



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN
LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN PROCESOS DE
MANUFACTURA PARA LA REDUCCIÓN DE VARIABILIDAD.**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:
ING. ROSALINDA LOZANO TORRES

DIRECTOR DE TESIS:
M.C. MANUEL DARIO HERNÁNDEZ RIPALDA

CO-DIRECTOR DE TESIS:
M.C. MOISÉS TAPIA ESQUIVIAS

CELAYA, GTO., MÉXICO, ENERO, 2020



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Asunto: *Autorización de impresión de trabajo profesional*

Celaya Gto., **16 ENERO 2020**

M.C. MOISE TAPIA ESQUIVIAS
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Presente.

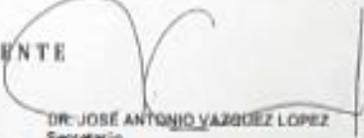
De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:

"Análisis Comparativo de Herramientas Utilizadas en la Resolución de Problemas en Procesos de Manufactura Para la Reducción de Variabilidad"

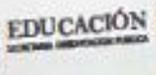
Presentado por el (a) pasante C. ING. Rosalinda Lozano Torres (M1703070) alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto. Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos con siguientes:

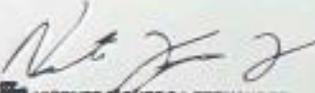
ATENTAMENTE


M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA
Presidente


DR. JOSÉ ANTONIO VAZQUEZ LOPEZ
Secretario


DR. SALVA DOR HERNANDEZ GONZALEZ
Vocal




VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ
Vocal Suplente

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya

Cop. Escuelas
Archivo
VFF/MTE/18/14

COORDINACIÓN DE MAESTRÍA DE
INGENIERÍA INDUSTRIAL



GRACIAS

**A mi asesor, quien me guió de forma acertada y, sobre todo, paciente.
A mi familia, sin ustedes habría terminado más rápido, o tal vez, nunca.
A mi familia no sanguínea, no podría elegir diferente.**

Resumen

Esta tesis destaca como enfoque principal la reducción de variabilidad a través del análisis/aplicación de diversas herramientas, mismas, aplicadas en diferentes metodologías, utilizando principalmente las herramientas de la metodología propuesta por Dorian Shainin, llamada Red X. Para la realización de la presente, se tuvo como objetivo el analizar las herramientas de la metodología Red X contra otras herramientas utilizados en la resolución de problemas en procesos de manufactura para disminuir la variabilidad en el proceso. Tomando en cuenta que se busca comprobar que las herramientas utilizadas en Red X sobresalen ante otras, es necesario tener en cuenta que dichas herramientas no han sido tan difundidas en la industria manufacturera como sus competidoras.

El estudio consistió en seis etapas fundamentales, que se desarrollaron desde la búsqueda de literatura sobre las diferentes herramientas a analizar, y hasta la aplicación de casos de estudio que nos llevan a concluir en cuales, de estos, las herramientas de Red X, ofrecen un mejor resultado en la resolución de problemas de variabilidad en el proceso, esperando que las aproximaciones resultantes ayuden en la toma de decisiones sobre que metodología o herramientas implementar en la búsqueda de la reducción de variabilidad.

El resultado principal de este manuscrito fue el confirmar la hipótesis propuesta, misma que indica que al utilizar las herramientas de Red X para la reducción de variabilidad en procesos de manufactura, dicha variabilidad bajara en mayor porcentaje que al utilizar otras herramientas que tengan la misma finalidad.

Abstract

This thesis highlights as the central focus the reduction of variability through the analysis / application of various tools, taking as a central methodology the proposal by Dorian Shainin in his so-called Red X. For the realization of this project, the objective was to analyze the tools of the Red X methodology against other tools used to solve problems in manufacturing processes to decrease the variability in the process. Considering that it is sought to verify that the tools used in Red X stand out from others, it is necessary to take into account that these tools have not been as widespread in the manufacturing industry as its competitors.

The study consisted of six fundamental stages. Stages were developed from the search for literature on the different tools to be analyzed. Until the application of case studies that lead us to conclude in which ones of these, the tools of Red X offer a best result in solving problems of variability in the process, hoping that the resulting approximations will help in taking decisions about what methodology or tools to implement in the search for the reduction of variability.

The main result of this manuscript was to confirm the proposed hypothesis, which indicates that using the tools of Red X for the reduction of variability in manufacturing processes; this variability will decrease in greater percentage than with the use other tools that have the same purpose.

Contenido

CAPITULO 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento de la investigación.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Alcances y limitaciones.....	4
2 CAPITULO 2: Marco teórico.....	6
2.1 Calidad.....	7
2.2 Enfoques de análisis de datos.....	8
2.3 El análisis exploratorio de datos.....	9
2.4 ¿Qué es un proceso manufacturero?.....	10
2.5 ¿Qué es variabilidad?.....	11
2.5.1 Medidas estadísticas necesarias.....	13
2.6 La variabilidad en procesos de manufactura.....	14
2.6.1 Coeficiente de variación.....	17
2.6.2 Gestión deficiente.....	18
2.6.3 Producto deficiente / especificaciones del proceso.....	18
2.6.4 Especificaciones de componentes deficientes.....	18
2.6.5 Herramientas y sistemas de calidad inadecuados.....	19
2.6.6 Materiales de proveedores deficientes.....	20
2.7 Métodos utilizados para controlar la variabilidad en procesos manufactureros.....	20
2.7.1 Las 7 herramientas de la calidad.....	20
2.7.2 Las 7 nuevas herramientas de la calidad.....	29
2.7.3 Control estadístico de procesos (SPC).....	36
2.7.4 DOE clásico.....	36
2.7.5 Taguchi.....	38

2.7.6	Seis Sigma.....	40
2.7.7	Dorian Shainin.....	41
2.7.8	¿Cuál es el enfoque más adecuado?	42
2.8	Red X.....	44
2.8.1	¿Qué problemas resuelve y qué herramientas utiliza para lograrlo?.....	46
2.8.2	¿Es la mejor técnica posible?	55
2.9	Estado del arte.....	56
3	CAPITULO 3: Método.....	59
3.1	Definir Red X y otras metodologías de solución de variabilidad en el proceso	60
3.2	Seleccionar y desarrollar herramientas a comparar por metodología.....	61
3.3	Obtener casos necesarios para comparar las herramientas seleccionadas.	61
3.3.1	Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”.....	62
3.3.1	Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”	63
3.3.2	Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”	64
3.4	Aplicar casos propuestos y analizar datos resultantes.	65
3.4.1	Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”.....	65
3.4.2	Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”	69
3.4.3	Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”	75
3.5	Definir un criterio de medición para la prueba de hipótesis	77
3.6	Concluir en qué casos específicos es mejor Red X en la solución de problemas..	79
3.6.1	Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”.....	79
3.6.2	Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”	79
3.6.3	Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”	80
4	CAPITULO 4: Resultados y discusión	81
4.1	Resultados	82
4.2	Discusión	84
5	Bibliografía.....	85
6	ANEXOS.....	91

Lista de tablas

Tabla 2:1 Fuentes, causas y reducción de la variación. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000).	15
Tabla 2:2 Herramientas de calidad utilizadas en el control de la variabilidad en productos/procesos. Fuente: Autor	20
Tabla 2:3.- Tiempo de espera en cajero automático en segundos	22
Tabla 2:4.- Distribución de frecuencia	23
Tabla 2:5.- Defectos en pintura	24
Tabla 2:6.- Segmentación de datos por vacuo secadora.	27
Tabla 2:7 Comparativa de enfoques utilizados en el Diseño de Experimentos. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000)	43
Tabla 2:8 Etapas de la búsqueda de variables. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000)	48
Tabla 2:9 Pros y contras del método de DOE de Shainin. Fuente: (Kam Hoe , Hui Leng, Halim, & Rudd, 2013).	55
Tabla 3:1 Clasificación de variables en la producción de frascos de vidrio (Minitab 18, 2017).	62
Tabla 3:2 Tipos de no conformidades, clave asignada y cantidad observada.	63
Tabla 3:3 Niveles actual y propuesto de factores	64
Tabla 3:4Matriz de niveles de factores y defectos encontrados	64
Tabla 3:5 Anidación de variables	67
Tabla 3:6 Defectos, claves, observaciones e indicadores previo pareto.....	69
Tabla 3:7 Resultados de la búsqueda de variables	75
Tabla 3:8.- Herramientas propuestas para la categoría “Generar/ ordenar ideas” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.	77
Tabla 3:9 Herramientas propuestas para la categoría “Recolectar y presentar información” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.	78
Tabla 3:10 Herramientas propuestas para la categoría “Conocimiento del proceso” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.	78
Tabla 4:1 Herramientas comparadas en "Conocimiento del proceso". Fuente: Autor.	82
Tabla 4:2 Herramientas comparadas en "Generar / ordenar ideas". Fuente: Autor.	82

