C

#### ***4.4.1. Elaboración de la matriz de diseño de experimento***

Recordemos que la matriz de diseño es la relación que define los valores que deben tomar los factores en cada uno de los experimentos. Para realizar la matriz de factores y variable respuesta, se realizó según la norma MIL-H-6088G.

Como hemos dicho anteriormente, el experimento fue un diseño factorial  $2^4 \times 3 = 48$ , cuatro factores a dos niveles cada uno con 3 repeticiones, que se llevaron a cabo simultáneamente y se aplicaron replicas debido a que existieron sospechas que el proceso es muy variable. En la Tabla N° 4.7. se muestran las matrices de combinaciones utilizadas, formadas con 16 corridas y considerando como 1 al nivel bajo y como 2 al alto.

Tabla N° 4.7. Matriz de combinaciones para la variable respuesta conductibilidad eléctrica.

N° Corrid .	Nivel Temp. de Manten.	Nivel Tiempo Perman. Temp.	Nivel Tiempo Inm. Tanque de Agua	Nivel Temp. del Tanque de Agua	Conductividad Eléctrica			Comb. Tratamien.
					(%IACS)			
					Réplicas			
1	1	1	1	1	28,30	28,20	28,80	(1)
2	2	1	1	1	31,60	31,70	31,40	a
3	1	2	1	1	30,60	30,80	30,50	b
4	2	2	1	1	33,10	33,30	33,50	ab
5	1	1	2	1	29,60	29,40	29,50	c
6	2	1	2	1	34,30	34,50	34,70	ac
7	1	2	2	1	31,50	31,70	31,80	bc
8	2	2	2	1	35,60	35,40	35,70	abc
9	1	1	1	2	31,70	31,60	31,70	d
10	2	1	1	2	33,60	33,30	33,50	ad
11	1	2	1	2	34,70	34,90	34,80	bd
12	2	2	1	2	36,10	36,20	36,50	abd
13	1	1	2	2	34,50	34,00	34,70	cd
14	2	1	2	2	35,00	35,30	35,50	acd
15	1	2	2	2	33,00	33,50	33,80	bcd
16	2	2	2	2	36,00	36,60	36,40	abcd

En la Tabla N° 4.8. se muestra completa la matriz de diseño:

Tabla N° 4.8. Matriz de diseño completa.

N° Corrid. (Día)	Temp. de Mantenim.	Tiempo Perman. Temp.	Tiempo Inm. Tanque de Agua	Temp. del Tanque de Agua
1	493 °C	30 minutos	7 segundos	25 °C
2	498 °C	30 minutos	7 segundos	25 °C
3	493 °C	50 minutos	7 segundos	25 °C
4	498 °C	50 minutos	7 segundos	25 °C
5	493 °C	30 minutos	15 segundos	25 °C
6	498 °C	30 minutos	15 segundos	25 °C
7	493 °C	50 minutos	15 segundos	25 °C
8	498 °C	50 minutos	15 segundos	25 °C
9	493 °C	30 minutos	7 segundos	30 °C
10	498 °C	30 minutos	7 segundos	30 °C
11	493 °C	50 minutos	7 segundos	30 °C
12	498 °C	50 minutos	7 segundos	30 °C
13	493 °C	30 minutos	15 segundos	30 °C
14	498 °C	30 minutos	15 segundos	30 °C
15	493 °C	50 minutos	15 segundos	30 °C
16	498 °C	50 minutos	15 segundos	30 °C

#### 4.4.2. Ejecución de corridas en proceso

En base al esquema de las Tablas 4.7. y 4.8. se organizaron ensayos para cada corrida experimental. Para lograr valores de conductividad eléctrica, se trataron térmicamente piezas con los niveles especificados para los ensayos y cuando las piezas cumplieron el tiempo de envejecido se evaluaron en cuanto a su conductividad eléctrica.



Para las 16 corridas se tomaron 16 piezas para ensayo y como se realizaron 3 repeticiones, lo que determinó un total de 48 piezas ensayadas a lo largo de todo el estudio.

Las tablas antes mencionadas se unificaron en la Tabla N° 4.9.

Tabla N° 4.9. Resultados correspondientes a las tres corridas con variable respuesta conductividad eléctrica.

N° Corr. (Día)	Temp. de Mant. (°C)	Tiempo Perman. Temp. (minutos)	Tiempo Inm. Tanque de Agua (seg.)	Temp. del Tanque de Agua (°C)	Conductividad Eléctrica (%IACS)					
					Réplicas			Media	Rango	Varianza
1	493	30	7	25	28,30	28,20	28,80	28,43	0,60	0,103
2	498	30	7	25	31,60	31,70	31,40	31,56	0,30	0,023
3	493	50	7	25	30,60	30,80	30,50	30,63	0,30	0,023
4	498	50	7	25	33,10	33,30	33,50	33,30	0,40	0,040
5	493	30	15	25	29,60	29,40	29,50	29,50	0,20	0,010
6	498	30	15	25	34,30	34,50	34,70	34,50	0,40	0,040
7	493	50	15	25	31,50	31,70	31,80	31,66	0,30	0,023
8	498	50	15	25	35,60	35,40	35,70	35,56	0,30	0,023
9	493	30	7	30	31,70	31,60	31,70	31,66	0,10	0,033
10	498	30	7	30	33,60	33,30	33,50	33,46	0,30	0,023
11	493	50	7	30	34,70	34,90	34,80	34,80	0,20	0,010
12	498	50	7	30	36,10	36,20	36,50	36,26	0,40	0,043
13	493	30	15	30	34,50	34,00	34,70	34,40	0,70	0,130
14	498	30	15	30	35,00	35,30	35,50	35,26	0,50	0,063
15	493	50	15	30	33,00	33,50	33,80	33,43	0,80	0,163
16	498	50	15	30	36,00	36,60	36,40	36,33	0,60	0,093

# **CAPÍTULO 5**

## **EVALUACIÓN DE**

### **LOS RESULTADOS Y**

#### **DISCUSIONES**

“El primer ingrediente que creo que es absolutamente necesario para que una persona tenga éxito es el entusiasmo. Ninguna batalla se puede ganar sin entusiasmo”.

Profesor de Teología de NOTRE DAME

## 5.1. Evaluación de los resultados

Los resultados numéricos de cada corrida experimental conformaron una base de datos para ser procesada y analizada. Para realizar esta última actividad se utilizó el software Minitab y también el software infostat. Es decir que los datos se van a transformar en información para conocer como se comportó el proceso de tratamiento termico.

Se desarrollaron estudios para los datos obtenidos por el diseño de experimento, teniendo en cuenta los siguientes análisis:

- a- Análisis de la estadística descriptiva
- b- Análisis de la regresión factorial: Media vs. A. B. C. D
- c- Análisis de las gráficas de los efectos
- d- Análisis de las gráficas factoriales
- e- Análisis de la gráfica de optimización de la variable respuesta

### *a- Análisis de la estadística descriptiva*

La estadística descriptiva nos permite realizar un resumen y describir las características más importantes de los datos, de manera tal de detectar tanto un patrón de comportamiento como el apartamiento del mismo. En la Tabla N° A.1.1. del Anexo 1, se observan los datos resumidos que caracterizan al conjunto de los mismos. Están representados para cada factor por separado con el cálculo de la variable conductividad eléctrica de las medidas resúmenes siguientes:

- Media
- Desviación estándar
- Coeficiente de variación
- Varianza
- Valores mínimo y el máximo.

Para este estudio se tuvo en cuenta la medida resumen coeficiente de variación, dado que se utiliza para comparar series de datos en cuanto a su variabilidad es decir que es una medida relativa de dispersión:

En los cuatro factores se observa una diferencia importante entre ellos mismos con respecto a la variable respuesta conductividad eléctrica, esto se demostró con los valores obtenidos en el coeficiente de variación.

*b- Análisis de la regresión factorial: Media vs. A. B. C. D*

Con la metodología estadística denominada Análisis de Varianza (ANOVA) se determinaron cuáles fueron los factores e interacciones entre los mismos y qué influencia tuvieron sobre la variable respuesta conductividad eléctrica.

Los efectos son estadísticamente significativos si sus valores p son inferiores a un  $\alpha$  predeterminado de 0,05.

En la Tabla N° A 1.2. del Anexo 1 se puede observar de acuerdo a los cálculos que efectos son significativos:

Los efectos principales: temperatura de mantenimiento (A), tiempo de permanencia a temperatura (B), tiempo de inmersión en el tanque de agua (C) y temperatura del tanque de agua (D).

El efecto de interacción: temperatura de mantenimiento y la temperatura del tanque de agua (AD).

La interacción tiempo permanencia a temperatura y tiempo inmersión tanque de agua (BC) se encontraba al límite de la significación.

*c- Análisis de las gráficas de los efectos*

Para observar qué efectos influyen en la respuesta conductividad eléctrica, se evaluaron dos gráficas que son las siguientes (visualizar las Fig. N° A 1.1. y Fig. N° A 1.2.):

- Gráficas de probabilidad normal
- Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados

Los valores absolutos del diagrama de Pareto como la gráfica de probabilidad normal de los símbolos cuadrados, nos indicaron que son significativos los siguientes factores:

Temperatura de mantenimiento (A), tiempo de permanencia a temperatura (B), tiempo de inmersión en el tanque de agua (C) y temperatura del tanque de agua (D).

Temperatura de mantenimiento y la temperatura del tanque de agua (AD).

En la gráfica de probabilidad normal se observó que son significativos los factores porque sus valores  $p$  son inferiores al  $\alpha$  de 0,05.

En el diagrama de Pareto se observó que los efectos significativos son aquellos que se extienden más allá de la línea de referencia.

#### *d- Análisis de las gráficas factoriales*

Las gráficas factoriales incluyen la gráfica de efectos principales y el diagrama de interacciones. Un efecto principal es la diferencia en la respuesta media entre dos niveles de un factor. La gráfica de efectos principales muestra la media de la variable respuesta conductividad eléctrica usando los factores temperatura de mantenimiento, tiempo de permanencia a temperatura, tiempo de inmersión al tanque de agua y la temperatura del tanque de agua.

En la Fig. N° A 1.3. del Anexo 1 se observan los efectos principales, donde las menores conductividades eléctricas logradas son con los siguientes factores:

- Temperatura de mantenimiento: 493 °C
- Tiempo de permanencia a temperatura: 30 minutos
- Tiempo de inmersión al tanque de agua: 7 segundos
- Temperatura del tanque de agua: 25 °C

El diagrama de interacciones muestra el impacto de ambos factores, en la variable respuesta conductividad eléctrica. Una interacción significa que el efecto de un factor depende del nivel de otro factor, por eso, es importante evaluar las interacciones.

Como existen interacciones significativas, es necesario examinar el diagrama de interacciones. En la Fig. N° A 1.4. del Anexo 1 se puede observar dichas interacciones.

La interpretación que hacemos sobre los gráficos son las siguientes:

- El gráfico (a) indica que la menor conductividad eléctrica se logra a temperatura de mantenimiento 493°C y a temperatura del agua es de 25°C en lugar de 30°C.
- El gráfico (b) indica que la menor conductividad eléctrica se logra a tiempo de inmersión al tanque de agua 7 segundos y a tiempo de permanencia a temperatura de 30 minutos en lugar de 50 minutos.

- El gráfico (c) indica que la menor conductividad eléctrica se logra a tiempo de inmersión al tanque de agua 7 segundos y a temperatura del agua es de 25°C en lugar de 30°C.

*e- Análisis de la gráfica de optimización de la variable respuesta*

Se utilizó el optimizador de respuesta para identificar la combinación de valores de configuración de las variables de entrada que optimice una respuesta individual. El software que se utilizó realizó una solución óptima y dibujó una gráfica de optimización.

Con esta gráfica (ver Anexo 1 Fig. N° A 1.5.) se calculó que el valor medio de la conductividad eléctrica se logra cuando los factores se encuentran en los siguientes valores:

- Temperatura de mantenimiento (A): 494,45 °C
- Tiempo de permanencia a temperatura (B): 30,52 minutos
- Tiempo de inmersión al tanque de agua (C): 7,32 segundos
- Temperatura del tanque de agua (D): 25,20 °C

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Conductividad Eléctrica.	Objetivo	27,5	29,55	35	1	1

Es importante tener en cuenta que la optimización de respuesta es más efectiva cuando se interpreta de manera combinada con la experiencia relevante en la materia, es decir, considerando antecedentes, principios teóricos y conocimientos obtenidos a través de la observación o experimentación anterior.

### **5.1.1. Conclusión del diseño de experimento**

Para realizar este análisis se tuvo en cuenta la teoría del tratamiento térmico del aluminio y los análisis del diseño de experimento.

a- De acuerdo a la teoría del aluminio:

- La temperatura de mantenimiento se debe encontrar (493 – 498 °C).
- El tiempo de permanencia se debe fijar según el espesor de la pieza.
- El tiempo de inmersión del tanque se debe encontrar por debajo del valor medio estudiado, dado que si es alto la dureza disminuye (7 – 15 seg).
- La temperatura del tanque de agua también se debe encontrar superior al valor de 20 °C dado que si es bajo, la dureza del material en estudio disminuye (25 – 30 °C).

b- Se observa que los parámetros obtenidos por los análisis del diseño de experimento se acercan a lo predicho por la teoría de un proceso de tratamiento térmico para una aleación de aluminio AA2024:

- Temperatura de mantenimiento (A): 494 °C
- Tiempo de permanencia a temperatura (B): 30 minutos
- Tiempo de inmersión al tanque de agua (C): 7 segundos
- Temperatura del tanque de agua (D): 25 °C

Como resultado final del análisis del diseño de experimento, combinado con la teoría del tratamiento térmico del aluminio, logramos la mejor combinación de los factores para piezas de espesor de 0,5 a 0,63 mm, con la conductividad eléctrica dentro de lo especificado. Por lo tanto, se utilizará dicha combinación de los factores para realizar la corrida de confirmación y la mejora continua en el proceso de tratamiento térmico.



## **5.2. Planificación y diseño de las herramientas de la calidad para la mejora continua**

Por intermedio de los estudios realizados en el diseño de experimento se demostró que la variable respuesta conductibilidad eléctrica presenta una importante variabilidad de acuerdo a los resultados obtenidos en la estadística descriptiva (ver ítem 5.1.).

Para investigar por qué ocurrió el problema mencionado se utilizó la metodología de la matriz de Hoerl (ver Fig. N° 2.6., Capítulo II) y teniendo en cuenta los antecedentes sobre las mejores prácticas de tratamiento térmico de bonificado, los resultados se pueden ubicar en el segundo cuadrante de dicha matriz, donde se plantean los problemas de baja complejidad y la solución desconocida. Por esto se estudiaron las posibles causas que originaron el problema planteado.

Para ello, se utilizaron herramientas correspondientes al control estadístico del proceso (Kume, 1990, 2002), con los datos de campo del mismo proceso:

- Diagrama de Pareto.
- Diagrama causa – efecto.
- Gráficos de control.
- Indicadores de desempeño.

A excepción del diagrama de causa-efecto, las herramientas básicas para la calidad son todas estadísticas, relativamente sencillas de implementar.

Estas herramientas tienen una característica común, donde todas son visuales y tienen forma de gráficos o diagramas. Es decir, las mismas nos proporcionan información de gran valor en la toma de decisiones relacionadas con la calidad.

## **5.3. Estudio de la aplicación de las herramientas de la calidad para la mejora continua y evaluación de los resultados**

Se emplearon las herramientas de calidad mencionadas anteriormente para determinar las causas que generan la variabilidad de la variable respuesta conductibilidad eléctrica.

Para buscar la solución del problema observado en el diseño de experimento, se utilizó la combinación entre el diagrama de Pareto y el diagrama de causa-efecto.

### 5.3.1. Diagrama de Pareto

Esta gráfica se utilizó para separar gráficamente los aspectos significativos del problema desde los triviales de manera que se sepa dónde dirigir los esfuerzos para mejorar.

Se realizó un análisis con los datos de campo del mismo proceso, considerando los casos no conformes, a fin de determinar el porcentaje de los mismos. Los pasos que se realizaron para la construcción del diagrama de Pareto son los siguientes:

- a- Paso 1: confección de la tabla contando los tipos de defectos que existen en el proceso en estudio (Tabla N° 5.1.):

Tabla N° 5.1. Conteo de los defectos.

Tipos de defectos	Cantidad
Conductividad eléctrica variable	20
Baja dureza (resistencia y límite elástico bajo)	16
Grano grueso	10
Deformaciones de las piezas	8
Oxidación	5
Quemado	4
Fragilidad	3
Alargamiento bajo	2
Corrosión	2
Grietas superficiales	2
Grietas en estrellas	1

- b- Paso 2: Por medio del programa Minitab se construyó el diagrama de Pareto (Fig. N° 5.1.):

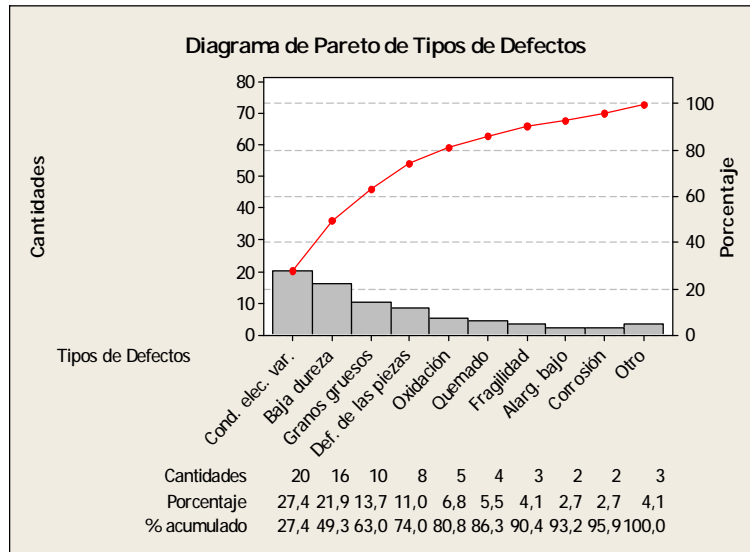


Fig. N° 5.1. Diagrama de Pareto por ítems defectuosos.

En la gráfica se observa en la línea de los porcentajes acumulados que aproximadamente el 74 % de los defectos son por conductividad eléctrica, baja dureza, granos gruesos y deformación de las piezas.

Tomando el defecto más significativo que es la variación de la conductividad eléctrica. Se procedió a su análisis.

### 5.3.2. Diagrama causa – efecto

Por medio de este diagrama se determinaron las causas que originaron la variación de la conductividad eléctrica (Fig. N° 5.2.):



Fig. N° 5.2. Diagrama de causa-efecto de la variación de la conductividad eléctrica.

Con los datos de campo de los no conformes del mismo proceso, se confeccionó por medio del software Minitab un diagrama de Pareto de causas (Fig. N° 5.3.) y se determinaron las causas principales que afectaron al problema. De esta manera, investigamos todas las unidades que influyeron a la variación de la conductividad eléctrica, para examinar hasta qué punto estas causas (factores) estaban afectando al defecto.

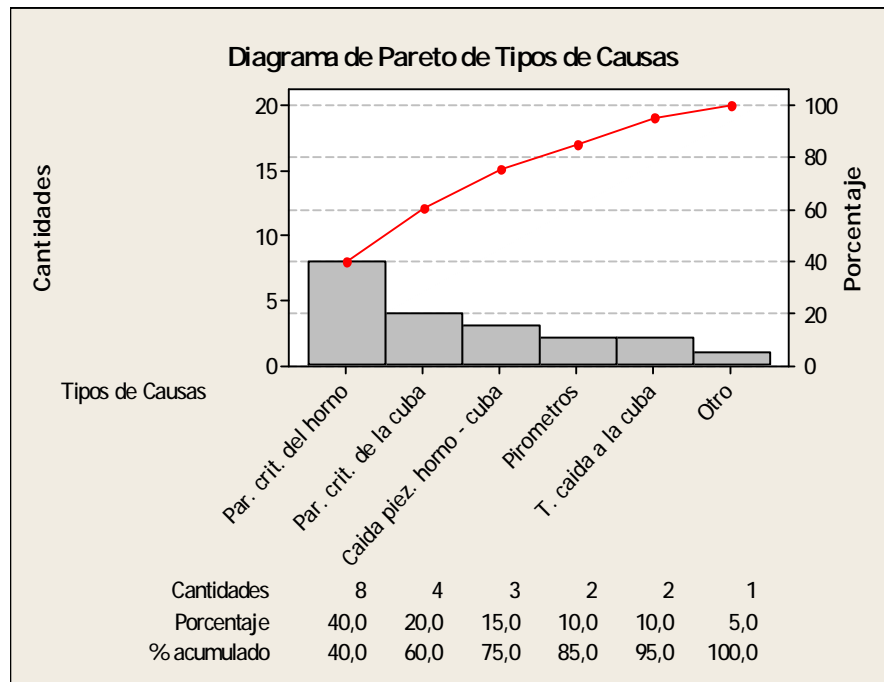


Fig. N° 5.3. Diagrama de Pareto de causas.

Del análisis de Pareto, se puede observar en la línea de los porcentajes acumulados, que aproximadamente el 60 % de la ocurrencia de los defectos se encuentran muy afectada por los parámetros críticos de proceso de solubilizado y temple (tanto del horno como de la cuba). Esto último confirma lo que fue determinado en el diseño de experimentos en el ítem 5.1.

#### 5.3.2.1. Corrida de confirmación

De acuerdo a los resultados obtenido por el diagrama de Pareto de causas, se observó que puede haber una vinculación entre la conductividad eléctrica y los parámetros del proceso de solubilizado.

El estudio de esta corrida de confirmación se llevó a cabo bajo los parámetros de proceso que fueron determinados por el diseño de experimentos en el ítem 5.1.:

- Temperatura de mantenimiento: 494 °C
- Tiempo de permanencia a temperatura: 30 minutos
- Tiempo de inmersión de la pieza al tanque de agua: 7 segundos
- Temperatura del tanque de agua: 25 °C

Para este estudio se realizaron 16 corridas de confirmación, con frecuencia de 5 piezas diarias por lote producido. Es decir, se utilizaron 80 muestras. Los valores obtenidos en el proceso se muestran en la Tabla N° 5.2., (utilizando el software Minitab).

Se realizaron estas corridas de confirmación para observar que mejoras se han logrado en el proceso. Para visualizar las mejoras se compararon los valores obtenidos en la Tabla N° 4.9. y la Tabla N° 5.2. por medio de la comprobación de la hipótesis de la no existencia de diferencias significativas entre las medias de dos muestras distintas:

$$H_0: \mu_0 = \mu_1$$

$$H_1: \mu_0 \neq \mu_1$$

Por medio de la Tabla N° A.2.1., la Fig. N° A.2.1. y la Fig. N° A.2.2. del Anexo 2 se visualiza las mejoras que se realizaron sobre el proceso en función de la reducción de la variabilidad del proceso.

La interpretación sobre los resultados de la Tabla N° A.2.1 y la Fig. N° A.2.1. y la Fig. N° A.2.2., son las siguientes:

- Para la comprobación de la igualdad de la media se realizó en función del valor-p para observar si existía diferencia significativa. En la Tabla N° A.2.1. el valor-p es menor a 0,05 indicando que las medias de los valores del diseño de experimento como la de la corrida confirmación presentan medias estadísticamente distintas.
- La distribución que presenta la Fig. N° A.2.1. es asimétrica de derecha y presenta valores fuera de lo especificado con respecto a la variable conductividad eléctrica.

- La distribución que presenta la Fig. N° A.2.2. es simétrica en donde coincide la media con la mediana y los valores satisfacen con lo especificado con respecto a la variable conductividad eléctrica.
- Las dos figuras citadas arrojan un valor p mayor a 0,05, que nos indica que los valores pueden ajustarse a una distribución normal.
- Las Fig. N° A.2.1., Fig. N° A.2.2. y Fig. N° A.2.3. nos indicó que los valores de la corrida de confirmación se centran en la media y presenta una pequeña dispersión, en cambio se observa que resulta opuesto para los valores del diseño de experimento. Lo mencionado se puede observar en la Tabla N° A.2.1. por medio del valor de la desviación standard como el coeficiente de variación. Los valores del diseño de experimento presentan un mayor valor de desviación standard como el coeficiente de variación indicando que presentan una variabilidad importante.

Tabla N° 5.2. Valores correspondientes a la corrida de confirmación.

N° Corrid. (Día)	Temp. Mant.	Tiempo Perman Temp.	Tiempo Inm. Tanque de Agua	Temp. del Tanque de Agua	Conductividad eléctrica					Media
					Valores obtenido por lotes					
1	494 °C	30 min.	7 seg.	26 °C	30,00	29,90	29,50	29,60	29,70	29,74
2	494 °C	30 min.	7 seg.	24 °C	29,80	29,60	30,10	29,90	30,10	29,90
3	494 °C	30 min.	7 seg.	25 °C	29,60	29,90	29,50	29,80	29,60	29,68
4	494 °C	30 min.	7 seg.	26 °C	29,70	29,50	29,50	29,80	29,50	29,60
5	494 °C	30 min.	7 seg.	23 °C	30,20	30,00	30,00	29,80	30,00	30
6	494 °C	30 min.	7 seg.	23 °C	29,90	29,70	29,60	29,80	30,00	29,80
7	494 °C	30 min.	7 seg.	25 °C	29,40	29,60	29,50	29,50	30,10	29,62
8	494 °C	30 min.	7 seg.	26 °C	29,80	29,90	30,10	30,00	29,80	29,92
9	494 °C	30 min.	7 seg.	24 °C	29,60	30,10	30,30	29,50	30,00	29,90
10	494 °C	30 min.	7 seg.	24 °C	30,30	29,70	29,80	29,40	29,60	29,76
11	494 °C	30 min.	7 seg.	25 °C	30,00	30,20	30,00	29,90	29,90	30
12	494 °C	30 min.	7 seg.	26 °C	29,70	29,60	29,80	29,90	29,60	29,72
13	494 °C	30 min.	7 seg.	25 °C	29,80	29,90	29,80	29,80	29,90	29,84
14	494 °C	30 min.	7 seg.	24 °C	29,80	29,70	30,10	30,10	30,20	29,98
15	494 °C	30 min.	7 seg.	23 °C	29,70	29,60	29,50	29,60	29,70	29,62
16	494 °C	30 min.	7 seg.	24 °C	29,60	29,80	29,70	29,80	29,90	29,76

### 5.3.3. Gráfico de control

Con la implementación de las mejoras propuestas, en el proceso productivo se corroboraron los resultados utilizando la prueba de normalidad y el gráfico de control. El estudio se llevó a cabo con los parámetros de proceso que fueron determinados por el diseño de experimentos en el ítem 5.1.:

- Temperatura de mantenimiento: 494 °C
- Tiempo de permanencia a temperatura: 30 minutos
- Tiempo de inmersión de la pieza al tanque de agua: 7 segundos
- Temperatura del tanque de agua: 25 °C

Para este estudio se tomaron 125 productos consecutivos de producción para formar la muestra es decir que se tomaron 25 subgrupos con un tamaño de 5 piezas cada uno de ellos. Para aplicar esta metodología se utilizaron en primer lugar el software de Infostat y después el software Minitab.

Para que tenga sentido la aplicación de los gráficos de control, el proceso ha de tener una estabilidad suficiente que aun siendo aleatorio, permita un cierto grado de predicción. En general, un proceso caótico no es previsible y no puede ser controlado. Por lo tanto, si los datos no son normales, no son válidas las predicciones de fracciones defectuosa realizadas en el estudio y se debe realizar una transformación normalizadora por medio de la técnica normalizadora Box-Cox.

#### 5.3.3.1. Prueba de normalidad

Para conocer si un proceso tiene un cierto grado de estabilidad se comprueba la normalidad de los datos. Para ello, se utilizaron dos métodos: prueba de hipótesis y gráficos.

a- Prueba de hipótesis

Para verificar se utilizó un test de normalidad:

- Test de Shapiro Wilks

Para comenzar el análisis se plantearon las siguientes hipótesis:

H<sub>0</sub>) La variable se distribuyen normalmente en la población.

H<sub>1</sub>) La variable no se distribuyen normalmente en la población.

Se visualiza en la Tabla N° 5.3. los valores de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado).



Tabla N° 5.3. Prueba de Shapiro-Wilks (modificado).

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
Conductividad eléctrica	125	30,54	0,38	0,97	0,1405

La prueba del test arroja un valor-p mayor a 0,05, para un nivel de confianza del 95 % que nos permite concluir que los datos de la variable analizada pueden ajustarse a una distribución normal.

b- Método gráfico de probabilidad normal

Para continuar el estudio de comprobación de la normalidad de los datos. Se utilizó el grafico de probabilidad normal para la variable. Se observa en la Fig. N° 5.4. la gráfica de probabilidad.

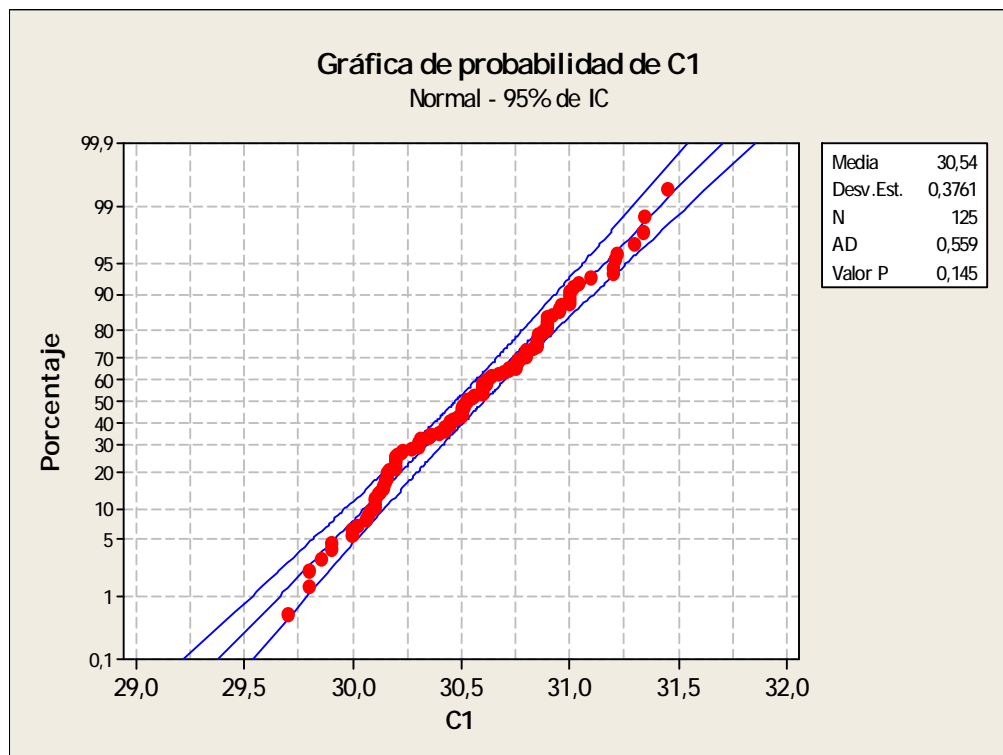


Fig. N° 5.4. Gráfica de prueba de normalidad con intervalo de confianza para la conductividad eléctrica.

Se observa que los valores de la conductividad eléctrica quedan dentro del intervalo de confianza del 95 %, lo que indica que es normal la distribución de los puntos. Esto se demostró también por el valor-p en este caso estaba por arriba de 0,05.

### 5.3.3.2. Gráfico de control

Finalmente, se utilizó el gráfico de control para realizar el seguimiento de la variación del proceso.

Los valores que se usaron para obtener estos gráficos, fueron obtenidos cuando el proceso comenzó a estar bajo control. Para visualizar tales estados se utilizó el software Minitab, ver la Fig. N° 5.5.

En la Tabla N° 5.4. se observa los valores de la línea central y los límites de control de los diagramas para la media y para el rango, obtenido con el software Infostat.

Tabla N° 5.4. Los valores de los límites de control.