Tabla 4:3 Herramientas comparadas en "Recolectar resultados y presentar información". Fuente: Autor.....	83
Tabla 6:1 Datos utilizados en la comparativa de herramientas de la categoría "Conocimiento del proceso "	92
Tabla 6:2 Observaciones de defectos en pintura	97

Lista de figuras

Figura 2-1.- Clasificación de los procesos de manufactura. Fuente: Autor.	11
Figura 2-2.- Las 6M en la variabilidad. Fuente: Autor.....	12
Figura 2-3.- Diagrama de causa y efecto. Fuente: Autor.....	21
Figura 2-4.- Hoja de comprobación para no conformidades de pintura. Fuente: Autor.....	22
Figura 2-5.- Histograma de datos Tabla 2:3.	24
Figura 2-6.- Diagrama de Pareto sobre defectos en pintura. Fuente: Autor	25
Figura 2-7.- Tipos de dispersión (a). Fuente: Autor	26
Figura 2-8.- Tipos de dispersión (b). Fuente: Autor.....	26
Figura 2-9.- Tipos de dispersión (c). Fuente: Autor	26
Figura 2-10.- Gráfico de estratificación de humedad vs pH. Fuente: Autor	28
Figura 2-11.- Elementos de una carta de control. Fuente: Autor.	29
Figura 2-12.- Diagrama de Afinidad. Fuente: Autor.	30
Figura 2-13.- Fases del diagrama de árbol. Fuente: Autor	32
Figura 2-14.- Relación entre cuatro tipos de datos. Fuente: Autor.....	33
Figura 2-15.- Ejemplo de diagrama portfolio. Fuente: (Sangüesa Sánchez, Mateo Dueñas, & Izarbe Izquierdo, 2006).	34
Figura 2-16.- Diagrama de flechas del ciclo de planeación y control.	35
Figura 2-17.- Función de perdida de Taguchi. Fuente: Autor	39
Figura 2-18.- El sistema Shainin. Fuente: (Shainin, 1993)	46
Figura 2-19.- Familias de variación. Fuente: (Lozano Torres, Hernández Ripalda, & Jiménez García, 2019)	49
Figura 2-20.- Distribuciones posibles en B vs C. Fuente: Autor.....	51
Figura 2-21.- Evaluación de la precisión de gage por isoplot. Fuente: (Wen-Kuei & Cheng- Feng, 2014).....	53

Figura 2-22.- Zonas de precontrol. Fuente: Autor.....	54
Figura 2-23.- Precontrol para tolerancias unilaterales superiores. Fuente: Autor.	54
Figura 2-24.- Precontrol para tolerancias unilaterales inferiores. Fuente: Autor	55
Figura 3-1.- Método de la investigación.....	60
Figura 3-2.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma A. Generado en Minitab 18.	66
Figura 3-3.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma B. Generado en Minitab 18.....	66
Figura 3-4.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma C. Generado en Minitab 18.....	66
Figura 3-5.- Resultados ANOVA anidado. Generado en Minitab 18.	67
Figura 3-6 Gráfico de variabilidad. Generado en JMP 14.....	67
Figura 3-7 Carta de Individuales para temperaturas en hornos. Generado en Minitab 18. ..	68
Figura 3-8 Carta \bar{X} para temperatura de acuerdo a los turnos muestreados. Generado en Minitab 18.	68
Figura 3-9 Carta X -R para temperatura de acuerdo a cada planta. Generado en Minitab 18.	68
Figura 3-10 Diagrama de afinidad sobre defectos de pintura. Fuente: Autor	69
Figura 3-11 Diagrama de Pareto sobre defectos de pintura. Generado en Excel	70
Figura 3-12 Diagrama causa - efecto sobre defectos de pintura. Generado en Minitab 18..	70
Figura 3-13 Diagrama de dispersión sobre frecuencia de oportunidades. Generado en Excel	73
Figura 3-14 Hoja de comprobación pieza individual. Fuente: Autor	74
Figura 3-15 Hoja de comprobación para inspección de lotes y/o turnos. Fuente: Autor	75
Figura 3-16 Evaluación del proceso normal (C) vs propuesto (B).....	76
Figura 3-17 ANOVA para problema "Defectos de soldadura". Generado en Design-Expert 7	76

Lista de ecuaciones

Ecuación 2-1 Media muestral	$x = x_1 + x_2 + \dots + x_n$	13
Ecuación 2-2 Varianza	$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	14
Ecuación 2-3 Desviación estándar	$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2}$	14
Ecuación 2-4 Coeficiente de variación $CV = \frac{S}{\bar{x}}$		17
Ecuación 2-5 Función de perdida de Taguchi $L_y = k(y - t)^2$		39

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento de la investigación

México enfrenta grandes retos de calidad en la manufactura tales como desarrollo, uso y adopción de tecnología, desarrollo y mejora de procesos, así como generar mayor confianza entre los integrantes de la cadena de suministros para mejorar los márgenes de utilidad en los tiempos de respuesta. Las plantas armadoras de vehículos de México quedaron fuera del grupo de las 10 mejores en el mundo en el 2014, respecto al nivel de calidad del producto y las fallas que detectaron en sus unidades, reveló Initial Quality StudySM (IQS) J. D. Power 2014 (González, 2014).

El origen de los defectos de calidad tiene tanto causas comunes como causas especiales, lo cual hace que su diagnóstico y eliminación parezcan complicadas. Existen diversas metodologías que combaten dichos defectos de calidad como son: Red X, Seis Sigma, Taguchi, DOE clásico, entre otros, de los cuales, se desprenden diversas herramientas que, aunque podrían parecer similares entre sí, cada una tendrá beneficios y objetivos diferentes. Red X, una de las metodologías con menor difusión, ofrece 7 herramientas para lograr reducir la variabilidad de cualquier proceso de forma rápida y más barata que los otros, basándose en la búsqueda y eliminación de la causa raíz de los problemas dentro del proceso.

El estado de Guanajuato experimenta una tendencia de cambio continuo en su industria manufacturera. De acuerdo con el INEGI (2019), existen 30,754 establecimientos económicos dedicados a la industria manufacturera Mostrando un crecimiento en comparación a datos de 2018 del 8.74% en establecimientos con más de 101 trabajadores (de 286 a 311) y 6.6% en establecimientos con más de 250 trabajadores (de 288 a 307). Es posible predecir que el aumento o crecimiento en la industria, trae consigo también un crecimiento en la necesidad de mejora continua en los procesos.

El tener un proceso bajo control, no significa que la variabilidad del mismo no pueda reducirse o controlarse aún más, por lo que conocer las herramientas existentes para la reducción de variabilidad es obligatorio, ya que, al aplicarlas correctamente, esto desencadenara un control del proceso más estricto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar las herramientas de Red X contra otras herramientas utilizadas en la resolución de problemas en procesos de manufactura para disminuir la variabilidad en el proceso.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Búsqueda y análisis de metodologías enfocados a la solución de variabilidad en el proceso.
2. Identificar las herramientas utilizadas dentro de cada metodología para la reducción de variabilidad.
3. Generar y buscar casos necesarios para la comparación de metodologías.
4. Analizar los resultados de la aplicación de las diferentes herramientas y probar hipótesis.

1.3 Hipótesis

Si se aplican las herramientas de Red X en la solución de problemas de variabilidad en el proceso de manufactura, entonces será posible reducir dicha variabilidad en un porcentaje mayor que utilizando herramientas de otras metodologías que tengan la misma finalidad.

1.4 Justificación

“La máxima más importante a considerar en el análisis de datos, que muchos estadísticos parecen haber dejado de lado, es: Por mucho, es mejor una respuesta aproximada a la pregunta correcta, aunque sea bastante vaga, que una respuesta exacta a la pregunta incorrecta, aunque pueda hacerse con mucha precisión” (Tukey, 1962). En la búsqueda de la calidad total, existen cada día nuevos problemas por resolver, los cuales no podrán siempre ser resueltos con las metodologías de mayor auge o renombre por lo cual es necesario el conocimiento de la mayor cantidad de metodologías disponibles y elegir la que se adecue mejor a la organización.