Límites de Control: X-barra

Límites de Control

Línea Superior: 30,99

Línea Central: 30,54

Línea Inferior: 30,09

<u>n</u>	<u>Media</u>	<u>D.E.</u>	<u>Rango</u>
125	30,54	0,34	1,75

Límites de Control: Rango

Límites de Control

Línea Superior: 1,66

Línea Central: 0,78

Línea Inferior: 0,00

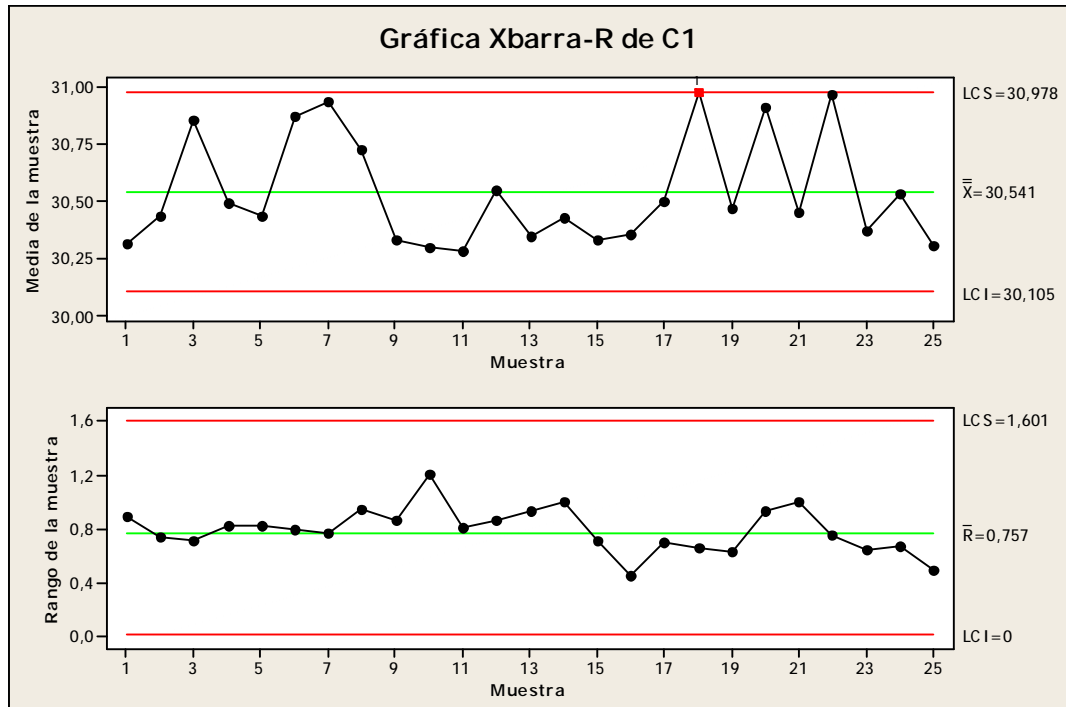


Fig. N° 5.5. Gráfico de control de media y rango obtenido desde el programa Minitab.

En las gráficas obtenidas se puede observar que el proceso está bajo control. Esto es equivalente a decir que el proceso permanece estable, es decir que los parámetros de distribución permanecen invariables y por lo tanto puede realizarse una predicción del intervalo en el que se encuentran los valores de la característica de respuesta.

#### 5.3.4. Indicadores de desempeño

Se utilizó la metodología de sistema de indicadores para diagnosticar el estado del proceso, así como para medir los resultados del proyecto de mejora.

Con la metodología de los indicadores, resultó más fácil la comunicación de la situación de la calidad del producto de salida a las áreas de producción, dando la retroalimentación adecuada, permitiendo identificar fácilmente qué factores del proceso requieren de ajustes, si será necesario algún ajuste mayor o mantenimiento.

La representación gráfica del indicador permite una visión rápida e intuitiva de la situación y favorece la toma de decisiones para corregir las desviaciones detectadas.

Para lograr la comunicación entre los mandos medios y los gerentes para la toma de decisiones correspondientes, se utilizó un cuadro de mando para organizar los siguientes indicadores:

- Índices capacidad del proceso (ICP)
- Índices de productos conformes (IPC)
- Índice de objetivos (Ti)

Se aplicó la metodología de los indicadores:

#### 5.3.4.1. Índices capacidad del proceso (ICP)

Recordemos que estos índices evalúan qué tan capaz o hábil es un proceso para cumplir con las especificaciones.

Para la aplicación de estos índices se debe tener en cuenta que los procesos deben estar bajo control estadístico y que la característica de calidad a monitorear debe seguir una distribución aproximadamente normal.

El índice de capacidad del proceso  $C_p$  no toma en consideración dónde se localiza la media del proceso respecto a las especificaciones, simplemente mide la extensión de las especificaciones en comparación con la dispersión seis sigma del proceso. Para una mayor precisión, usualmente se utiliza el índice  $C_{pk}$ .

Por medio de los valores utilizados para elaborar el gráfico de control de la Fig. N° 5.6. se determinó los índices de capacidad del proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$ , debido que con estos valores el proceso está bajo control estadístico.

El análisis de capacidad de proceso permite investigar si un proceso sigue funcionando bajo las especificaciones. Este análisis se basa en la distancia entre los resultados observados y los valores nominales o esperados bajo distribución normal.

El software InfoStat proporciono la evaluación de la aptitud del proceso a través de las estadísticas  $C_p$  y  $C_{pk}$ . Estos índices suponen que los límites naturales de tolerancia del proceso son cercanos a los límites de especificación.

Se realizó la metodología del cálculo de la capacidad y aptitud, considerando tolerancias bilaterales, utilizando el programa antes mencionado (ver Fig. N° 5.6.):

Calculo de la capacidad del proceso por medio del software Infostat:

<u>Ítem</u>	<u>Valor</u>
Media:	30,54
Desv.est.:	0,34
LEI:	27,50
<u>LES:</u>	<u>35,00</u>

Tolerancias bilaterales

<u>Ítem</u>	<u>Valor</u>
Zinf:	-8,99
Zsup:	13,18

Proporciones fuera de especificación

<u>Ítem</u>	<u>Valor</u>
Inferior:	<0,0001
Superior:	<0,0001
<u>Total:</u>	<u>&lt;0,0001</u>

Evaluación aptitud del proceso

<u>Ítem</u>	<u>Valor</u>
cp	3,84
<u>cpk</u>	<u>3,11</u>

Los valores de las proporciones de piezas terminadas que están fuera de especificación cuando el proceso está bajo control estadístico y normalmente distribuido, son los siguientes:

PZS= < 0,0001

PZI= < 0,0001

La proporción total fuera de especificación será Ptotal= <0,0001.

Se grafican los datos de Cp y Cpk para un mejor análisis (observar Fig. N° 5.6.):

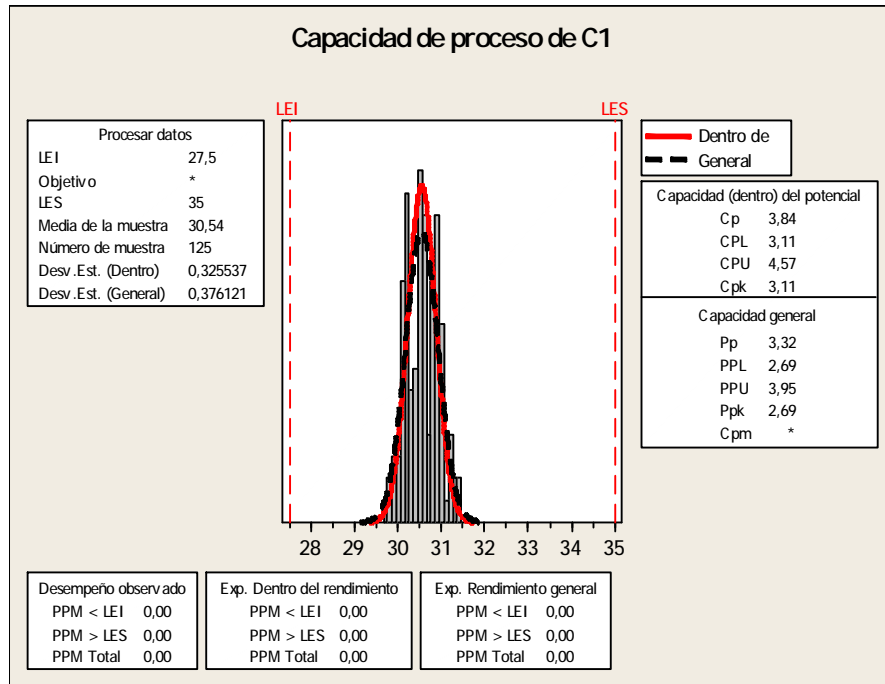


Fig. N° 5.6. Representación de la curva normal con las especificaciones.

#### Evaluación de la aptitud y capacidad del proceso

De acuerdo a lo observado en la Fig. N° 5.6. se puede afirmar que el proceso es apto, dado que los resultados producidos se encuentran dentro de las especificaciones. Este proceso resulta adecuado para cumplir con el diseño inicial.

Como el valor que se obtuvo de  $Cpk > 1$  y  $Cp > 1$ , (ver Anexo 3 Tabla N° A.3.1. y Tabla N° A.3.2.) se puede decir que la aptitud y la capacidad del proceso son “adecuados” según las especificaciones y antecedentes para este tipo de proceso (observar en el ítem 2.7.6.1.). Cumplen con las siguientes características:

- a. La característica de la calidad tiene una distribución normal.
- b. El proceso está bajo control estadístico.
- c. Para las especificaciones bilaterales, la media del proceso está centrada entre los límites inferiores y superiores de la especificación.
- d. De acuerdo a la Fig. N° 5.6. la cantidad de piezas defectuosas en ppm es menor a 0.

Como parte de la gestión a la vista, para visualizar toda la información relevante, rápida y completa sobre la capacidad de proceso, se utilizó la opción Six Pack del software Minitab. Los resultados se muestran a continuación (ver Fig. N° 5.7.):

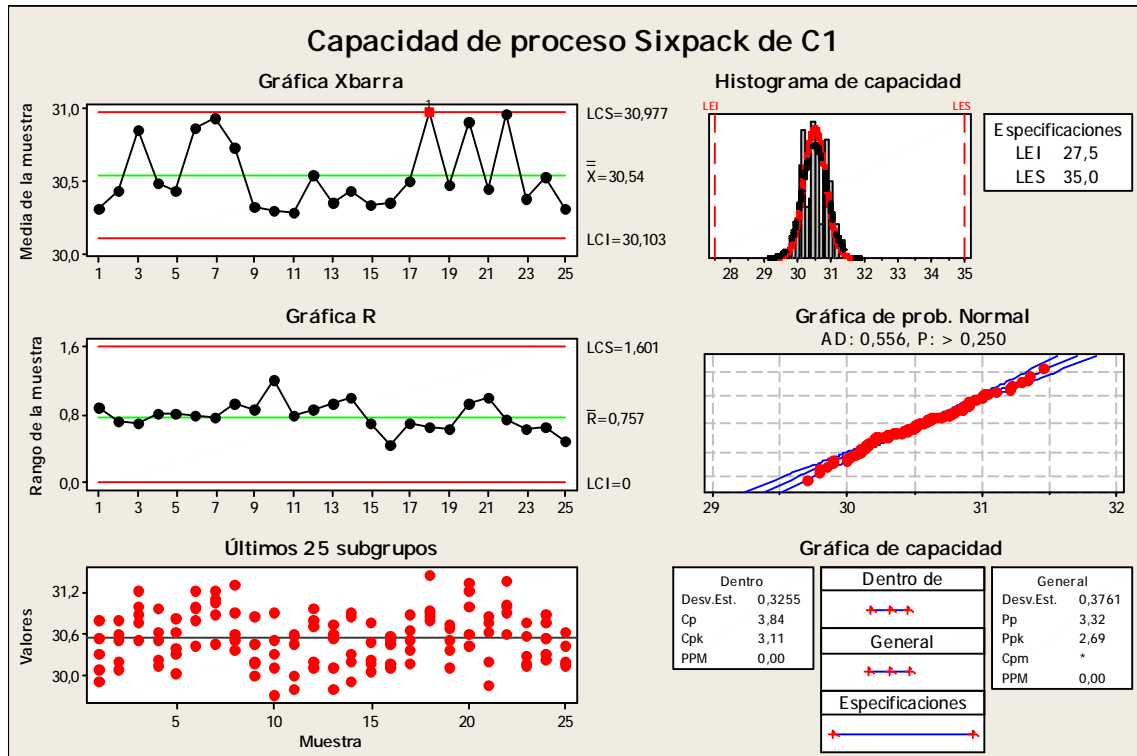


Fig. N° 5.7. Resultados de capacidad del proceso con el resumen (Six Pack).

Se observa en los gráficos de control (X-barra y R) que los puntos siguen un patrón aleatorio y que en ningún caso estos exceden los límites de control y puede considerarse que el proceso productivo está bajo control.

Los puntos del diagrama de rachas forman una dispersión aleatoria y bastante horizontal, en la que no se observan tendencias ni desplazamientos ni cambios. Ellos también contribuyen a considerar que el proceso está bajo control y estable.

En este caso, se observa que se cumple la hipótesis de normalidad, dado que el histograma como el gráfico de normalidad siguen una distribución normal.

En el gráfico de capacidad se observa que los datos aproximadamente siguieron la curva normal y la tolerancia del proceso se encuentra dentro del límite de especificación.

Coherente con el gráfico de capacidad, el valor de los índices Cp (3,84) y Cpk (3,11) es superior a nuestro valor de referencia (1,33), por lo que se concluye que el proceso planteado es capaz de lograr piezas dentro de especificación.

#### 5.3.4.2. Índice de productos conformes (IPC)

Mediante el (IPC), se evaluó la cantidad de productos conforme.

Para calcular este índice se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{IPC} = \frac{(\text{Productos suministrados} - \text{Productos devueltos})}{\text{Productos suministrados}} \times 100$$

Ejemplo:

$$\text{IPC} = \frac{(345 - 35)}{345} \times 100 = 89,85\%$$

Los valores especificados por los clientes traducidos en especificaciones internas para el proceso, se establecieron en 90% como mínimo.

#### 5.3.4.3. Índice de objetivos (Ti)

Este índice sirve para evaluar la variabilidad del proceso.

Para calcular este índice se utilizó la siguiente fórmula:

$$T_i = \frac{|\bar{X} - T|}{\frac{1}{2}(\text{LSC} - \text{LIC})} = \frac{|29,812 - 29,78|}{\frac{1}{2}(30,07 - 29,554)}$$

$$T_i = 0,032/0,258 = 0,124$$

El valor objetivo (target) T= 29,78.

Los valores especificados por los clientes traducidos en especificaciones internas para el proceso, se establecieron que el Ti aceptable debe ser menor o igual a 0,15, por lo que el índice cumple con lo recomendado.

Estos indicadores ICP, IPC, y Ti constituyen herramientas potenciales para analizar la situación actual y tomar decisiones para corregir el proceso.

Para poner en práctica estos indicadores se utilizaron datos de campo del mismo proceso desde enero a diciembre del año 2017.

Con los gráficos modelos de la Fig. N° 5.8., la Fig. N° 5.9. y la Fig. N° 5.10., se elaboraron las fichas de los indicadores que permitieron visualizar el avance de los indicadores mensualmente y anualmente. De esta forma, es posible tomar las acciones correctivas correspondientes a los distintos procesos de la empresa, retroalimentando así el proceso de mejora del Sistema de Gestión de la Calidad (SGC).



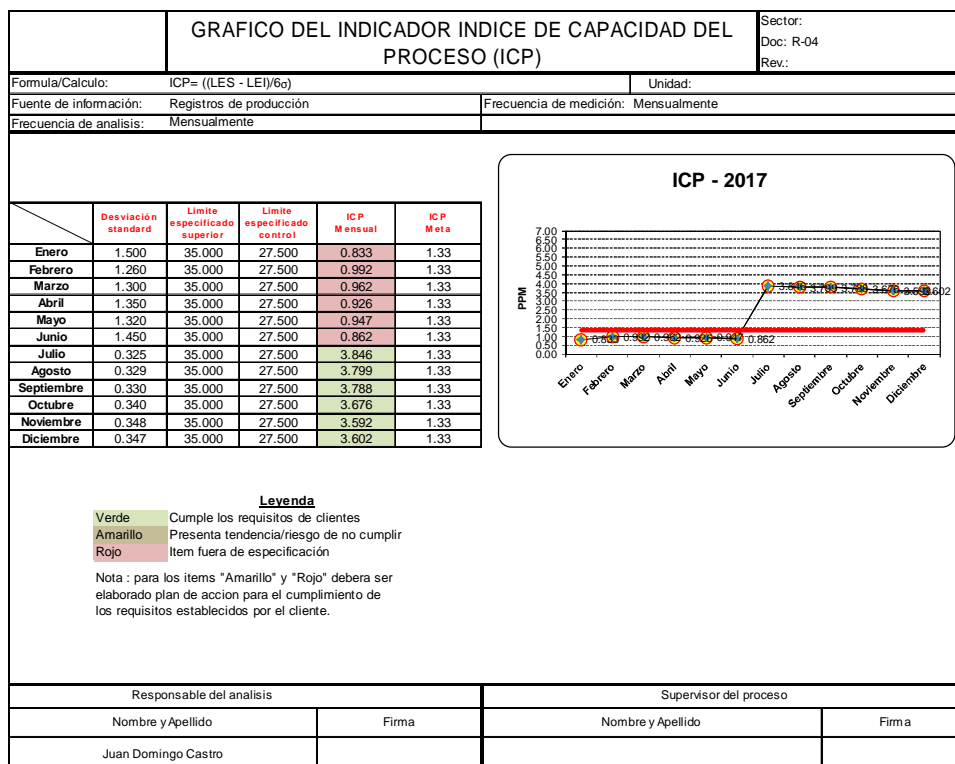


Fig. N° 5.8. Gráfico del indicador de índice capacidad del proceso (ICP).

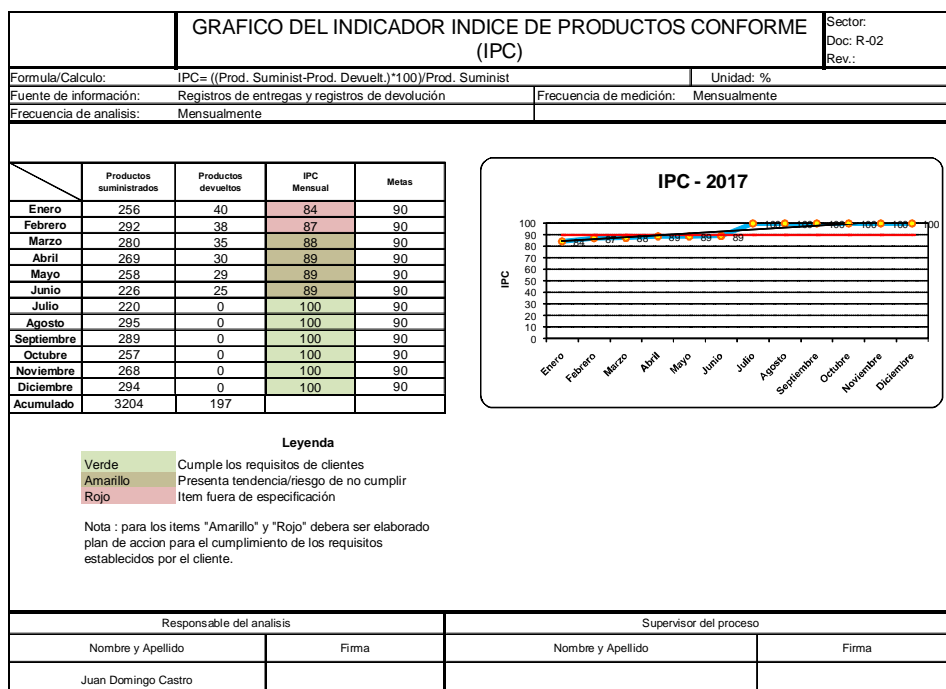


Fig. N° 5.9. Gráfico del indicador índice de productos conforme (IPC).

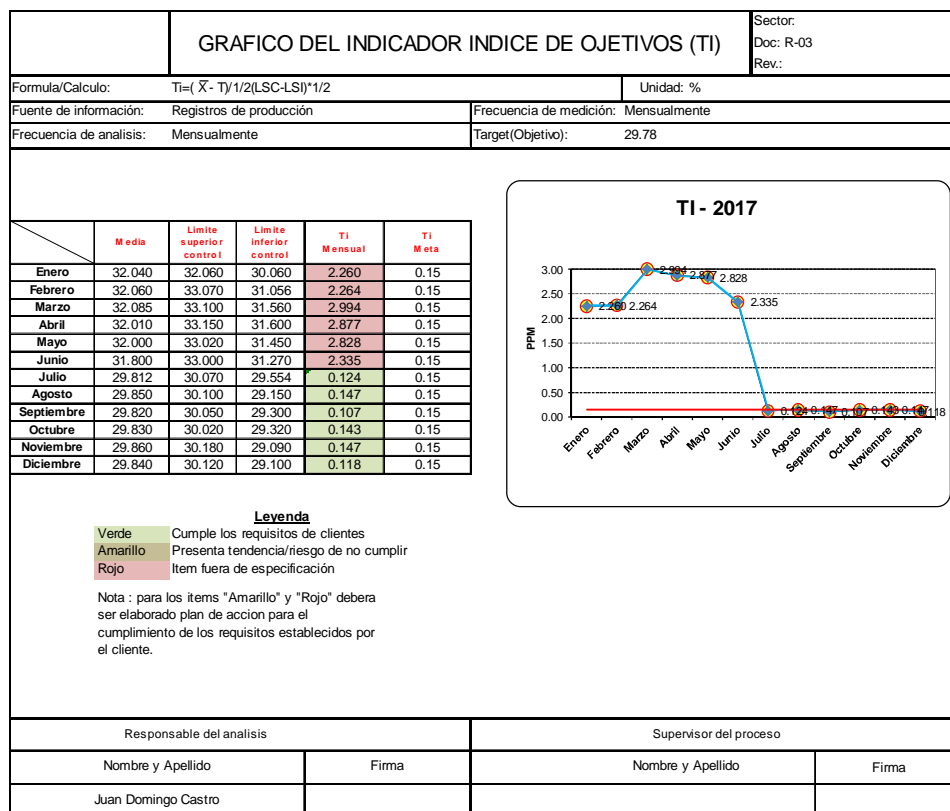


Fig. N° 5.10. Gráfico del indicador índice de objetivos (Ti).

Los indicadores se estructuraron en formato de cuadro de mando para tener una visión global de la gestión de la calidad del proceso. En función de lo mencionado en la Tabla N° 5.5. se observa la matriz del cuadro de mando propuesta.

Tabla N° 5.5. Matriz del cuadro de mando.

Proceso	Factor de clave de éxito	Indicadores		Meta	Form. de repres
		Objetivo	Formula		
Ingeniería de proceso	Índice de capacidad de proceso	Aumentar el nivel de desempeño de los procesos que impactan en el cliente	$\min \left\{ \begin{array}{l} \frac{LSE - m}{3s} \\ \frac{m - LIE}{3s} \end{array} \right\}$	Cpk ≥ 1,3	Graf. de línea
Control de la calidad	Índice de productos Conforme	Aumentar las conformidad de los productos o también maximizar el número de productos conformes	$P C = \frac{(\text{Prod. Sum.} - \text{Prod dev.})}{\text{Productos Sum.}} \times 100$	90 % min.	Graf. de línea
Gestión de la calidad	Índice de objetivos	Lograr que los resultados obtenidos están lo más cercano del promedio	$T_i = k = \frac{ \mu - T }{\frac{1}{2}(U - L)}$	Ti ≤ 0,15	Graf. de línea



# **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

“Afronta tu camino con coraje, no tengas miedo de las críticas de los demás. Y, sobre todo, no te dejes paralizar por tus propias críticas”.

Paulo Coelho

En esta tesis se propuso el desarrollo de métodos estadísticos y herramientas de calidad aplicados al control del tratamiento térmico en la aleación de aluminio AA2024 mediante el estudio de los parámetros críticos de dicho proceso que permita retroalimentarlo para contribuir así a la mejora, en el marco del sistema de gestión de la calidad. Las conclusiones más importantes de este trabajo fueron:

- Se cumplieron con las expectativas previstas en los objetivos planteados como desarrollo de este trabajo de tesis, ya que se estableció un control del proceso de tratamiento térmico, que permite tomar decisiones mediante la aplicación de acciones preventivas y correctivas para la mejora continua.
- Se aplicó un método estadístico de diseño de experimentos que permitió identificar los parámetros críticos del tratamiento térmico que permiten obtener las características de calidad en la aleación AA2024.
- Se implementó el control de los parámetros críticos en el proceso y mediante el estudio de las causas raíces se corrigieron los parámetros del tratamiento térmico, instaurando el control del mismo. De esta manera, se consiguió un proceso de tratamiento térmico bajo control.
- Se introdujeron indicadores de desempeño que permitieron a mandos medios como gerentes encontrarse informados del avance diario del proceso de tratamiento térmico. Para ellos, se sistematizó el análisis estadístico con el empleo de software y se implementó un cuadro de mando para los indicadores de índice de productos conformes (IPC), que permitió evaluar la cantidad de productos defectuosos. Además, se generaron indicadores de variabilidad (Ti) e índice de capacidad de procesos (ICP) para cumplir con las especificaciones de los productos.

## **6.1. Recomendaciones y estudios de extensión**

El presente trabajo propuso herramientas básicas para la mejora de la calidad en el proceso productivo de la empresa en estudio. Sin embargo, la finalización de la implementación de las mejoras no implica que la calidad del proceso y del producto haya llegado a su tope. A continuación se presentan propuestas para profundizar y complementar el presente trabajo y contribuir con la mejora de la calidad.

### ***6.1.1. Extensión de las propuestas a todo el proceso productivo***

Si bien se propusieron algunas herramientas selectas, estas deben lograr ser implementadas en todo el proceso productivo para obtener un control eficiente de las características de la calidad. Así, todas las herramientas propuestas se deberían extender a otros puntos del proceso productivo, por ejemplo a sectores de materiales compuesto, mecanizado, pinturas, tratamientos de superficies, etc.

### ***6.1.2. Indicadores de desempeño***

Sería conveniente que la información de los indicadores de ICP, IPC y Ti se concientice a los colaboradores para que se puedan tomar acciones en el proceso productivo.

Esto puede ser utilizado como una herramienta más para evaluar las áreas productivas. Se debe extender la aplicación a todas las líneas para contar con un mejor seguimiento de la producción.

Las IPC se utilizan para evaluar el cumplimiento de las áreas productivas y de calidad.

La planta actualmente no cuenta con información acerca de su capacidad para el cumplimiento de las especificaciones dadas. Un análisis de la capacidad de proceso podría dar información importante para definir programas de mantenimiento y reajuste, así como determinar la capacidad del proceso para cumplir con las especificaciones de producto, con los equipos e insumos actuales. Se propone la definición de la capacidad de proceso y su análisis respectivo utilizando los índices de capacidad de proceso ( $C_p$  y  $C_{pm}$ ).

### ***6.1.3. Aplicación del software Future SQC***

Como el CEP es una técnica que ha de ser utilizada cerca del proceso y, por lo tanto, es recomendable que sean los operarios los que la utilicen. Para ellos, los gráficos de control han de ser sencillos de construir e interpretar y también debido que la aplicación de las diferentes técnicas del CEP son muy laboriosas para ser realizadas de manera manual y los operarios en la mayoría de los casos, carecen de conocimientos para realizar una interpretación de los datos, tales situaciones han llevado en este trabajo a proponer, la implementación del software Future SQC de la empresa SCEPSA de México, que es un programa específico para el CEP (ver Anexo 4).

Estas herramientas informáticas son muy importantes, dado que los directivos y gerentes de las diferentes áreas, pueden monitorear la calidad del proceso productivo. Es decir que nos permiten obtener datos más reales y acordes a las necesidades permitiendo a los responsables de las empresas reaccionar de manera inmediata ante cualquier cambio de los procesos. De esta manera permite mejorar y hacer más eficientes el proceso y luego tomar acciones correctivas correspondientes.

Los programas de control estadístico actualmente son una herramienta necesaria de toda aquella empresa que desee competir a nivel mundial.



## ANEXOS

### Anexo 1 Procesamiento de datos estadísticos del diseño de experimento

#### *a- Estadística descriptiva*

Se realizó un análisis para cada uno de los factores con respecto a la variable respuesta conductividad eléctrica (observar Tabla N° A 1.1.):

Tabla N° A.1.1. Estadística descriptiva de los factores.

Temp. Manten	Variable	n	Media	D.E.	CV	Varianza	Mín	Máx
493	Conduct. Eléctrica	24	32,038	2,223	6,94	4,943	28,200	34,900
498	Conduct. Eléctrica	24	34,533	1,597	4,62	2,549	31,400	36,600

Tiempo Inm. Tan. de Agua.	Variable	n	Media	D.E.	CV	Varianza	Mín	Máx
7	Conduct. Eléctrica	24	32,517	2,363	7,27	5,585	28,200	36,500
15	Conduct. Eléctrica	24	34,054	1,981	5,82	3,924	29,400	36,600

Temp. del Tanque de Agua	Variable	n	Media	D.E.	CV	Varianza	Mín	Máx
25	Conduct. Eléctrica	24	32,117	2,362	7,35	5,578	28,200	35,700
30	Conduct. Eléctrica	24	34,454	1,521	4,41	2,314	31,600	36,600

Tiempo Perm. Temp.	Variable	n	Media	D.E.	CV	Varianza	Mín	Máx
30	Conduct. Eléctrica	24	32,571	2,358	7,24	5,562	28,200	35,500
50	Conduct. Eléctrica	24	34,000	2,028	5,97	4,115	30,500	36,600

**b- Análisis de la regresión factorial: Media vs. A. B. C. D**

Análisis de Varianza

En la Tabla N° A 1.2. se observa los cálculos del análisis de la varianza:

Tabla N° A 1.2. Análisis de la varianza.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust	F	P
Efectos principales	4	73,481	73,481	18,370	31,99	0,000
Temp. Manten.	1	29,484	29,484	29,484	51,34	0,000
Tiempo Perm. Temp.	1	10,890	10,890	10,890	18,96	0,002
Tiempo Inm Tanque de Agua	1	6,943	6,943	6,943	12,09	0,008
Temp. del Tanque de Agua	1	26,163	26,163	26,163	45,56	0,000
2-Interacciones de (No.) factores	3	7,186	7,186	2,395	4,17	0,047
Temp. Manten.*Tiempo Inm. del Tanque de Agua	1	0,810	0,810	0,810	1,41	0,269
Temp. Manten.*Temp. del Tanque de Agua	1	3,686	3,686	3,686	6,42	0,035
Tiempo Perm. Temp.*Tiempo Inm Tanque de Agua	1	2,689	2,689	2,689	4,68	0,062
Error residual	8	4,594	4,594	0,574		
Total	15	85,261				

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred.)
0,757811	94,61 %	89,90 %	78,45 %

De acuerdo a esta última tabla obtuvimos un ajuste de casi un 90% indicando que el modelo es adecuado.

**c- Gráficas de los efectos**

Están compuestas por la gráfica de probabilidad normal y el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados, observar la Fig. N° A 1.1. y Fig. N° A 1.2.

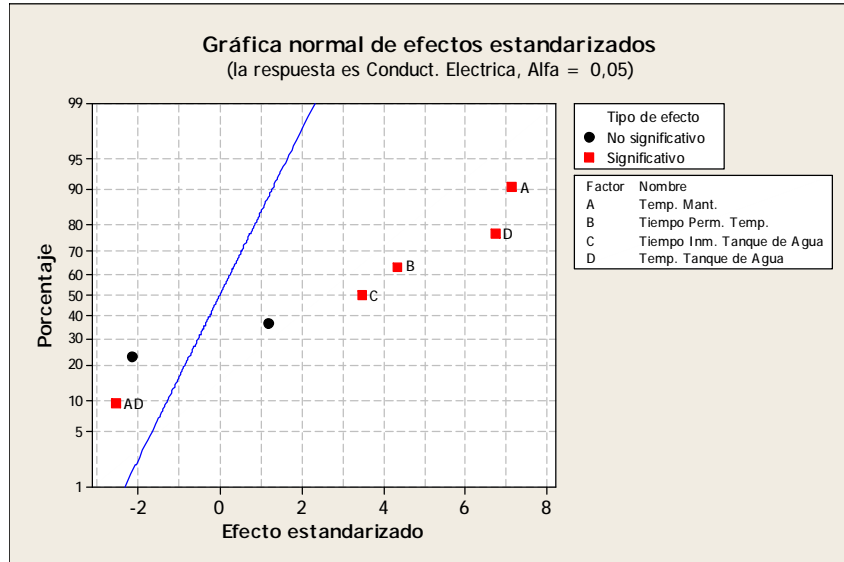


Fig. N° A 1.1. Gráfica normal de efectos estandarizados.