La presente investigación fue de gran importancia ya que muestra un conjunto de herramientas con las que cuentan las empresas para la mejora continua en la reducción de variabilidad, destacando las herramientas propuestas por Dorian Shainin dentro de su metodología Red X. Asimismo, el lector puede encontrar aplicaciones de las mismas, abriendo paso a la generación de posibles comparativas, lo que desencadena una mayor claridad al momento de elegir las herramientas a utilizar de acuerdo a la etapa del proceso donde se encuentre el problema de variación.

De acuerdo con lo anterior, al ser aplicadas correctamente las herramientas necesarias, la empresa que las utilice, no solo podrá mejorar en un sentido metodológico, sino que también mejorará en ámbitos económicos y sociales. En el ámbito económico, es claro que, a menor variabilidad en el proceso, menor pérdidas por deficiencia de calidad. En tanto al ámbito social, se debe tener en cuenta que la Ingeniería Estadística nos impulsa a utilizar métodos y principios en la resolución de problemas que finalmente, buscan un beneficio para la sociedad.

La investigación abrigó distintas etapas que se enfocaron en comprobar que las herramientas ofrecidas dentro de la metodología Red X, son la mejor opción para la reducción de la variabilidad de procesos en determinados escenarios. Dentro de las etapas de esta investigación se realizaron comparaciones de herramientas de diferentes metodologías para poder comprobar nuestra hipótesis. Finalmente, en el apartado de conclusiones, se dan a conocer bajo que conceptos las herramientas de Red X son la mejor opción aplicable para la reducción de variabilidad en los procesos manufactureros.

1.5 Alcances y limitaciones

Se compararon herramientas de Red X contra diferentes herramientas utilizadas en la mejora de procesos, partiendo de una clasificación propuesta de las mismas. Las categorías y las herramientas que se comparan dentro de las mismas son:

❖ Generar / ordenar ideas

✓ Diagrama de afinidad

✓ Diagrama Ishikawa

- ✓ Diagrama Pareto
- ✓ Búsqueda de componentes
- ✓ Búsqueda de variables
- ❖ Recolectar resultados y presentar información
 - ✓ Diagrama de dispersión
 - ✓ Hoja de comprobación
 - ✓ Estratificación
 - ✓ B vs C
- ❖ Conocimiento del proceso
 - ✓ Diagrama de variabilidad
 - ✓ Diagrama Multi-vari
 - ✓ ANOVA
 - ✓ ANOVA anidado
 - ✓ Cartas control

Estas herramientas son solo las más utilizadas/ conocidas para disminuir la variabilidad en procesos de manufactura.

CAPITULO 2: Marco teórico

2.1 Calidad

En el campo de la manufactura, el término calidad es referido como el cumplimiento de la totalidad de las características y herramientas de un producto o servicio que tienen importancia en relación con la necesidad de satisfacer ciertas dudas. La calidad es una entidad alcanzable, medible y rentable que puede ser incorporada, una vez que se desee hacerlo, se entienda y se esté preparado para un arduo trabajo. La calidad se mide por el costo de la calidad, el cual, es el gasto ocasionado por no cumplir con los requisitos -el costo de hacer las cosas mal- (Crosby, 1987).

Según Taguchi, Chowdhury y Wu (2005), la calidad de un producto es una pérdida que se le da a una sociedad después de su envío. La norma UNE 66-001-92 (Normalización Española) nos comenta que la calidad es un conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas. Alonso V. Carot (2004) se basa en el concepto de Genichi Taguchi para definir calidad, y nos dice que la calidad de un producto es la mínima pérdida impuesta por este producto a la sociedad durante la vida de dicho producto destacando que la pérdida impuesta a la sociedad coincide con la pérdida a largo plazo de la empresa.

La década de los 80's se distingue por alcanzar la calidad en todos los aspectos dentro de las empresas de producción, de negocios y de servicios en los Estados Unidos. En esa fase, la calidad pasó a ser la estrategia de la empresa dirigida por la Dirección. En la actualidad, la calidad total (TQM) es una nueva forma de Gestión de la Calidad que tiene como objetivo administrar las actividades y mejoramiento de la calidad en la organización completa.

El uso de técnicas de control de la producción para obtener cierto nivel de calidad se remonta al nacimiento de la industria, e incluso a periodos anteriores en los que se desarrollaba un trabajo artesanal y el nivel de calidad del producto se aseguraba con la experiencia del artesano y el adiestramiento del aprendiz. La variabilidad de los procesos hace surgir la necesidad de utilizar técnicas estadísticas que permitan medir, describir, analizar, interpretar y modelar dicha variabilidad, dichas técnicas estadísticas ayudan a utilizar de mejor manera los datos disponibles para la toma de decisiones, contribuyendo en la mejora continua y logrando así una mayor satisfacción del cliente.

El control de la calidad es la aplicación de técnicas y esfuerzos para lograr mantener y mejorar la calidad de un producto o servicio. Implica la integración de técnicas y actividades relacionadas entre sí. A todas las acciones planeadas o sistemáticas que se necesitan para garantizar que un producto o servicio satisfaga determinados requisitos de calidad se le conoce como garantía de calidad, misma que tiene como objetivo general el mejorar la calidad del producto en conjunto con los diversos departamentos correspondientes dentro de la empresa.

2.2 Enfoques de análisis de datos.

En el campo de la estadística, se denomina “análisis de datos” a un conjunto de métodos descriptivos multidimensionales. La aplicación de dichos métodos nos permite examinar un conjunto de datos con el propósito de sacar conclusiones sobre la información para la toma de decisiones o la ampliación del conocimiento sobre diversos temas. Existen dos grandes familias que nos pueden servir para clasificar el análisis de datos, en un extremo encontramos el análisis de datos cuantitativo donde los datos se presentan de forma numérica y se basa en los resultados tangibles; en el otro extremo, encontramos el análisis de datos cualitativo, donde los datos se presentan de manera verbal y se basa en la interpretación.

Tres enfoques populares del análisis de datos son Clásico, Exploratorio (EDA) y Bayesiano. Estos tres enfoques son similares ya que en todos se comienza con un problema general de ciencia/ingeniería y todos arrojan conclusiones de ciencia/ingeniería. La diferencia es la secuencia y el enfoque de los pasos intermedios. (Kanevski & Maignan, 2004)

- Para el análisis clásico, la secuencia es:

Problema → Datos → Modelo → Análisis → Conclusiones

- Para EDA, la secuencia es:

Problema → Datos → Análisis → Modelo → Conclusiones

- Para el análisis bayesiano, la secuencia es:

Problema → Datos → Modelo → Distribución Previa → Análisis → Conclusiones

Los métodos para tratar con los modelos subyacentes son los tres enfoques. Por lo tanto, el análisis clásico, la recopilación de datos es seguido por la imposición de un modelo (normalidad, linealidad, etc.) y el análisis, estimación y prueba que vienen a continuación, están enfocados en los parámetros de ese modelo. Para EDA, la recopilación de datos no es seguida por una imposición del modelo; más bien es seguida inmediatamente por el análisis con el objetivo de inferir qué modelo sería apropiado. Finalmente, para un análisis bayesiano, el analista intenta incorporar conocimiento/experiencia científica/ingenieril en el análisis mediante la imposición de una distribución independiente de los datos en los modelos seleccionados. (Kanevski & Maignan, 2004)

En el mundo real, el análisis de datos mezcla libremente elementos de los tres enfoques anteriores (y otros enfoques). Las distinciones anteriores se hicieron para enfatizar las principales diferencias entre los tres enfoques mencionados. (Kanevski & Maignan, 2004)

2.3 El análisis exploratorio de datos

El Análisis de datos exploratorios (EDA) es un enfoque que tiene como objetivo extraer conocimiento a partir de información (principalmente) numérica e identificar el modelo más adecuado para representar la población de la cual proceden los datos muestrales. Para describir un conjunto de datos se comienza con un análisis individual de cada variable y posteriormente se estudian las relaciones entre variables. El análisis de datos que emplea una variedad de técnicas (principalmente gráficas y posteriormente se calculan resúmenes numéricos) para:

- Maximizar el conocimiento de un conjunto de datos
- Descubrir la estructura subyacente
- Extraer variables importantes
- Detectar valores atípicos y anomalías
- Probar suposiciones subyacentes
- Desarrollar modelos parsimoniosos
- Determinar la configuración óptima del factor

El análisis exploratorio de datos es un trabajo de detective; un detective que investiga un crimen necesita herramientas y comprensión. Si no se tiene polvo para huellas dactilares, no podrá encontrarlas en la mayoría de las superficies. Si no comprende donde es probable que el criminal haya puesto los dedos, no mirará en los lugares correctos. Igualmente, el analista de datos necesita herramientas y comprensión (Tukey, *Exploratory data analysis*, 1977). EDA es un enfoque que nos lleva a diseccionar un conjunto de datos; lo que buscamos; cómo nos vemos; y cómo interpretamos.

La razón de la gran dependencia de los gráficos es que, por su propia naturaleza, la función principal de EDA es explorar con mente abierta, y los gráficos dan a los analistas el poder incomparable para hacerlo, atrayendo a los datos a revelar sus secretos estructurales, y estando siempre listos para obtener una nueva percepción, a menudo insospechada, de los datos. En combinación con las capacidades naturales de reconocimiento de patrones que todos poseemos, los gráficos proporcionan, por supuesto, una potencia sin igual para llevarlo a cabo.

Según Mikhail Kanevski y Michel Maignan (2004) en su libro “*Analysis and modelling of spatial environmental data*” las técnicas gráficas particulares empleadas en EDA son a menudo bastante simples, que consisten en varias técnicas de:

- Trazar los datos brutos (como trazas de datos, histogramas, diagramas de probabilidad, diagramas de retraso, diagramas de bloques y diagramas de Youden).
- Trazar estadísticas sencillas, como tramas medias, trazados de desviación estándar, diagramas de cajas y gráficos de efectos principales de los datos brutos.
- Posicionar dichos gráficos para maximizar nuestras habilidades naturales de reconocimiento de patrones, como el uso de múltiples gráficos por página.

2.4 ¿Qué es un proceso manufacturero?

En el campo de la industria, un proceso manufacturero es definido como la aplicación de todo método que agregue valor al material original transformando su forma (metalurgia extractiva, fundición, moldeo de plásticos, etc.), propiedades (tratamientos térmicos, tratamientos termoquímicos, etc.) o apariencia (pulido, recubrimiento, etc.); generalmente para un fin comercial. Existen distintos criterios de clasificación para la organización de los

procesos de manufactura, siguiendo criterios de orden mecánico, químico, físico, etc. Definitivamente, el concepto es muy amplio ya que abarca todo tipo de industria de fabricación.

Los procesos de manufactura se dividen en 2 tipos básicos (figura 2-1): 1) operaciones del proceso, y 2) de ensamblado. Una operación del proceso hace que un material de trabajo pase de un estado de acabado a otro más avanzado que está más cerca del producto final que se desea. Se agrega valor cambiando la geometría, las propiedades o la apariencia del material de inicio. En general, las operaciones del proceso se ejecutan sobre partes discretas del trabajo, pero algunas también son aplicables a artículos ensamblados. Una operación de ensamble une 2 o más componentes a fin de crear una entidad nueva llamada ensamble, subensamble o algún otro termino que se refiera al proceso de unión. (Groover, 2007)

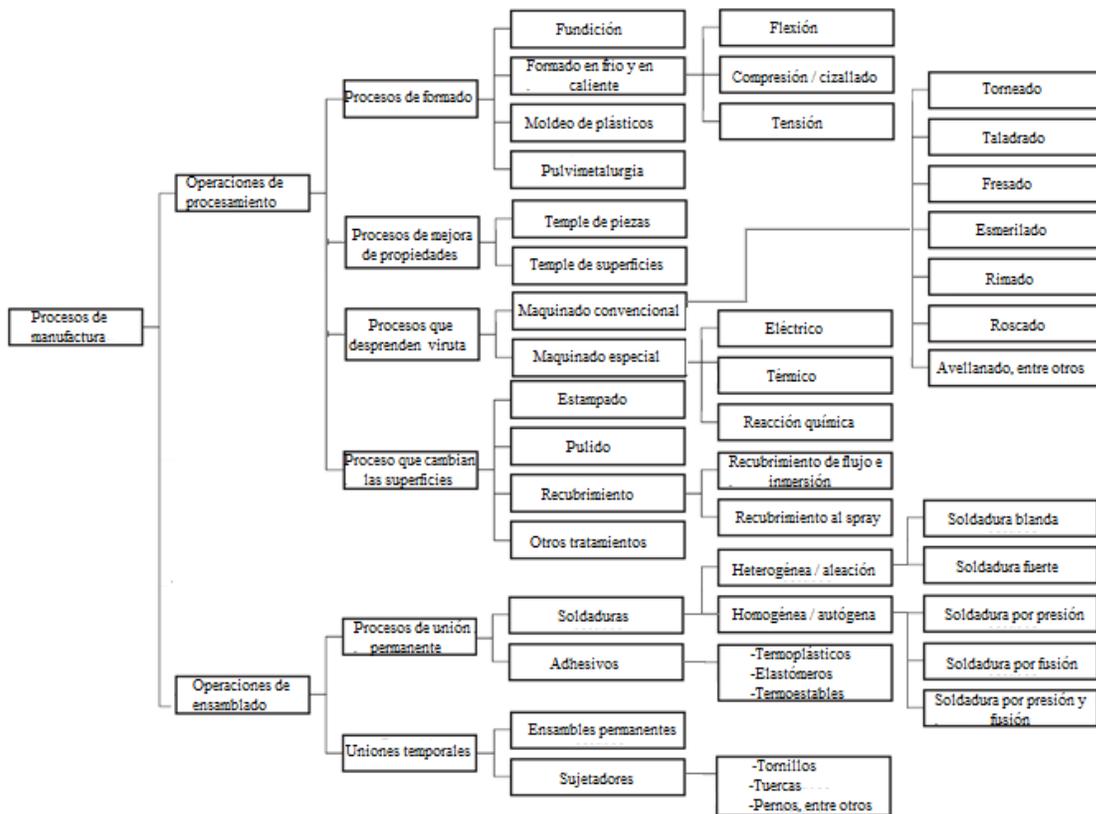


Figura 2-1.- Clasificación de los procesos de manufactura. Fuente: Autor.

2.5 ¿Qué es variabilidad?

“El enemigo de todo proceso es la variación”

-W. Edward Deming-

¿Qué es exactamente la variabilidad? Una definición formal es la calidad de no uniformidad de una clase de entidades. En los sistemas de fabricación, hay muchos atributos en los que la variabilidad es de interés. Dimensiones físicas, tiempos de proceso, falla de la máquina / tiempos de reparación, calidad. las medidas, temperaturas, dureza del material, tiempos de preparación, etc. son ejemplos de características que son propensas a la falta de uniformidad (Hopp & Spearman, 2001).

Variabilidad puede definirse también como aquel comportamiento que presenta todo fenómeno observable que se repite bajo las mismas condiciones y, que se debe a todos aquellos factores que no son controlables (ruido) y que influyen sobre él. Es decir, son todas aquellas diferencias, desigualdades o disconformidades en los resultados de una variable, que están afectando a la producción y que no aportan ningún valor a los requerimientos del cliente. Es necesario afirmar y asentar que la variación es inevitable, es aplicable a todos los resultados o características de esos resultados y es generada por el sistema, es decir, cada parte de todo lo que se hace varía.

La variabilidad como tal, es parte de nuestra vida diaria; por ejemplo, el tiempo que tardamos en trasladarnos de nuestra casa al trabajo o escuela es diferente de un día a otro; la temperatura del ambiente es distinta de una hora a otra; lo dulce de una bebida que es preparada en casa es diferente de un día a otro, aunque aparentemente se preparó igual, etc. Esta variación que ocurre en nuestra vida diaria está presente en los procesos de las empresas. Es necesario entender las causas de la variación, y para ello se parte de que en un proceso (industrial o administrativo) interactúan materiales, maquinas, mano de obra, mediciones, medio ambiente y mano de obra (gente) (Gutiérrez

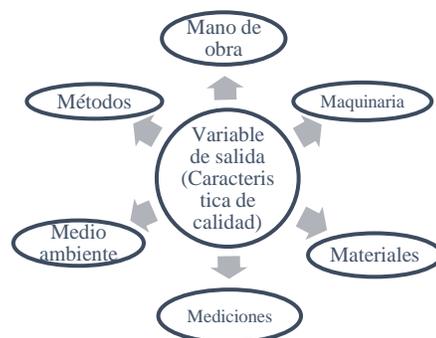


Figura 2-2.- Las 6M en la variabilidad.