En este diagrama de Pareto se muestra el valor absoluto de los efectos.

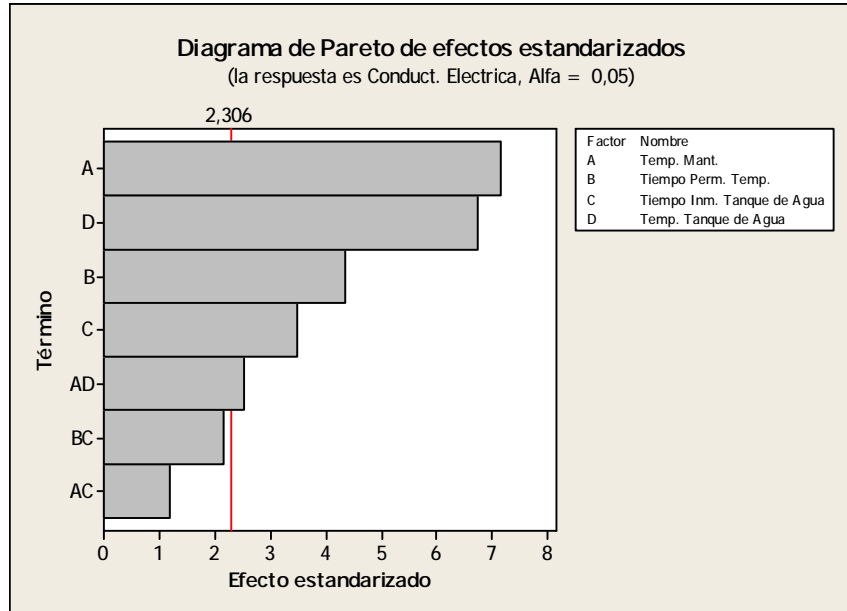


Fig. N° A 1.2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

**d- Gráficas factoriales**

En Fig. N° A 1.3. se puede ver la gráfica de efectos principales para la variable respuesta conductividad eléctrica.

Cada punto representa la conductividad eléctrica medio para un nivel de un factor. La línea central horizontal muestra la conductividad eléctrica medio para todos los ensayos.

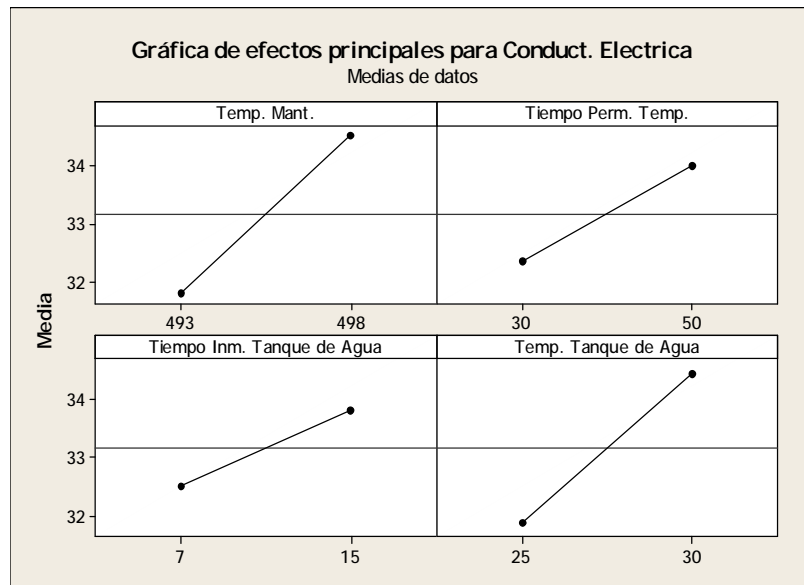


Fig. N° A 1.3. Gráfica de efectos principales para conductividad eléctrica.

En la Fig. N° A 1.4. se visualiza la gráfica de interacción para la conductividad eléctrica.

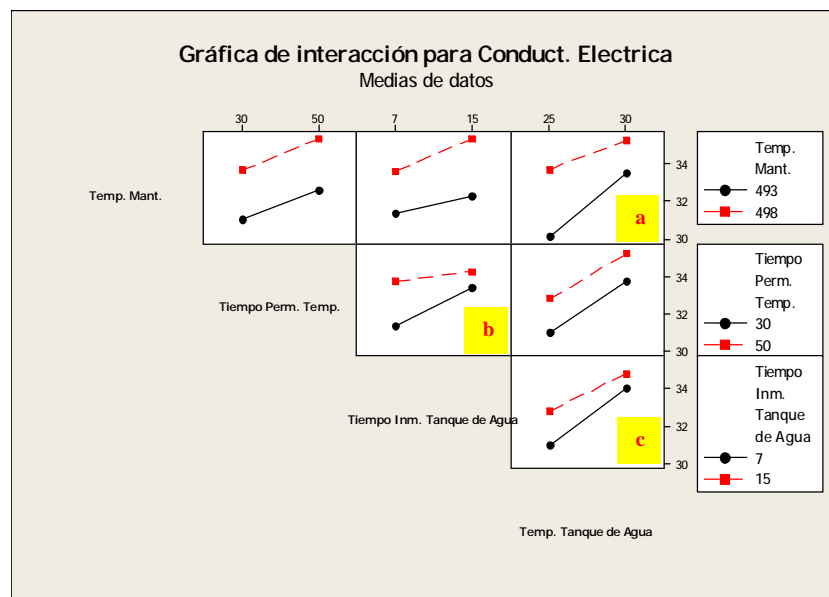


Fig. N° A 1.4. Gráfica de interacción para conductividad eléctrica.

**e- Gráfica de optimización de la variable respuesta**

Con esta gráfica (verlo en la Fig. N° A 1.5.) se mostró el efecto de cada factores (columnas) en la variable respuesta o en la deseabilidad compuesta (filas) es decir que se optimizo gráficamente los valores de los factores para que den un resultado determinado (por ejemplo minimizar, maximizar o lograr una respuesta objetivo).

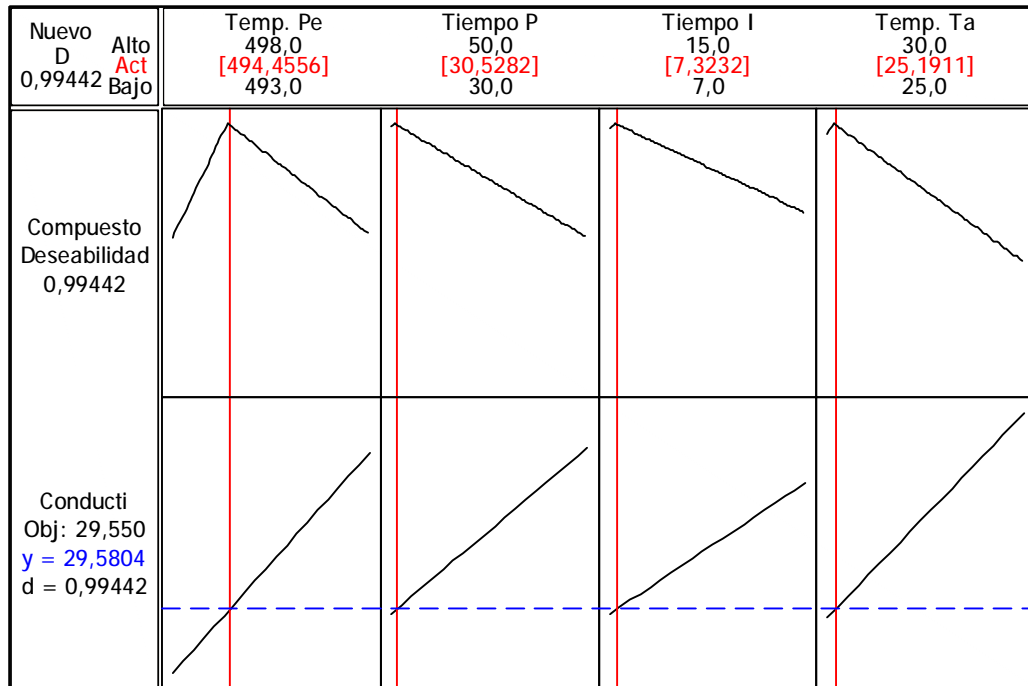


Fig. N° A 1.5. Gráfica de optimización de la variable respuesta.

Las líneas rojas verticales en la gráfica representan la configuración actual de los factores. Los números que aparecen en la parte superior de una columna muestran la configuración actual de los niveles de factores (en rojo). Las líneas azules horizontales y los números representan la variable respuesta para el nivel actual del factor.

## Anexo 2 Procesamiento de datos estadísticos de la comparación entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación

Debajo podemos observar los cálculos de la comparación entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación:

### *Estadística descriptiva*

Por medio de esta estadística encontramos los índices de dispersión, que son los Tabla N° A.2.1. Estadística descriptiva de los valores de la conductividad eléctrica entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación.

Resultados	N	Media	EE de la Media	Desv. Est.	Coef. Var.	Mínimo	Máximo
Valores del Diseño de Experimento	16	32,171	0,596	2,384	7,19	28,430	36,330
Valores de la Corrida de Confirmación	16	29,802	0,0342	0,137	0,46	29,600	30,000

Valor T	GL	Valor p
5,64	15	0,000

En las Fig. N° A.2.1 y Fig. N° A.2.2. se puede visualizar la prueba de normalidad y los índices de distribución, dispersión y posición de los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación:

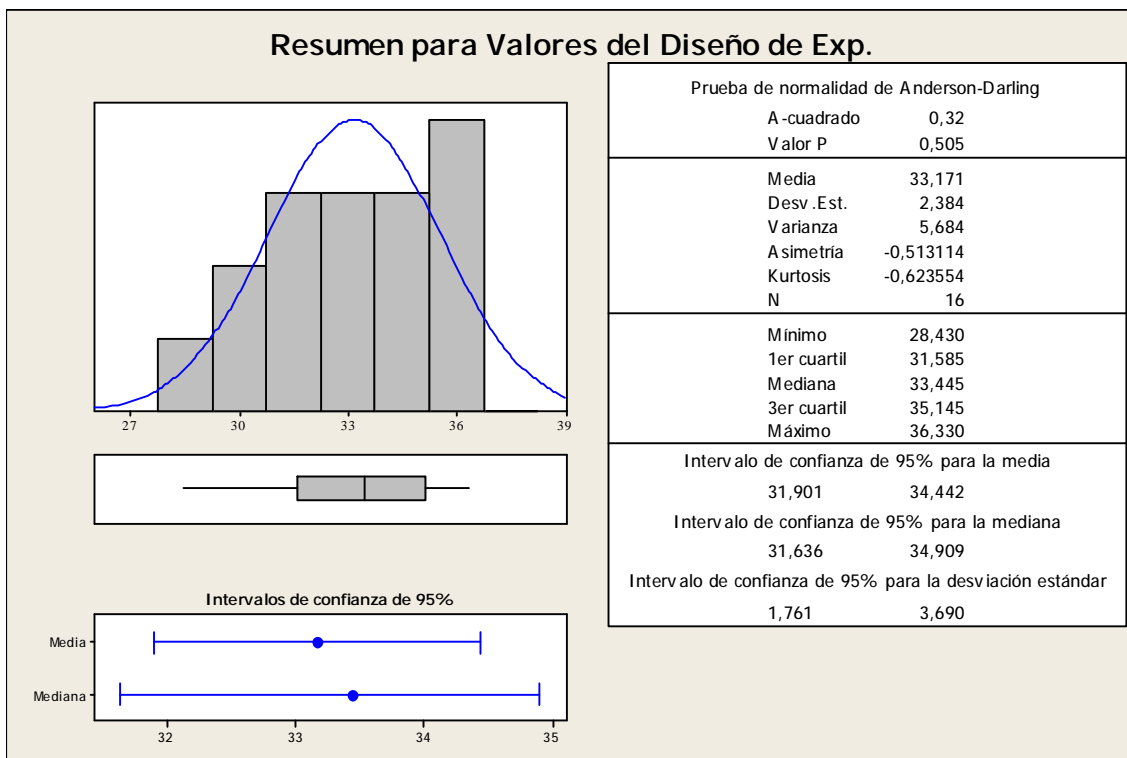


Fig. N° A.2.1. Gráfica de resumen de la media de los valores obtenidos en el diseño de experimento.

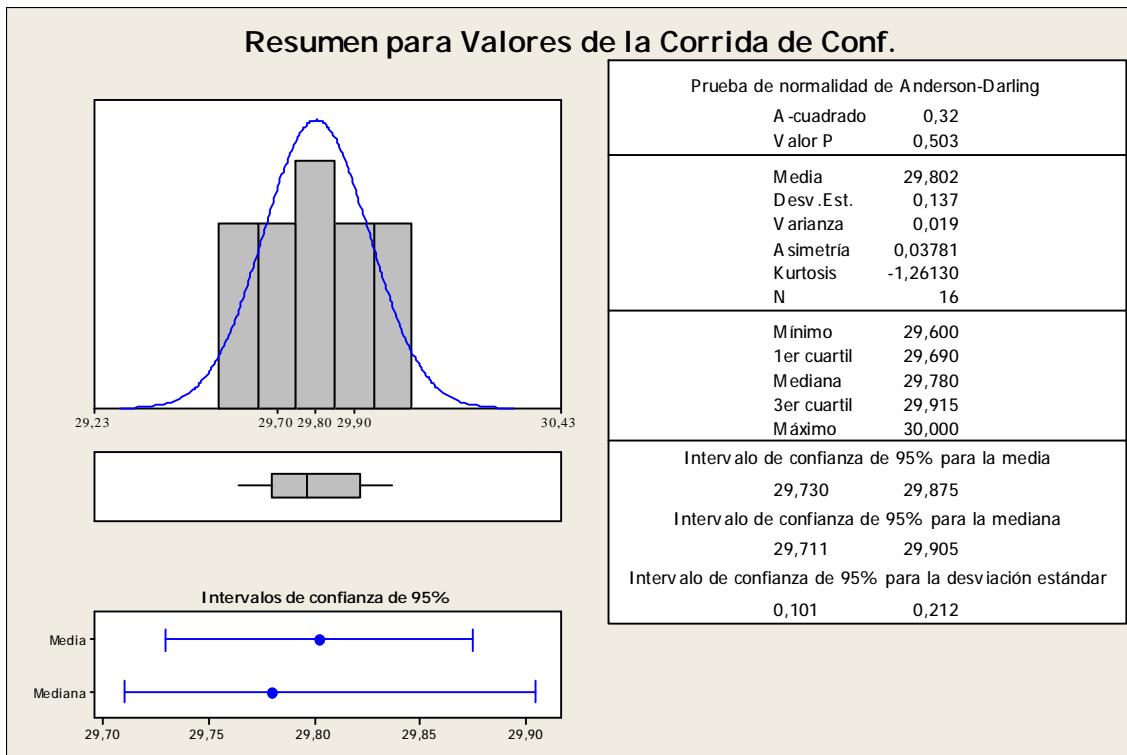


Fig. N° A.2.2. Gráfica de resumen de la media de los valores obtenidos en la corrida de confirmación.

En la Fig N° A.2.3. se observa el diagrama de caja para analizar la variabilidad de los valores del diseño de experimento y de la corrida de confirmación.