Fuente: Autor.

Pulido & de la Vara Salazar, 2013). Los 6 elementos antes mencionados (6 M) determinan de manera global todo proceso y cada uno aporta algo de la variabilidad y la calidad de la

salida del proceso, tal como se esquematiza en la figura 2-23. El resultado de todo proceso se debe a la acción conjunta de las 6 M, por lo que, si hay un cambio significativo en el desempeño del proceso, sea accidental u ocasionado, su razón se encuentra en una o más de las 6 M. Es necesario monitorear los procesos, ya que a través del tiempo ocurren cambios en las 6 M, como la llegada de un lote de material no adecuado o con características especiales, descuidos u olvidos de la gente, desajuste y desgaste de máquinas y herramientas, entre otros. La segunda ley de la termodinámica dice que cualquier sistema tiende a aumentar su entropía, es decir, un proceso que se deja libre sin intervenirlo, ajustarlo o mejorarlo, tiende a aumentar su desorden. (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, Control estadístico de la calidad y Seis Sigma, 2013).

2.5.1 Medidas estadísticas necesarias

Para lograr analizar adecuadamente la variabilidad, es necesario ser capaces de cuantificarla, de manera que, para lograrlo, hacemos uso de medidas estándar de estadística importantes para describir características particulares de los datos. A continuación, se describen algunas de éstas y se comparte de la misma manera los datos necesarios para su cálculo.

- *Media*: ésta es la medida más común para ubicar la tendencia central de una serie de datos, también es llamada promedio aritmético ordinario. De acuerdo con la Ecuación 2-1, la media se calcula sumando todos los datos contenidos en la serie y dividiendo el resultado obtenido entre el número de datos sumados.

Ecuación 2-1

Media muestral

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

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

Donde:

\bar{x} = media de la muestra

x_i = términos del conjunto de datos

Σ = sumatoria

n = tamaño de la muestra

- *Varianza:* de acuerdo con la Ecuación 2-2, la varianza es una medida de dispersión definida como la desviación estándar al cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media. O en pocas palabras, es la media de los residuos al cuadrado.

Ecuación 2-2

$$\text{Varianza} \quad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Donde:

S^2 = varianza de la muestra

x_i = términos del conjunto de datos

\bar{x} = media de la muestra

Σ = sumatoria

n = tamaño de la muestra

- *Desviación estándar:* de acuerdo con la Ecuación 2-3, la desviación estándar, S , es la raíz cuadrada de la varianza muestral (Montgomery & Runger, Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, 1996).

Ecuación 2-3

$$\text{Desviación estándar} \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:

S = desviación estándar

x_i = términos del conjunto de datos

\bar{x} = media de la muestra

Σ = sumatoria

n = tamaño de la muestra

2.6 La variabilidad en procesos de manufactura

Como se describe anteriormente, la variabilidad puede tener tanto causas comunes como especiales y las principales fuentes de variación pueden ser agrupados en las siguientes categorías: gestión deficiente, producto deficiente/especificaciones del proceso, especificaciones de componentes deficientes, sistema de calidad inadecuados, prácticas de

fabricación deficiente, materiales de proveedores deficientes y errores de “operador”. (Bhote & Bhote, 2000) En la tabla 2:1, se pueden apreciar las fuentes antes mencionadas y las posibles causas que las originan, así como algunas posibles soluciones.

Tabla 2:1 Fuentes, causas y reducción de la variación. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000).

	Causa	Reducción de variabilidad
Gestión deficiente	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sin conocimiento o política sobre la reducción de la variación. ➤ No tener recursos ni tiempo asignados al DOE. ➤ Falta de involucramiento en DOE. ➤ Sin entrenamiento o implementación de DOE. ➤ SPC y gráficos de control, especialmente para la resolución de problemas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gerencia con entrenamiento en visión general del DOE. ➤ Comité directivo para la gestión del DOE. ➤ Capacitación y talleres de DOE para las personas necesarias. ➤ Monitorear el proceso DOE en lugar de solo metas y resultados • Implementación de funciones de calidad y personalización masiva.
Producto deficiente / especificaciones del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • No capturar la voz del cliente • Vender sobre mercadeo. • Empujar diseños del estado del arte. • Tolerancias amplias contra valores objetivo. • La fiabilidad no es una especificación. • Sin DOE en pruebas de sistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseños evolutivos contra revolucionarios. • Tener valores objetivos y aplicar DOE para lograrlos. • Optimizar el equipo viejo, no deshacerse de él. • Entorno múltiple sobre pruebas de estrés para confiabilidad.

Especificaciones de componentes deficientes	<ul style="list-style-type: none"> • Fascinación con la tecnología. • Tolerancias ajustadas e indiscriminadas. • Especificaciones repetidas; publicadas por el proveedor. • Monte Carlo y el peor caso de análisis. • Fórmulas que relacionan variables inexistentes, incorrectas o incapaces de determinar efectos de interacción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Extensión del DOE en la adaptación del cliente. • TPM. • Técnicas DOE en la etapa de ejecución piloto para separar las variables importantes de las no importantes. • Paralelogramo de tolerancia realista (dispersión).
Herramientas y sistemas de calidad inadecuados	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-9000, QS-9000, Malcolm Baldrige, el EQA y TQM (gestión de calidad total) son todos inadecuados. • Periféricos de calidad pasados por alto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura de un sistema de calidad “Big Q”. • Positrol (soporte de trabajo), certificación de procesos, precontrol.
Prácticas de fabricación deficientes	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos operativos estándar: inadecuado / demasiado difícil. • Mantenimiento preventivo inadecuado. • Sin controles ambientales. • Metrología inadecuada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Participación de los trabajadores en la formulación de procedimientos operativos estándar. • Mantenimiento totalmente productivo.
Materiales de proveedores deficientes	<ul style="list-style-type: none"> • Demasiados proveedores. • Control mediante negociaciones y golpes de mesa. • AQL inspección entrante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proveedor de sociedad “mejor en su clase”. • Proximidad física, ayuda continua. • Capacitación DOE.

“Errores del operador”	<ul style="list-style-type: none"> • Instrucciones deficientes, capacitación. • Proceso, materiales o equipo deficientes. • Diseño para no fabricar. • Inspección externa. • Síndrome de “par de manos”. 	<ul style="list-style-type: none"> • C_{pk} de 2.0 como mínimo. • Capacitación en DOE. • Estimulo, apoyo, participación de la gerencia. • Auto inspección y poka-yoke (corrección de errores). • Ganancia compartida. • Empoderamiento.
------------------------	---	---

2.6.1 Coeficiente de variación

En ocasiones es deseable expresar la variación como una fracción de la media. Para hacer esto se utiliza una medida adimensional de variación relativa, denominada coeficiente de variación muestral. La Ecuación 2-4 muestra que para conocer el coeficiente de variación (CV), la desviación estándar se divide entre la media. Este coeficiente es útil cuando se compara la variabilidad de dos o más conjuntos de datos que difieren de manera considerable en la magnitud de las observaciones. Por ejemplo, el CV puede ser de utilidad al comparar la variabilidad del consumo de energía eléctrica por día en muestras tomadas en distintos conjuntos residenciales durante un determinado mes del año (Montgomery & Runger, Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, 1996)

Ecuación 2-4

Coeficiente de variación

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = media de la muestra

2.6.2 Gestión deficiente

Deming estimó que hasta el 85 por ciento de todos los problemas de calidad podrían corregirse realizando cambios en el proceso, y solo el 15 por ciento podría ser controlado por los trabajadores en la línea (Brewer & Dittman, 2013). El ataque a la variabilidad en la gestión debe comenzar con una comprensión de la economía de la reducción de la variación. Se requiere un comité directivo de alta dirección para iniciar la capacitación en el DOE, seguido de talleres y " aprender haciendo " para la gente técnica. El comité también debería participar en el proceso DOE para mejorar y no limitarse a la formulación de objetivos de alto nivel y al seguimiento de los resultados en revisiones de operaciones estériles (Bhote & Bhote, 2000).

2.6.3 Producto deficiente / especificaciones del proceso

El mayor error cometido en este tipo de variación es la falta de entendimiento entre la comercialización y la venta. Con las ventas, el departamento de diseño y la compañía en crean un producto que trataran de vender a toda costa a los clientes, utilizando métodos ya conocidos como la publicidad. Por otro lado, la comercialización, está dirigida a escuchar la voz del cliente, y diseñar productos a base de lo que el cliente quiere o necesita. El peor error que se comete con este tipo de variación es fabricar el producto perfecto que el cliente ni quiere ni necesita.

TPM es por sus siglas en ingles Mantenimiento Productivo Total que refiere a mantener los equipos en disposición para producir a su capacidad máxima productos de la calidad esperada, sin paradas no programadas; teniendo la participación de todo el personal, cultura corporativa orientada a la obtención de la máxima eficiencia en la producción, implantación del mantenimiento preventivo como medio básico para cero pérdidas apoyados en el soporte que proporciona el mantenimiento autónomo y la aplicación de sistemas de gestión de todos los aspectos de la producción, incluyendo diseño y desarrollo, ventas y la Dirección.

2.6.4 Especificaciones de componentes deficientes

Keki y Adi Bhote (2000), comentan que aun suponiendo que las especificaciones de los productos se hayan optimizado como se muestra arriba, hay otra caída más importante, la

conversión inadecuada de las especificaciones de los productos en las especificaciones de los componentes. Las razones son:

- La fascinación de la ingeniería con la tecnología.
- Proclividad de ingeniería para tolerancias estrechas;
- La confianza de la ingeniería en dibujos de componentes previos, requisitos estándar o las especificaciones publicadas del proveedor;
- Confianza en la computadora para determinar las tolerancias del componente. Esto solo se puede hacer si se conoce la fórmula que rige la relación entre la salida (o variable dependiente) y las variables componentes independientes. En muchos diseños complejos, que involucran puntajes de variables independientes, desarrollar una fórmula es casi imposible.
- Un análisis y diseño del peor de los casos con una probabilidad de ocurrencia extremadamente baja en la práctica real. Esta es una adición apreciable al costo sin ningún valor agregado.
- No hay forma de tener conocimiento de un efecto de interacción sinérgico desconocido entre las variables componentes, incluso cuando existe una fórmula matemática para las relaciones entre las variables.

2.6.5 Herramientas y sistemas de calidad inadecuados

- El modelo Malcolm Baldrige es el modelo de excelencia utilizado en Estados Unidos y es el marco de referencia utilizado para la evaluación del premio nacional de calidad de Estados Unidos.
- El modelo European Quality Award (EQA) se utiliza para evaluar la excelencia empresarial.
- La Gestión de la Calidad total (TQM) es una filosofía de gestión que involucra a toda la organización para asumir la responsabilidad y garantizar la calidad de sus productos, servicios y los procesos buscando mejorar la eficacia de sus procesos en cada escenario constantemente.
- Big Q se refiere a la calidad de los productos, servicios, procesos y entornos.

2.6.6 Materiales de proveedores deficientes

- AQL es el límite de calidad de aceptación
- C_{pk} es un índice de proceso a corto plazo que describe numéricamente la capacidad "dentro del subgrupo" o "potencial" (P_{pk} es el indicador a largo plazo) de un proceso, suponiendo que se analizó y mantiene el control.

2.7 Métodos utilizados para controlar la variabilidad en procesos manufactureros

Existe una serie de enfoques dedicados a controlar los procesos y reducir la variabilidad. Este documento se centra en demostrar que el mejor de los enfoques antes mencionados, es Red X de Dorian Shainin, sin embargo, antes de poder siquiera compararlos entre sí, debemos saber sobre ellos, como funcionan, como se originan, etc. La tabla 2:2 muestra algunas herramientas de calidad utilizadas en el control de la variabilidad en los productos/procesos.

Tabla 2:2 Herramientas de calidad utilizadas en el control de la variabilidad en productos/procesos. Fuente: Autor

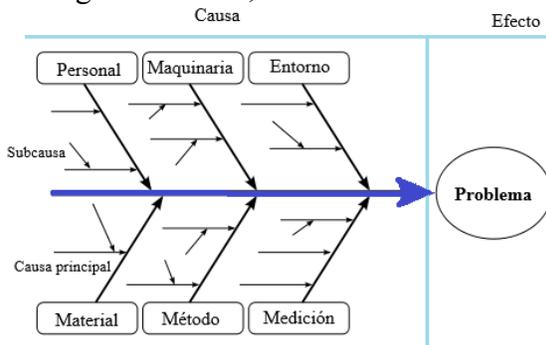
Herramienta de calidad
Siete herramientas de control de calidad
Siete nuevas herramientas de control de calidad.
SPC
DOE clásico
Taguchi
Seis Sigma
Shainin

2.7.1 Las 7 herramientas de la calidad

Conjunto de técnicas enfocadas a la resolución de problemas de calidad de los productos. Se conocen como “herramientas básicas” ya que son adecuadas para personas con poca información en materia estadística. Estas herramientas fueron recopiladas y divulgadas en Japón por Kaoru Ishikawa, y posteriormente se extendieron por todo el mundo con el nombre de “herramientas básicas para la mejora de la calidad” y varias denominaciones similares.

2.7.1.1 Diagrama de causa y efecto.

Un diagrama de causa y efecto (C&E) es una figura formada por líneas y símbolos cuyo objetivo es representar una relación significativa entre un efecto y sus causas. Fue creado por Kaoru Ishikawa en 1943, y también se le conoce como diagrama de Ishikawa. Con los diagramas de causa y efecto se investigan los efectos “malos” y se emprenden acciones para corregir las causas, o los efectos “buenos” y se aprende cuáles causas son las responsables.



Las causas se suelen descomponer en las principales de los métodos de trabajo, materiales, medición, personal y el ambiente.

Cada causa principal se subdivide aún más en numerosas causas menores (Besterfield,

2009). La Figura 2-3, muestra un ejemplo del diagrama C&E, tomando en cuenta las causas más comunes en las que se suele descomponer el problema o efecto.

Figura 2-3.- Diagrama de causa y efecto.

2.7.1.2 Hoja de Comprobación.

Fuente: Autor.

El objetivo principal de las hojas de comprobación es asegurar que los datos se reúnan con cuidado y fidelidad por parte del personal de operación para controlar el proceso y resolver problemas. Los datos deben presentarse de tal manera que se puedan utilizar y analizar con rapidez y facilidad. La forma de la hoja de comprobación se adapta para cada situación y la diseña el equipo del proyecto. Se hacen comprobaciones diarias y semanales, y algunas se miden, como la temperatura. Con este tipo de hoja de comprobación se asegura que se haga una verificación o una prueba (Besterfield, 2009).

HOJA DE COMPROBACION		
Producto: Defensa -002		Fecha: 15-mayo
Etapa: Inspección final		Identificación: Pintura
Cant. Inspeccionada: 1924		Inspector/operador: Mariana Martínez
Tipo de no conformidad	Registro	Total
Manchas		21
Velados		38
Suciedad		22
Cráteres		11
Fondo hundido		8
Burbujas / ampollas		47
Otras		12
	Total	159
Cantidad No conformes		113

Figura 2-4.- Hoja de comprobación para no conformidades de pintura. Fuente: Autor

La Figura 2-4 muestra una hoja de comprobación para no conformidades de pintura en defensas de automóviles. Un buen ejercicio de mejora en las hojas de comprobación como la figura anterior, es, dentro de lo posible, añadir un gráfico de la pieza para poder marcar el área donde se presenta la no conformidad, con esto, será de mayor facilidad el localizar la causa de la no conformidad de acuerdo a los patrones que presenten históricamente dichos gráficos.

2.7.1.3 Histograma.

Un histograma es una gráfica que presenta la distribución de un conjunto de datos. Se presenta como un conjunto de rectángulos o gráfica de barras con la peculiaridad de que no presenta espacios entre las barras, cada una de estas barras representa la frecuencia en cada categoría (subconjunto de datos). El histograma muestra tendencias de los subconjuntos de datos, así como la variabilidad y dispersión de los mismos. Se utiliza principalmente para encontrar la o las causas de un problema, para determinar capacidad del proceso y para indicar discrepancias en datos, por ejemplo, las discontinuidades. La Tabla 2:3, muestra 50 datos que describen la espera para el uso de cajero automático en una sucursal bancaria.