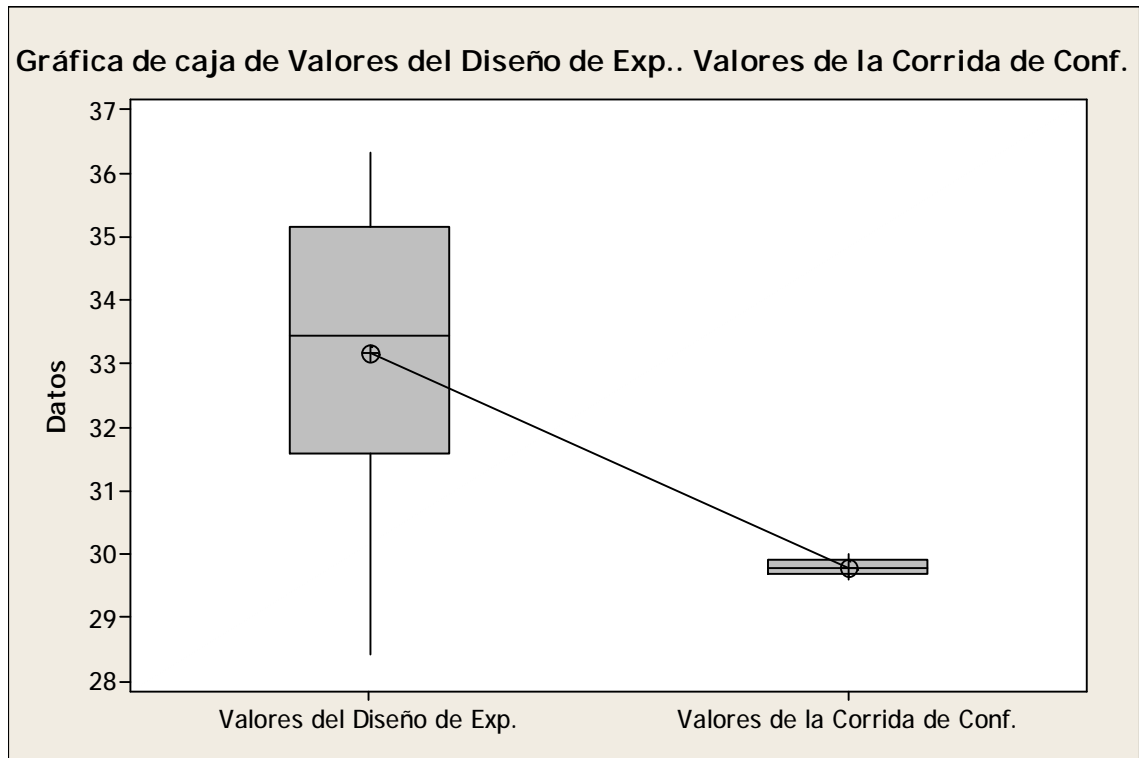


Fig. A.2.3. Gráfica de caja de la comparación entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación.



### Anexo 3 Tablas de los valores de Cp

Los valores mínimos recomendados de Cp, se muestran en la siguiente Tabla N° A.3.1.:

Tabla N° A.3.1. Valores mínimos recomendados del índice de capacidad de proceso (Cp), (Montgomery, 2005).

	Especificaciones bilaterales	Especificaciones unilaterales
Procesos existentes	1.33	1.25
Procesos nuevos	1.50	1.45
Seguridad, resistencia o parámetro crítico, proceso existente	1.50	1.45
Seguridad, resistencia o parámetro crítico, proceso nuevo	1.67	1.60

En la Tabla N° A.3.2. se presentan varios valores del PCR (es la designación en inglés de índice de capacidad del proceso) Cp junto con los valores asociados de la porción caída del proceso, expresados como partes defectuosas o unidades disconformes del producto por millón (ppm), de otra manera podemos expresar que son las piezas defectivas en partes por millón (ppm) que están fuera de especificaciones.

Tabla N° A.3.2. Valores del índice de capacidad del proceso (Cp) y de la porción caída asociada para un proceso con una distribución normal (en ppm defectuosas) que está bajo control estadístico, (Montgomery, 2005).

PCR	Porción caída del proceso (en ppm defectuosas)	
	Especificaciones unilaterales	Especificaciones bilaterales
0.25	226 628	453 255
0.50	66 307	133 614
0.60	35 931	71 861
0.70	17 865	35 729
0.80	8 198	16 395
0.90	3 467	6 934
1.00	1 350	2 700
1.10	484	967
1.20	159	318
1.30	48	96
1.40	14	27
1.50	4	7
1.60	1	2
1.70	0.17	0.34
1.80	0.03	0.05
2.00	0.0009	0.0018

#### Anexo 4 Software Future SQC

Este es un sistema que le permitirá realizar, por medio de una PC, todos los análisis, gráficas, cálculos y reportes que se requiere para poder conocer, analizar, controlar y mejorar la calidad de los productos, procesos y servicios.

Para lograr un buen uso de esta última herramienta informática, se deben cumplir las siguientes etapas que se muestran en la Fig. N° A.4.1. y Fig. A.4.2.:



Fig. N° A.4.1. Diagrama general para el uso del software, (SCEPSA, 2014).

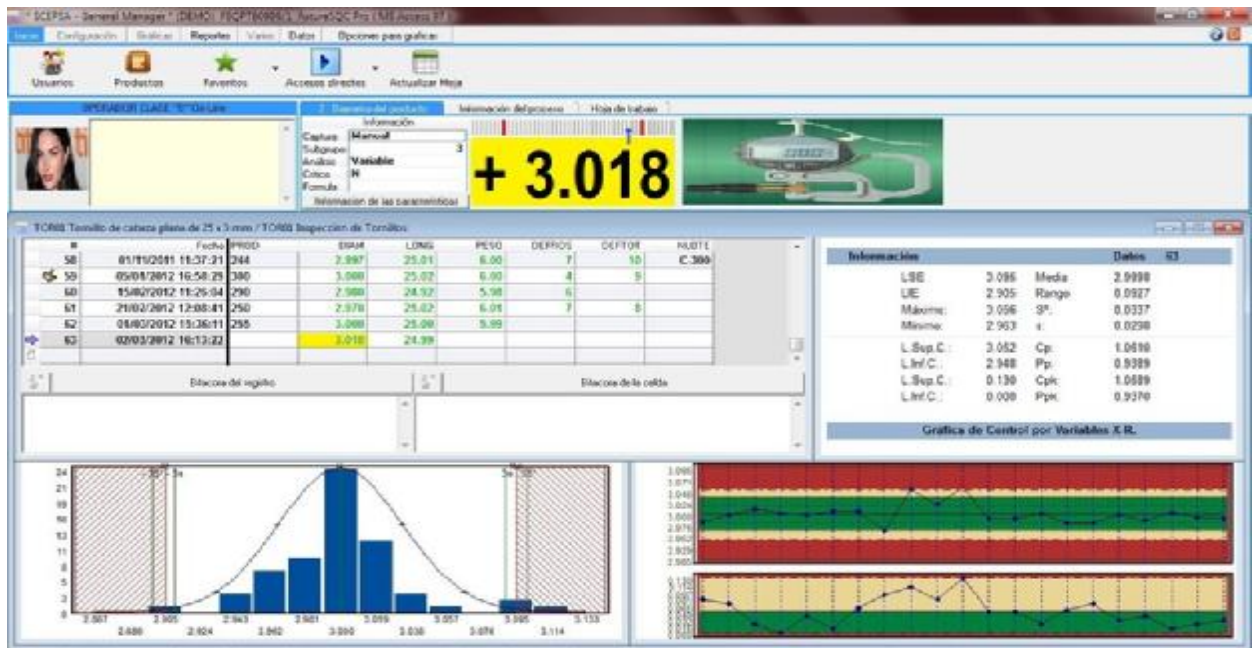


Fig. N° A.4.2. Ventana que muestra cómo se cargan los datos, los que se obtienen y el cálculo de los índices de capacidad, (SCEPSA, 2014).

## Anexo 5 Instructivo para la medición de la conductividad eléctrica

	<b>INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	Sector: Calidad Doc: IC-01 Rev: 00
--	--	--

### ***1.- Objetivo***

Definir el procedimiento de manejo del instrumento de medición a fin de que éste sea utilizado de forma correcta, garantizando así su buen estado y funcionamiento dentro de los parámetros de confiabilidad y exactitud a fin de emitir resultados confiables.

### ***2.- Aplicación***

Es aplicable en el área de tratamientos térmicos de aluminio, con la finalidad de asegurar la correcta operación del equipo. También es aplicable a otras áreas que utilicen este mismo modelo de equipo.

### ***3.- Equipamiento***

Para llevar a cabo este ensayo se utiliza el siguiente aparato:

Equipo: Electrical conductivity meter Modelo: DC-11M

Sistema lectura: Digital

Fabricante: Zappi

Año fabricación: 2015

### ***4.- Descripción del ensayo***

#### ***4.1 Definiciones***

4.1.1 Conductividad: Es una propiedad intrínseca de cada material que se refiere a la capacidad de conducir corriente. Es usualmente expresada en porcentaje IACS (International Annealed Copper Standard).

4.1.2 Instrumento de corrientes Eddy: Instrumento eléctrico o electrónico de medición que responde a las corrientes Eddy inducidas en un metal mediante un campo electromagnético.

4.1.3 Porcentaje IACS: Es el porcentaje del valor de conductividad de un material comparado con el patrón IACS. El patrón IACS se considera como 100% IACS.

#### 4.2 Especificaciones Técnicas del Medidor de Conductividad Eléctrica

Descripción de instrumento (ver Fig. N° A.5.1)

1. Display indicador.
2. Botón de encendido.
3. Botón de calibración.



Fig. N° A.5.1. Estructura del instrumento.

Características:

Rango de medición: 5 – 110 %IACS

Precisión: 1 %

Resolución: 0,1 %IACS

Frecuencia de operación: 60 kHz

Alimentación: Batería de 9 V

Rango de temperatura: 15 – 35 °C

#### 4.3 Secuencia de operaciones del equipo

a- Presionar el botón [ON/OFF] para encender el equipo (Fig. A.5.2). Esperar unos segundos hasta que encienda.

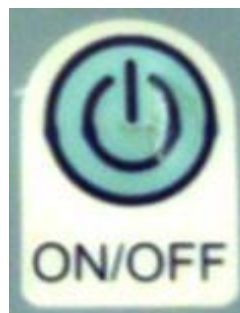


Fig. N° A.5.2. Botón de encendido.

b. Se debe calibrar el equipo cada vez que se encienda de la siguiente manera:

Apoyar el palpador (Fig. A.5.3) sobre el patrón de calibración de aluminio (Fig. A.5. 4). Procurar que el palpador esté perpendicular a la superficie del patrón y haga buen contacto con ésta.



Fig. N° A.5.3. Palpador.



Fig. N° A.5.4. Patrón de calibración.

	<b>INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	Sector: Calidad Doc: IC-01 Rev: 00
--	--	--

Podrá apreciarse en el display (Fig. A.5. 5) el valor de conductividad medido sobre el patrón. Retirar el palpador de la superficie del patrón y presionar el botón [CAL] (Fig. A.5.6).



Fig. N° A.5.5. Display indicador.



Fig. N° A.5.6. Botón de calibración.

c. La medición de conductividad sobre la pieza consiste en apoyar el palpador sobre la superficie a evaluar en varios puntos y tomar la lectura desde el display (Fig. A.5.5). Se debe comparar el valor obtenido con los valores mostrados en el Anexo A.5.1.

d. Cuando el espesor de una chapa con capa CLAD no alcance los requisitos de conductividad, deberá ser desbastada de acuerdo al punto F a fin de remover parcialmente la capa CLAD y realizar nuevamente la medición; o deberá ser completamente removido en los bordes/esquinas o cualquier área que no forme parte de la pieza final. La capa CLAD puede ser removida por remoción mecánica (lijado).

Es permitida una capa no conductora de hasta 0,08 mm (0,003 pulgadas) de espesor.



	<b>INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	Sector: Calidad Doc: IC-01 Rev: 00
--	--	--

e. El desbaste (spot-facing) consiste en remover la capa CLAD en un área de 15 mm con las limitaciones siguientes:

- El desbaste no debe realizarse cerca del borde de la chapa o próximo a cualquier radio en una distancia inferior al doble del diámetro del área a ser decapada.
- No debe hacerse desbaste sobre superficies externas, partes decorativas expuestas o áreas selladas.

#### *4.4 Consideraciones Generales*

El control de conductividad se realizará en todas las piezas tratadas (100%) por cada carga realizada en el horno.

Para que el ensayo proporcione lecturas confiables y con el menor margen de error posible debe considerarse lo siguiente:

- La superficie donde se tome la medida debe ser lo más plana posible, debe estar bien limpia y seca y debe tener como mínimo 10 mm de diámetro y 1 mm de espesor.
- La diferencia de temperatura entre el patrón y la pieza produce errores de medición. Se sugiere colocar el patrón sobre la pieza durante unos minutos antes de calibrar para que se homogenice la temperatura entre éstos.
- El eje de simetría del palpador debe orientarse lo más perpendicular posible a la superficie donde se realice la lectura.
- El palpador debe hacer buen contacto sobre la superficie. Ubicar el palpador en el sector más plano posible de la pieza.
- Deberá transcurrir un tiempo de 96 horas de envejecido a temperatura ambiente posterior a los tratamientos térmicos de materiales en estado T3, T3X, T3XXX, T4 o T4X, antes de que las piezas puedan ser rechazadas por su conductividad inferior a la mínima especificada. Piezas con valores medidos conforme al Anexo A.5.1 deben ser aceptadas, independientes del tiempo de espera.



	<b>INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	Sector: Calidad Doc: IC-01 Rev: 00
--	--	--

- En piezas de forja o piezas de espesores no uniformes, la medición de conductividad deberá realizarse en los extremos del material (secciones con mayor y menor espesor).
- El equipo medidor de conductividad eléctrica, tiene un rango de medición de piezas de espesores  $\geq 1$  mm (0,040”) para aleaciones de 2024 y espesores  $\geq 1,2$  mm (0,050”) para aleaciones 6061. Para piezas con espesores menores a estos rangos se deberá tomar solamente dureza y no conductividad eléctrica.
- En las piezas cuyo tamaño o forma no permitan la medición de conductividad debe ser especificada una evidencia del tratamiento térmico tal como informe del ensayo, registro del horno, sello en el registro de carga o ensayos destructivos.
- Diferentes medidas de conductividad en una misma pieza no deben exceder 3% IACS de variación máxima.

**5.- Anexos**

Tabla N° A.5.1.: Valores de Dureza y Conductividad de Aleaciones de Aluminio.

Tabla N° A.5.2.: Limitaciones de espesor/dureza.

**6.- Registros a completar**

N/A

**INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE  
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA**

Sector: Calidad  
Doc: IC-01  
Rev: 00

Tabla N° A.5.1: Valores de Dureza y Conductividad Eléctrica de Aleaciones de Aluminio.

Aleación	Estado (4)	Forma y espesor (mm)	Dureza Rockwell				Dureza Webster W-20 Hw	Dureza Brinell		Conductividad eléctrica % IACS (1)	
			B	E (6)	H	16T		Diam. (mm)	Valor	Alojad	Sin CLAD
1100	O	Sin CLAD	-	-	50 máx.	-	-	-	-	-	57-62
	H14	Todos	-	-	70 mín.	-	-	-	-	-	-
	T0	Sin CLAD	-	-	65 máx.	-	-	-	-	-	44,5-60,5
3003	H12	Todos	-	-	70 mín.	46 mín.	-	-	-	-	-
	H14		-	39 mín.	80 mín.	65 mín.	3,6 mín.	-	-	-	-
	H16		-	54 mín.	88 mín.	62 mín.	7 mín.	-	-	-	-
	H18		-	66 mín.	95 mín.	68 mín.	9,8 mín.	-	-	-	-
6062	O	Sin CLAD	-	-	70 máx.	-	10,7 máx.	-	-	-	34-37
	H32	Todos	-	50 mín.	86 mín.	60 mín.	6 mín.	3,89 máx.	42 mín.	-	-
	H34		-	66 mín.	95 mín.	68 mín.	9,8 mín.	3,26 máx.	59 mín.	-	-
	H35		-	73 mín.	-	72 mín.	11,3 mín.	3,06 máx.	66 mín.	-	-
H38	-		80 mín.	-	75 mín.	13 mín.	2,93 máx.	74 mín.	-	-	
5083	O	Todos	-	-	-	-	-	-	-	27-31	
2004	T6	Sin CLAD	-	92	-	-	15,89	-	-	-	35,5 - 42,0
	T0	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	43,5-61,5
2014	-T3 -T4 -T42 -T45	Todos	65-70	87-95	-	79-85	14,5 - 16,5	-	-	33,5-35,0	32,5-35,0 (#)
		Alojad	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-T6, -T62, -T65X	Hasta 0,91	78-90	102-110	-	86,5-90	18,1 - 20	-	-	-	-
		Mayor 0,94	78-90	102-110	-	86-90	18,1 - 20	-	-	37,5-41,5	-
		Sin CLAD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Chapas	80-90	103-110	-	87-90	18,4 - 20	-	125-158	-	35,5-41,5
Otros	81-90	104-110	-	87-90	18,6 - 20	2,23-2	100-130	-	35,5-41,5		
2024 2624	-T3, T35X	Sin CLAD	69-83	97-106	111-118	82,5-87,5	17 - 19	2,5-2,2	100-130	-	28,5-34,0
		Alojad	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Hasta 1,60	52-71	91-100	109-116	80-84,5	15,5 - 17,8	-	-	29,5-34,0	-
	-T4, T42	Sobre 1,62	52-71	93-102	109-116	-	16 - 18,1	-	-	29,5-34,0	-
		Sin CLAD	69-83	97-106	111-118	82,5-87,5	17 - 19	-	-	-	28,5-34,0
		Alojad	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2024	O	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	46-51
		Todos	74,5-83,5	99-106	-	84-88	17,7 - 19	-	-	37,0-41,0	36,0-42,0
		Sin CLAD	72-83	98-106	-	82,5-87,5	17,5 - 19	-	-	-	38,0-45,0
	-T72	Alojad	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Hasta 1,60	52-71	91-100	-	80-84,5	15,5 - 17,8	-	-	39,0-45,0	-
		De 1,62 a 6,35	52-71	93-102	-	-	16 - 18,1	-	-	39,0-45,0	-
-T81, -T85X	Sin CLAD	74,5-83,5	99-106	-	84-88	17,7 - 19	-	-	-	39,0-42,5	
	Alojad	-	99-106	-	83-88	17,7 - 19	-	-	35,0-45,0	-	
-T86X	Todos	83-90	105-110	-	87,5-90	18,6 - 20	-	-	37,0-41,0	36,0-42,0	
2028	T3511	Extruidos	74-76	-	-	-	-	-	-	-	28-32,5
2124	-T3	Sin CLAD	69	97	-	-	17	2,4	110	-	27,5 - 32,5
	-T8XXX	Hasta 0,99	-	-	-	84,5-88,5	-	-	-	-	38,0-42,0
		Sobre 1,62	74-86	-	-	-	-	-	-	-	38,0-42,0

## INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Sector: Calidad  
Doc: IC-01  
Rev: 00

Aleación	Estado (4)	Forma y espesor (mm)	Dureza Rockwell				Dureza Webster W-20	Dureza Brinell		Conductividad eléctrica % IACS (1)		
			B	E (6)	H	15T	Hw	Diám. (mm)	Valor	Ajolad	Sin CLAD	
2214	T451	Placas sin CLAD	-	-	-	-	-	-	110-125	-	< 37	
	T651	CLAD	-	-	-	-	-	-	140-165	-	37 - 42,2	
2218	O	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	44-49	
	-T31, -T35X	Sin CLAD	60-80	-	-	78 mín.	-	-	-	-	26,0-34,0	
	-T37	Sin CLAD	62	93	-	81	16	2,5	100	-	27,0 - 31,0	
	-T4, -T42	Sin CLAD	50-70	-	-	73,5 mín.	-	-	-	-	27,0-34,0	
	-T6, -T62, -T65X	Sin CLAD	62-80	94-105	-	82-86	16,5 - 18,8	-	-	-	-	26,0-38,0
		Aciad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Hasta 0,99	-	-	-	78-86	-	-	-	-	-	29,0-35,0
	Sobre 1,01	70-80	93-102	-	80-86	16 - 18,1	-	-	-	-	29,0-35,0	
	-T61, -T65X	Aciad	73-82	96-105	-	83-88	16,7 - 18,8	-	-	-	-	29,0-35,0
	-T67	Sin CLAD	75	-	-	84	-	2,25	125	-	-	31,0 - 35,0
2618	-T6	Forjado	70 mín.	-	-	-	-	2,24 máx.	125 mín.	-	35,3 mín.	
2624	T39	Placas	-	-	-	-	-	-	-	-	28,0-33,5	
6013	O	Sin CLAD	-	90 máx.	-	-	15,3 máx.	-	-	-	-	
	-T4, -T42	Sin CLAD	42-65	-	-	74,5-81,5	-	-	-	-	36,0-40,0	
	-T6, -T62	Chapas	64-79	-	-	81,5-84,5	-	-	-	-	40,0-44,0	
6061	O	Sin CLAD	-	-	75 máx.	-	-	3,06	40 máx.	-	42-50 (7)	
	-T4, -T451(X)	Chapas, Placas	-	60-83	-	62-73	8,3 - 13,6	-	-	-	36,0-41,0	35,0-41,0 (8)
		Barra estruñadas	-	58-78	-	59-70	8 - 12,5	-	-	-	36,0-41,0	35,0-41,0 (8)
	-T4X, -T42	Chapas, Placas	-	60-83	-	62-73	8,3 - 13,6	-	-	-	36,0-41,0	35,0-41,0 (8)
		Barra estruñadas	-	57-75	-	58-70	7,9 - 12	-	-	-	36,0-41,0	35,0-41,0 (8)
	-T6, -T62, -T65X	Sin CLAD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		De 0,40 a 0,48	-	-	-	75-84	-	-	-	-	-	40,0-50,0 (7)
		Sobre 0,51	47-72	85-97	-	78-84	14,26 - 17	-	-	-	-	40,0-50,0 (7)
		Aciad	47-72	84-96	-	74-84	14 - 16,9	-	-	-	41,0-45,0	-
	-T6X	Sin CLAD, hasta 3,17	47-72	85-97	-	78-84	14,26 - 17	-	-	-	-	40,0-50,0 (7)
Aciad, hasta 3,17		47-72	84-97	-	74-84	14 - 17	-	-	-	41,0-45,0	-	
6063	O	Todos	-	-	70 máx.	-	-	-	-	-	57,0-65,0 (7)	
	T1		-	37 mín.	-	53 mín.	3 mín.	-	-	-	48,0-58,0 (7)	
	T4		-	40 mín.	-	54 mín.	3,7 mín.	-	-	-	48,0-58,0 (7)	
	T5		-	44 mín.	-	57 mín.	4,9 mín.	-	-	-	50,0-60,0 (7)	
	T6		-	70 mín.	-	68 mín.	10,9 mín.	-	-	-	50,0-60,0 (7)	
6068	-T0	Sin CLAD	-	40 máx.	-	-	3,78 máx.	-	-	-	42,0 - 47,0 (7)	
	-T4		-	85	-	75	14,26	-	-	-	34,0 - 41,0 (7)	
	-T6		65	95	-	82	16,59	2,5	100	-	38,0 - 50,0 (7)	
7048	-T0	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	44,0 - 50,0	
	-T73		81	-	-	85	-	2,15	135	-	38,0 - 44,0	
	-T76		84	-	-	87	-	2,13	140	-	38,0 - 44,0	
7060	O	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	44-50	
	-T730X	Todos	84 mín.	-	-	87 mín.	-	-	-	-	38,0-43,0	
	T74 (8) y -T745X	Forjados con matriz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		hasta 50,8	83 mín.	-	-	-	-	-	-	-	-	41,6-45,0
		de 50,8 a 101,6	82 mín.	-	-	-	-	-	-	-	-	41,6-45,0
de 101,6 a 152,4	81 mín.	-	-	-	-	-	-	-	-	41,6-45,0		

## INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Sector: Calidad  
Doc: IC-01  
Rev: 00

Aleación	Estado (4)	Forma y espesor (mm)	Dureza Rockwell				Dureza Webster W-20	Dureza Brinell		Conductividad eléctrica % IACS (1)	
			B	E (6)	H	16T	Hw	Diám. (mm)	Valor	Alotad	sin CLAD
7060	-T74 (8) -T745K	Forjados a mano hasta 50,8	83 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		Forjados a mano de 50,8 a 101,6	82 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		Forjados a mano de 101,6 a 152,4	80 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		Forjados a mano de 152,4 a 203,2	79 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
	-T7451	Placas									
		Hasta 76,2	83 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		De 76,2 a 101,6	82 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		De 101,6 a 127	80 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
		De 127 a 203,2	79 mín.	-	-	-	-	-	-	-	40,0-45,0
	-T74511	Extruidos hasta 127	82-92	-	-	87-90,5	-	-	-	-	40,0-45,0
-T76	Todos	84-94	-	-	88-91,5	-	-	-	-	39,0-44,0	
-T76511 (3)	Extruidos hasta 127	82-94	-	-	87-90,5	-	-	-	-	39,0-44,0	
7065	T77511	Extruidos	90-94	-	-	-	-	-	-	35,5-39,5	
7075	O	Sin CLAD	22 máx.	70 máx.	95 máx.	-	10,77 máx.	-	-	-	44-48
	-T73	Sin CLAD	78	-	-	85	-	2,25	125	-	38,0 - 43,0
	-T6 -T65(X)	Sin CLAD	85-94	106-114	-	87,5-92	19 - (>20)	2,19-1,95	136-164	-	30,0-35,5
		Alotad hasta 0,91	-	-	-	95-90	-	-	-	-	-
		De 0,94 a 1,27	78-90	104-110	-	84,5-90	18,5 - 20	-	-	-	-
		De 1,30 a 1,57	76-90	104-110	-	-	18,5 - 20	-	-	-	31,0-35,0
		De 1,6 a 1,78	76-90	102-110	-	-	18,2 - 20	-	-	-	31,0-35,0
		Sobre 1,80	73-90	102-110	-	-	18,2 - 20	-	-	-	31,0-35,0
	-T76 -T7651(X)	Chapas y placas									
		Sin CLAD de 1,01 a 25,4	83-94	104-114	-	84,5-88	18,5 - (>20)	-	135-160	-	38,0-43,0
		Alotad de 1,01 a 25,4	80-94	102-114	-	82-85,5	18,2 - (>20)	-	137-160	38,5-43,0	-
		Extruidos	81-94	103-114	-	87-93,5	18,4 - (>20)	-	-	-	38,0-43,0
		Barras y forjados (todos los espesores)	78-87	103-107	-	-	18,4 - 19,1	-	126-147	-	38,0-43,0
		Placas hasta 50,8	78-94	103-114	-	-	18,4 - (>20)	-	126-169	-	38,0-43,0
		Placas sobre 50,8	74-94	101-114	-	-	18 - (>20)	-	-	-	38,0-43,0
7075 7175	-T74	Forjado hasta 76,2	85-96	106-114	-	-	19 - (>20)	-	142-179	-	38,0-43,0
		De 76,2 a 101,6	83-96	106-114	-	-	18,7 - (>20)	-	139-179	-	38,0-43,0
7085	-T7451	Placas De 101,6 a 177,8	-	-	-	-	-	-	-	40,0 - 44,0	

(1) IACS (International Annealed Copper Standard: Patrón Internacional de Cobre Recocido).

(2) El material con dureza especificado, puede estar hasta 2,0 % IACS por debajo del rango de conductividad especificado siempre y cuando también haya superado la prueba de exfoliación conforme a ASTM G-34.

(3) Los valores de conductividad eléctrica de 37,0 % IACS a 38,9 % IACS son aceptables cuando el factor de susceptibilidad a la corrosión por tensión (SCSF: Stress -

	<b>INSTRUCTIVO PARA LA MEDICION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA</b>	Sector: Calidad Doc: IC-01 Rev: 00
--	--	--

Corrosión Susceptibility Factor) del material estuviese de acuerdo con los requisitos de SAE AMS 4340.

(4) T74XX antiguamente designado T736XX.

(5) Cuando las lecturas de dureza HRE están por encima de 100, utilizar escalas alternativas siempre que sea posible.

(6) Aleaciones 7050-T74 y 7150-T74: bajas conductividades de 38.0% a 39.9% son aceptables siempre que la dureza no sea mayor a los valores mostrados en la tabla N° A.5.2. siguiente:

Tabla N° A.5.2. Limitaciones de espesor/dureza.

Espesor del material mm (pulgadas)	Dureza Máxima [HRB]
Hasta 12,7 (0,50) Inclusive	88
Por encima de 12,7 a 50,8 (0,50 a 2) Inclusive	86
Por encima de 50,8 (2)	84

(7) Los valores de conductividad provistos son sólo de referencia.

(8) Aleación 6061 en los estados T4 y T4X: Para piezas Pampa se aceptan valores de conductividad de 35 a 43 %IACS.

(9) Aleación 2014 en los estados T3, T4 y T4X: Para piezas Pampa se aceptan valores de conductividad de 30 a 35 %IACS.





## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias bibliográficas

- Aguilar, P. R. (2006). ICICM. Recuperado el 30 de Agosto de 2015, de [www.icicm.com/files/CursoCEP2.doc](http://www.icicm.com/files/CursoCEP2.doc).
- Aguilar, P.R. (2008). Recuperado el 14 de Septiembre de 2015, de ICICM: [www.icicm.com/files/CONTROL\\_ESTADISTICO\\_PROCESO.docx](http://www.icicm.com/files/CONTROL_ESTADISTICO_PROCESO.docx).
- AERTEC Solutions (2016). Recuperado el 15 de Septiembre de 2016, de : <http://www.aertecsolutions.com/2014/07/21/evolucion-en-la-mejora-de-procesos-aeronauticos/>
- Alu - Stock. (2012). El libro del aluminio. Alava: EPS comunicación.
- Aerospace Material Specification (AMS), (1989). Norma SAE AMS 2770E-1989. Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys Parts. SAE (Society of Automotive Engineers) International. USA.
- ASM Handbook. (1990). Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials colime 2 of the 10 Edition Metals Handbook. USA: ASM International, The materials information company.
- Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., Robledo C.W. (2008). Manual del Usuario del software InfoStat. Córdoba: Brujas
- Barbiero C., Flury M., Pagura J., Quaglino M., Ruiggieri M. ( 2005). Décimas Jornadas Investigaciones en la Facultad de Ciencias Económicas y Estadística de la. Recuperado el 17 de Abril de 2016, de Universidad Nacional de Rosario: <http://www.fcecon.unr.edu.ar/web-nueva/sites/default/files/u16/Decimocuartas/Barbiero,%20quaglino,%20ruiggieri,%20flury,%20la%20importancia%20de%20la%20estadistica.pdf>.
- Bartes P., Llabrés A., Grima X., Fernandez P., (1998). Metodos estadísticos: Control y mejora de la Calidad. Barcelona, España: UPC.
- Beltran, J. M. (1999). Indicadores de Gestion: Herramientas para lograr la competitividad. Colombia: 3R Editores.
- Bogotá Anzola M. G., Galindo Pabón M. T. (2015). Propiedades de los materiales utilizados en el sector aeronáutico. Obtenido de Academia Educativa.

Recuperado el 18 de Noviembre de 2015, de.:

[http://www.academia.edu/4984205/Propiedades de Materiales en Aeronautica](http://www.academia.edu/4984205/Propiedades_de_Materiales_en_Aeronautica)

- Cardenas Alvarez L. A., Guerra Serrano I. D. (2009). Diseño e Implementación de Control Estadístico de Proceso en la Empresa Forcol LTDA. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, de:  
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/131926.pdf>.
- Castro M., Gonzales J. (2000). Universidad de Leon. Recuperado el 21 de Agosto de 2015, de <http://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2000%20-%20Oviedo/Trabajos/PDF/136.pdf>.
- Castro Patiño, L. (2014a). Aleaciones de aluminio y su importancia en la industria aeroespacial. Metal Actual vol. 31, 12-20.
- Castro Patiño, L. (2014b). Tratamiento termico para aluminios. Metal Actual vol. 31, 36-43.
- Diaz E., Ruiz D. (2000). Universidad Nacional Experimental de Guayana Ingenieria en Industria Forestales. Recuperado el 20 de Marzo de 2016, de [http://www.calidad.com.mx/docs/art\\_63\\_1.pdf](http://www.calidad.com.mx/docs/art_63_1.pdf).
- Esparza P. J. (2013). Centro PYME de SLP. Programa de impulso a la capacitación operativa. Recuperado el 16 de Marzo de 2015, de [http://www.centropymeslp.org.mx/Capacitacion/Documento\\_34.pdf](http://www.centropymeslp.org.mx/Capacitacion/Documento_34.pdf).
- Grupo Combustol & Metalpo. (2011). Recuperado el 17 de Octubre de 2015, de <http://www.combustol.com.br/conteudo.php?cod=59>.
- Guillon M., Hernández A. B. (2014). Universidad Nacional del Sur. Obtenido de Universidad Tecnologica Nacional, Facultad Regional Bahia Blanca. Recuperado el 15 de Febero de 2016, de:  
[http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini\\_2014/trabajos/A\\_029.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2014/trabajos/A_029.pdf).
- Hernán, A. (2009). SISTEPLANT. Recuperado el 27 de Octubre de 2016, de: <http://www.measurecontrol.com/calidad-en-la-industria-aeronautica-producto-proceso>.
- Hornos Industriales Alferieff. (2013). Fabricante de hornos industriales Alferieff. Recuperado el 25 de Noviembre de 2015, de [http://www.alferieff.com/htm/aeron\\_aleaciones\\_aluminio.htm](http://www.alferieff.com/htm/aeron_aleaciones_aluminio.htm).



- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), (2016). Empresa multinacional de servicios. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de <http://www.pascualbravo.edu.co/pdf/calidad/indicadores.pdf>
- International Dynamic Advisors (2016). Compañía Internacional en Consultoría sobre Calidad. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de: [www.intedya.com/productos/.../AS.../PIC\\_EN%209100\\_REv01\\_Ago\\_2016.pdf](http://www.intedya.com/productos/.../AS.../PIC_EN%209100_REv01_Ago_2016.pdf)
- International Organization for Standardization (ISO), (2015). ISO 9000:2015, Sistemas de Gestión de Calidad. Fundamentos y Vocabularios. Ginebra, Suiza.
- International Organization for Standardization (ISO), (2015). ISO 9000:2015, Sistemas de Gestión de Calidad. Requisitos. Ginebra, Suiza.
- Instituto Latinoamericano de la Calidad (INLAC). (2001). Guía de bolsillo INLAC serie ISO-9000:2000. Mejoramiento continuo rumbo a la excelencia. México.
- Jiménez, M. H. (2015). Universidad de Sevilla. Implantación de la metodología Lean 6 $\sigma$  para la mejora del proceso de montaje de dos piezas en una aerestructura. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de : <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5621/fichero/PFC+FINAL1.pdf>.
- Kume, H. (1990). Métodos estadísticos para el mejoramiento de la calidad. Buenos Aires: Asociación Argentina de ex becarios de la ABK y AOTS.
- Kume, H. (2002). Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad. Bogotá, Colombia: Norma.
- Maffia, D. I. (2013). Facultad de Ingeniería. Recuperado el 20 de Septiembre de 2015,de: <https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id...id...>
- Marroquin Barron, G. B. (2003). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Implementación del control estadístico de proceso (grafico de control) en el área de corte de ensamblajes eléctricos. Recuperado el 28 de Julio de 2015, de <http://eprints.uanl.mx/2C79901D-9ECC-4469-AD0A-18169C22D2CE/FinalDownload/DownloadId-FDAA36083E14E500908C66C0B57C22C/2C79901D-9ECC-4469-AD0A-18169C22D2CE/1229/1/1020146151.PDF>

- Military Handbook (MIL-H), (1991). Norma MIL-H-6088(G)-1991. Heat Treatment of Aluminum Alloys. Department of Defense United States of América.
- Ministerio de salud de la República del Perú. (2012). Guía técnica para la elaboración de proyectos de mejora y la aplicación de técnicas y herramientas para la gestión de la calidad. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, de <http://www.hnhu.gob.pe/2C79901D-9ECC-4469-AD0A-18169C22D2CE/FinalDownload/DownloadId-B7BB608494FE9C171288D5796F39E32C/2C79901D-9ECC-4469-AD0A-18169C22D2CE/CUERPO/CALIDAD/Documentos%20Calidad/MEJORA%20CONTINUA/RM%20-%20095-2012-MINSA.pdf>.
- Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. Distrito Federal, México: Limusa S.A.
- Montgomery, D. (2005). Control estadístico de la calidad. Distrito Federal, México: Limusa S.A.
- Morales, E. E. (2004). Escuela de Graduados en Administración y Dirección de Empresas. Recuperado el 17 de Abril de 2016, de <http://www.monografias.com/trabajos15/control-estadistico/control-estadistico.shtml>.
- Mosquera-Artamonov, J. D., Artamonova, I., & Mosquera, J. C. (2014). Diagnóstico del proceso de inspección mediante índices de capacidad. Revista chilena de ingeniería, vol. 22 N° 1, 53-61.
- Origlia, G. (2016). Diario La Nación, Sección Economía, Argentina.
- Polmear, I. J. (1981). Light alloys: Metallurgy of the light metals. Londres, Inglaterra: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- Roldán Galán, M. (2007). Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Obtenido de Técnicas de obtención de grano metalografico en el rango milimetrico y centimétrico mediante diversos tratamientos termicos mecanicos. Recuperado el 19 de Agosto de 2013, de: <http://bibing.us.es/6BC13B0B-7519-46D7-945A-BBDC14447C53/FinalDownload/DownloadId-8D67B00220D13319393C9FF4A6DB06D0/6BC13B0B-7519-46D7-945A->

BBDC14447C53/proyectos/abreproy/60001/fichero/Cap%C3%ADtulo5.tratamiento+t%C3%A9rminos+en+el+aluminio%252Ftratamiento.

- TÜV SÜD (2017). Recuperado el 10 de Octubre de 2016 :<http://www.tuev-sued.es/uploads/images/1331817133854563050005/pdf3-0009-flyer-en-9100-es-4-150312.pdf>
- SCEPSA, S. d. (2014). Future SQC. Recuperado el 14 de Octubre de 2015, de Software, Hardware y Servicios para Control Estadístico de Procesos: [http://www.futuresqc.com/software\\_estadistico\\_procesos\\_futuresqc.h](http://www.futuresqc.com/software_estadistico_procesos_futuresqc.h).
- Secretaría de Ciencia, Tecnología y Producción para la Defensa. (2013). Nuevo horno Combustol en FAdA le da impulso al proyecto KC . Recuperado el 17 de Noviembre de 2015, de <http://www.ctpdef.gob.ar/nuevo-horno-combustol-en-fadea-le-da-impulso-al-proyecto-kc/>.
- Una Norma Española (UNE), 2003. UNE 66175:2003. Sistema de gestión de la calidad. Guía para la implantación de sistema de indicadores.
- Vargas Sarmiento, I. (2007). Recuperado el 16 de Junio de 2016, de Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense. Obtenido de [http://www.uthh.edu.mx/file\\_manager/19-Productividad\\_para\\_Pymes\\_1\\_.pdf](http://www.uthh.edu.mx/file_manager/19-Productividad_para_Pymes_1_.pdf).
- Yep Leung T. A. (2011). Propuesta y aplicación de herramientas para la mejora de la calidad en el proceso productivo en una planta manufacturera de pulpa y papel tisú. Recuperado el 27 de Agosto de 2015, de Pontificia Universidad Católica del Perú: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/804>.

## Bibliografía de consulta

- ASTM International. (2002). Norma ASTM E140-02 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. USA.
- Belliti, E. (2012). Control estadístico de la calidad, Parte I y II . Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, Maestría en Ingeniería en Calidad.
- Blanch, N. (2013). Probabilidad y estadística aplicada, Modulos 1-2-3-4-5. Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, Maestría en Ingeniería en Calidad.
- Douglas, H. W. (2002). Probabilidad y estadística para ingeniería. Distrito Federal: Compañía Editorial Continental.
- Facultad de Ingeniería Departamento de Aeronautica Materiales Aeronauticos . (2016). Universidad Nacional de La Plata. Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de [https://www.academia.edu/6107899/Universidad\\_Nacional\\_de\\_La\\_Plata\\_Facultad\\_de\\_Ingenier%C3%ADa\\_Departamento\\_de\\_Aeron%C3%A1utica\\_Materiales\\_Aeron%C3%A1uticos](https://www.academia.edu/6107899/Universidad_Nacional_de_La_Plata_Facultad_de_Ingenier%C3%ADa_Departamento_de_Aeron%C3%A1utica_Materiales_Aeron%C3%A1uticos).
- Grant Eugene y Leavenworth Richard. (1996). Control estadístico de calidad. Distrito Federal, Mexico: Compañía Editorial Continental.
- Hines William y Montgomery Douglas. (2002). Probabilidad y estadística para ingeniería. Distrito Federal, Mexico: Compañía Editorial Continental.
- Insertec. (2016). Insertec Hornos y Refractarios. Hornos industriales para tratamiento térmico. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de: <http://www.insertec.biz/es/hornos-industriales/hornos-tratamiento-termico/25-hornos/tratamiento-termico>.
- Joekes, S. (2013). Diseño de experimentos, Modulos 6-7-8-10. Córdoba: Universidad Tecnológica Nacional, Maestría en Ingeniería en Calidad.
- Kuehl, R. (2000). Diseño de experimentos: Principios estadístico para el diseño y análisis de investigaciones. Distrito Federal, Mexico: International Thomson Editores.

- Military Handbook (MIL-H), (1998). Norma MIL-HDBK-5(H)-1998. Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures. Department of Defense United States of America.
- Pagano, R. (1999). Estadística para las ciencias del comportamiento. Distrito Federal, Mexico: International Thomson Editores.
- Regidor, J. J.(1973). El tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio. Metal CENIM vol 9 , 385 - 398.
- Ronkenett y Shelemyahu Zacks. (2000). Estadística industrial moderna: diseño y control de la calidad y la confiabilidad. Distrito Federal, Mexico: International Thomson Editores.
- Walpole Ronald, Myers Raymond, Myers Sharon, Keying Ye. (2007). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia. Naucalpan de Juare, Estado de México : Pearson Educación.
- WebProfit. (2000-2017). Gestipolis. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de [https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17\\_GettingStarted-es-es.pdf](https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17_GettingStarted-es-es.pdf)



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 2.1. Enfoques de conformancia.....	16
Fig. N° 2.2. El ciclo PDCA o APEV.....	16
Fig. N° 2.3. Ciclos de mejora continua o ciclo de APEV.....	18
Fig. N° 2.4. Entradas y salidas de un proceso de producción.....	18
Fig. N° 2.5. Etapas de aplicación estadísticas.....	20
Fig. N° 2.6. Matriz de Hoerl.....	22
Fig. N° 2.7. Modelo general de un proceso.....	26
Fig. N° 2.8. Diagrama de Pareto por rubros de defectos.....	30
Fig. N° 2.9. Estructura del diagrama de causa-efecto.....	30
Fig. N° 2.10. Ejemplo de aplicación del diagrama de causa-efecto.....	31
Fig. N° 2.11. Modelo de histograma.....	32
Fig. N° 2.12. Gráfica de dispersión donde se observa una correlación positiva.....	33
Fig. N° 2.13. Esquema del proceso y sus control según metodología estadística.....	35
Fig. N° 2.14. Ciclo de aplicación de control estadístico de procesos.....	36
Fig. N° 2.15. Grafico de control de Shewhart.....	36
Fig. N° 2.16. Gráficos de control bajo control y fuera de control.....	38
Fig. N° 2.17. Sistema de medición.....	42
Fig. N° 2.18. Evaluación de un proceso.....	44
Fig. N° 2.19. Capacidad de máquina y de proceso, capacidad a corto y a largo plazo...	47
Fig. N° 2.20. Gráfica y la ecuación $T_i$ .....	50
Fig. N° 2.21. Esquema de la norma AS/EN9100.....	53
Fig. N° 3.1. Representación del ciclo de calentamiento y enfriamiento del tratamiento térmico de bonificado.....	60
Fig. N° 3.2. Diagrama parcial de equilibrio Al-Cu.....	61
Fig. N° 4.1. Esquema del horno de tratamiento térmico.....	67

Fig. N° 4.2. Horno de tratamiento térmico para aleaciones de aluminio.....	67
Fig. N° 4.3. Sinóptico del horno.....	68
Fig. N° 4.4. Ciclo de calentamiento del tratamiento térmico de bonificado.....	69
Fig. N° 4.5. Flujograma del proceso de tratamiento térmico de bonificado.....	70
Fig. N° 4.6. Alineación del horno con la cuba de enfriamiento con la identificación de los factores.....	76
Fig. N° 5.1. Diagrama de Pareto por ítems defectuosos.....	91
Fig. N° 5.2. Diagrama de causa-efecto de la variación de la conductividad eléctrica...	91
Fig. N° 5.3. Diagrama de Pareto de causas.....	92
Fig. N° 5.4. Gráfica de prueba de normalidad con intervalo de confianza para la conductividad eléctrica.....	97
Fig. N° 5.5. Gráfico de control de rango obtenido desde el programa Minitab.....	99
Fig. N° 5.6. Representación de la curva normal con las especificaciones.....	102
Fig. N° 5.7. Resultados de capacidad del proceso con el resumen (Six Pack).....	103
Fig. N° 5.8. Grafico del indicador de índice capacidad del proceso (ICP).....	105
Fig. N° 5.9. Grafico del indicador índice de productos conforme (IPC).....	105
Fig. N° 5.10. Grafico del indicador índice de objetivos (Ti).....	106
Fig. N° A.1.1. Grafica normal de efectos standarizados.....	115
Fig. N° A.1.2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	115
Fig. N° A.1.3. Gráfica de efectos principales para conductividad eléctrica.....	116
Fig. N° A.1.4. Gráfica de interacción para conductividad eléctrica.....	116
Fig. N° A.1.5. Grafica de optimización de la variable respuesta.....	117
Fig. N° A.2.1. Grafica de resumen de la media de los valores obtenidos en el diseño de experimento.....	119
Fig. N° A.2.2. Grafica de resumen de la media de los valores obtenidos en la corrida de confirmación.....	119
Fig. N° A.2.3. Grafica de caja de la comparación entre los valores del diseño de	



experimento y la corrida confirmación.....	120
Fig. N° A.4.1. Diagrama general para el uso del software.....	122
Fig. N° A.4.2. Ventana que muestra como se cargan los datos, los que se obtienen y el cálculo de los índices de capacidad.....	123
Fig. N° A.5.1. Estructura del instrumento.....	125
Fig. N° A.5.2. Botón de encendido.....	126
Fig. N° A.5.3. Palpador.....	126
Fig. N° A.5.4. Patrón de calibrador.....	126
Fig. N° A.5.5. Display indicador.....	127
Fig. N° A.5.6. Boton calibración.....	127

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1. Etapas de aplicación de la estadística.....	19
Tabla N° 2.2. Las herramientas de calidad y sus finalidad.....	29
Tabla N° 2.3. Tipos de gráficos de control.....	39
Tabla N° 2.4. Lista de fórmulas para líneas de control.....	40
Tabla N° 2.5. Las fórmulas de los índices de capacidad.....	48
Tabla N° 2.6. Tabla de decisiones según el valor de ICP.....	49
Tabla N° 3.1. Composición química de la aleación AA2024.....	58
Tabla N° 3.2. Conductibilidad eléctrica de la aleación AA2024.....	58
Tabla N° 4.1. Tiempo de permanencia de solubilización en función del espesor de la chapa.....	72
Tabla N° 4.2. Tiempo máximo de transferencia de carga al medio templante.....	72
Tabla N° 4.3. Prolongamiento de condición.....	73
Tabla N° 4.4. Ensayos efectuados en el producto.....	74
Tabla N° 4.5. Ensayo a efectuar a las piezas en estudio .....	74
Tabla N° 4.6. Factores y variable respuesta seleccionados.....	77
Tabla N° 4.7. Matriz de combinaciones para la variable respuesta conductibilidad eléctrica.....	79
Tabla N° 4.8. Matriz de diseño completa.....	80
Tabla N° 4.9. Resultados correspondientes a las tres corridas con la variable respuesta conductividad eléctrica.....	82
Tabla N° 5.1. Conteo de los defectos.....	90
Tabla N° 5.2. Valores correspondientes a la corrida de confirmación.....	95
Tabla N° 5.3. Prueba de Shapiro-Wilks (modificado).....	97
Tabla N° 5.4. Los valores de los límites de control.....	98
Tabla N° 5.5. Matriz del cuadro de mando.....	107

Tabla N° A.1.1. Estadística descriptiva de los factores.....	113
Tabla N° A.1.2. Análisis de la varianza.....	114
Tabla N° A.2.1. Estadística descriptiva de los valores de la conductividad eléctrica entre los valores del diseño de experimento y la corrida de confirmación.....	118
Tabla N° A.3.1. Valores mínimos recomendados del índice de capacidad de proceso (Cp) .....	121
Tabla N° A.3.2. Valores del índice de capacidad del proceso (Cp) y de la porción caída asociada para un proceso con una distribución normal (en ppm defectuosas) que está bajo control estadístico.....	121
Tabla N° A.5.1. Valores de dureza y conductividad eléctrica de aleaciones de aluminio.....	130
Tabla N° A.5.2. Limitaciones de espesor/dureza.....	133