Tabla 2:3.- Tiempo de espera en cajero automático en segundos

Tiempo de espera en cajero automático (segundos)				
270	129	114	143	99
114	216	142	277	165
272	150	228	171	210
288	93	225	207	138
98	192	123	270	300
229	129	287	177	228
182	100	247	290	131
241	107	145	147	159
128	150	97	299	132

109	259	252	252	244
-----	-----	-----	-----	-----

De acuerdo a los datos obtenidos en la toma de tiempo, se obtienen datos necesarios para la realización del histograma, como son:

- N: 50
- Dato mayor (DM): 300
- Dato menor (DM): 93
- Rango: 207
- Número de clase (K):
 $1+3.322\log(N) = 6.64 \approx 7$
- Amplitud de clase (i): $\text{rango}/K = 207/7 = 29.57 \approx 30$

A continuación, se construye la tabla de distribución de frecuencias (Tabla 2:4)

Tabla 2:4.- Distribución de frecuencia

No. Clase	Lim inferior	Lim superior	F	Marca de clase (X)	Frec. Acum.	Frec. Relativa
1	93	122	9	107.5	9	0.18
2	123	152	13	137.5	22	0.26
3	153	182	5	167.5	27	0.1
4	183	212	3	197.5	30	0.06
5	213	242	6	227.5	36	0.12
6	243	272	8	257.5	44	0.16
7	273	302	6	287.5	50	0.12

Por último, procedemos a la construcción del histograma (Figura 2-5).

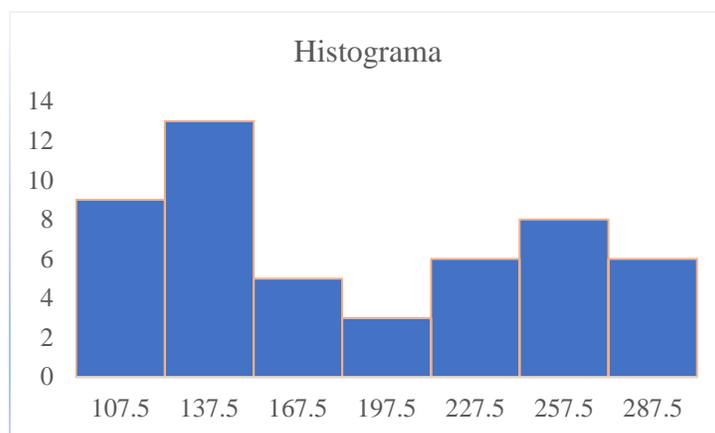


Figura 2-5.- Histograma de datos Tabla 2:3.

2.7.1.4 Diagrama de Pareto.

El propósito de un gráfico de Pareto es identificar aquellas áreas "pocas vitales" que representan la mayor frecuencia o frecuencia relativa en un conjunto de datos y separar esas pocas áreas vitales de las "muchas triviales". Un gráfico de Pareto representa gráficamente la "regla 80/20" originalmente postulada para explicar los fenómenos económicos del economista italiano Vilfredo Pareto y luego adaptada para aplicaciones de calidad por Juran y Gryna en 1980. La regla 80/20 permite a los lectores / usuarios identificar y centrarse en aproximadamente el 20 por ciento de los factores (es decir, columnas o categorías) que representan aproximadamente el 80 por ciento de los problemas potenciales (Borrer, 2009).

El diagrama de Pareto presenta, en orden decreciente, la contribución relativa de cada elemento al efecto total. Dicha contribución relativa puede basarse en la cantidad de sucesos, en el costo asociado con cada elemento u otras mediciones de impacto sobre el efecto. Se usa bloques para indicar la contribución relativa de cada elemento. Se emplea una curva de frecuencias acumuladas para indicar la contribución acumulada de los elementos (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2009). Utilizando los datos del ejemplo de la hoja de comprobación sobre las no conformidades en la inspección final de pintura en defensas de automóviles, obtenemos la Tabla 2:5, realizando a continuación el diagrama de Pareto de estos datos (Figura 2-6).

Tabla 2:5.- Defectos en pintura

Razón del defecto	Total	Porcentaje
-------------------	-------	------------

Manchas	21	13.208
Velados	38	23.899
Suciedad	22	13.836
Cráteres	11	6.918
Fondo hundido	8	5.031
Burbujas / ampollas	47	29.56
Otras	12	7.547
Total	159	100

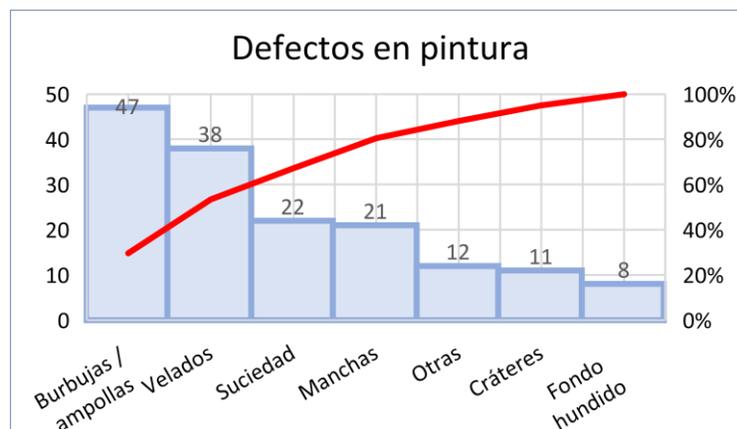


Figura 2-6.- Diagrama de Pareto sobre defectos en pintura. Fuente:
Autor

2.7.1.5 Diagrama de Dispersión.

Dadas dos variables numéricas X y Y, medidas usualmente sobre el mismo elemento de la muestra de una población o proceso, el diagrama de dispersión es una gráfica del tipo X-Y, donde cada elemento de la muestra es representado mediante un par de valores (x_i, y_i) y el punto correspondiente en el plano cartesiano X-Y. El objetivo de esta gráfica es analizar la forma en que estas dos variables están relacionadas; al graficar todos los puntos, es decir, todas las parejas de valores, si se observan que los puntos siguen algún patrón definido, esto será evidencia de una posible relación entre las dos variables (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, Control estadístico de calidad y seis sigma, 2009).

Los tipos de relaciones que se pueden encontrar en un diagrama de dispersión se mencionan y ejemplifican en las Figuras 2-7, 2-8 y 2-9.

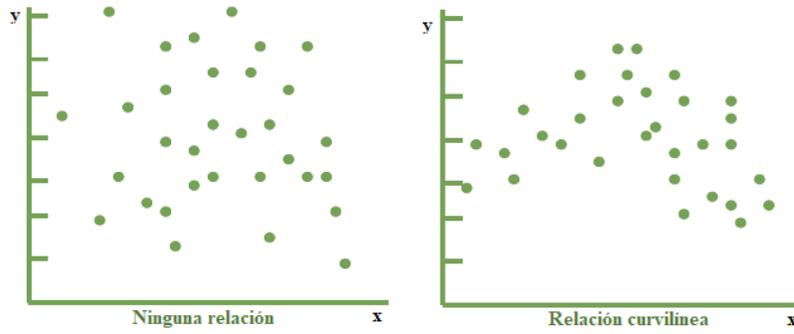


Figura 2-7.- Tipos de dispersión (a). Fuente:

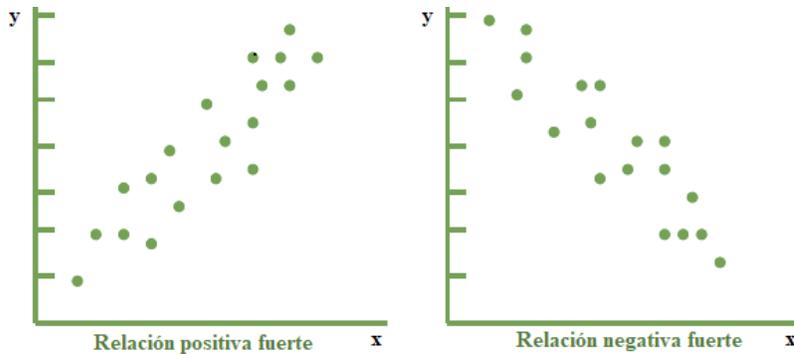


Figura 2-8.- Tipos de dispersión (b). Fuente: Autor

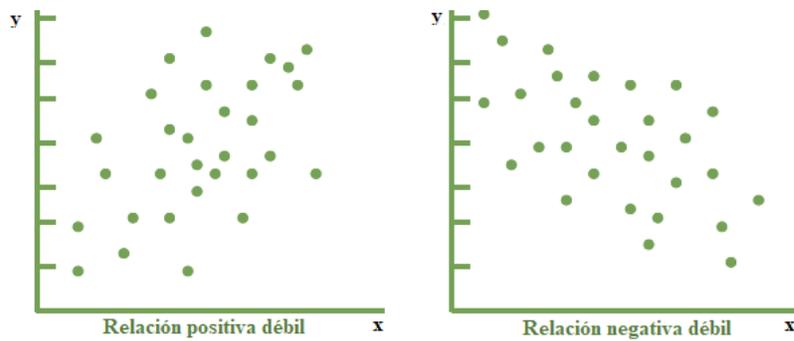


Figura 2-9.- Tipos de dispersión (c). Fuente: Autor

2.7.1.6 Estratificación.

La estratificación es una estrategia de búsqueda que facilita entender cómo influyen los diversos factores o variantes que intervienen en una situación problemática, de forma que sea posible localizar diferencias, prioridades y pistas que permitan profundizar la búsqueda de las verdaderas causas de un problema. La estratificación analiza problemas, fallas, quejas o datos, clasificándolos de acuerdo con los factores que pueden influir en la magnitud de estos. Es una estrategia común a todas las herramientas básicas (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

Procedimiento consistente en clasificar los datos disponibles por grupos con similares características que muestra gráficamente la distribución de los datos que proceden de fuentes o condiciones diferentes. Se recomienda que la estratificación se utilice por áreas (departamentos, líneas de producción, etc.), trabajadores (edad, sexo, horario, etc.), equipo (maquinaria, vida útil, condición, modelo, etc.), tiempo (turno, día, semana, mes, etc.), materiales o proveedores.

Hernández (2017) nos comparte el siguiente ejemplo: Una empresa de fabricación de jabón detecta que el % de humedad de la viruta de jabón presenta valores anómalos cuando se relaciona con el pH. Tras hacer un diagrama de dispersión, los datos que se obtienen no parecen arrojar luz sobre el problema. La tecnóloga de la planta propone segmentar los datos obtenidos teniendo en cuenta que se usan 3 vacuo secadora distintas para secar el jabón.

Tabla 2:6.- Segmentación de datos por vacuo secadora.

Porcentaje de humedad vs pH					
Vacuo secadora 1		Vacuo secadora 2		Vacuo secadora 3	
% humedad	pH	% humedad	pH	% humedad	pH
30	7	20	7	30	8
40	8	25	6	31	7
35	9	23	7	32	6
20	7	30	6	31	7
68	5	26	8	35	6.5
36	7	31	5	31	5.5
89	6	25	6	34	7.2
78	9	28	7	30	7.4
35	6	30	6	30	7
78	5	28	6	28	6.5

A partir de los datos de la Tabla 2:6, podemos confeccionar el gráfico de estratificación (Figura 2-10), donde se observa claramente que la vacuo secadora 1 puede tener un problema que a priori no se había detectado.

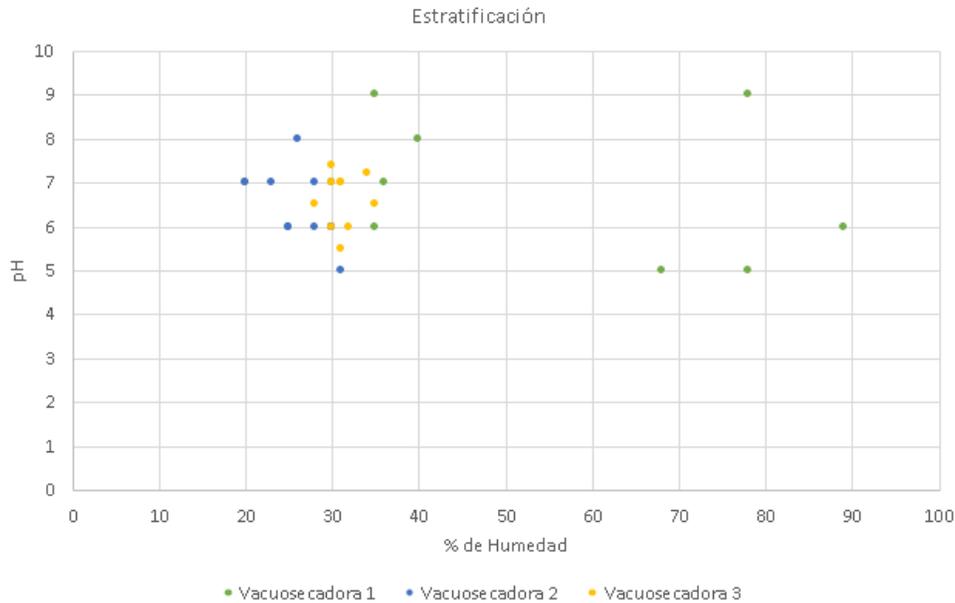


Figura 2-10.- Gráfico de estratificación de humedad vs pH. Fuente: Autor

2.7.1.7 Cartas control

Una carta de control es una herramienta estadística que detecta la variabilidad, consistencia control y mejora de un proceso. El objetivo básico de una carta de control es observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo. Así, es posible distinguir entre variaciones por causas comunes y especiales (atribuibles), lo que ayudara a caracterizar el funcionamiento del proceso y decidir las mejores acciones de control y de mejora. Cuando se habla de analizar el proceso nos referimos principalmente a las variables de salida (características de calidad), pero las cartas de control también pueden aplicarse para analizar la variabilidad de las variables de entrada o de control del proceso mismo. (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, Control estadístico de la calidad y Seis Sigma, 2013)

En la figura 2-11, se muestra una carta de control típica en la cual se aprecia que el objetivo es analizar de dónde a dónde varía (vea la campana) y cómo varía el estadístico W a través del tiempo y este estadístico puede ser una media muestral, un rango, un porcentaje, etc. Los valores que va tomando W se representan con puntos y éstos se unen con líneas rectas. La línea central representa el promedio de W . Los límites de control, inferior y superior definen el inicio y final del rango de variación de W , de forma que cuando el proceso está en control,

existe una alta probabilidad de que prácticamente todos los valores de W caigan dentro de los límites (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2013).

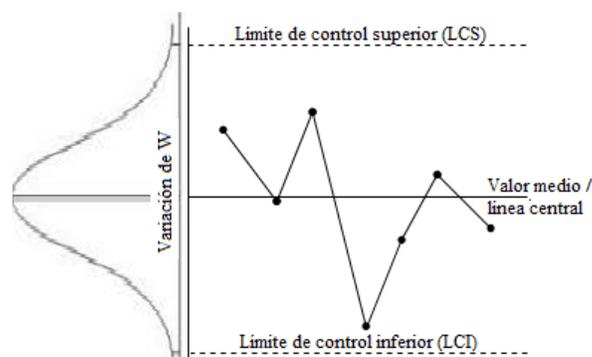


Figura 2-11.- Elementos de una carta de control. Fuente:
Autor.

2.7.2 Las 7

nuevas

herramientas de la calidad

En 1976, la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros (JUSE) noto la necesidad de herramientas para promover la innovación, comunicación y planificación de grandes proyectos con éxito. Un equipo investigo y desarrollo las siete nuevas herramientas de control de calidad. Si bien las herramientas clásicas se siguen utilizando de forma masiva, estas herramientas solo funcionan bien en los casos donde contamos con suficiente información cuantitativa. Las denominadas 7 nuevas herramientas de la calidad fueron diseñadas para cubrir necesidades de complejidad considerable, permitiendo un alto nivel de detalle en el análisis de tipo cualitativo.

2.7.2.1 Diagrama de afinidad.

Se utiliza generalmente como una herramienta para organizar en grupos una gran cantidad de ideas, de opiniones o de asuntos relacionados entre sí sobre un problema particular. Cuando se recolectan una gran cantidad de ideas, opiniones u otros asuntos acerca de un tema o problema en particular, esta herramienta organiza la información en grupos o problemas basados en las relaciones naturales que existen entre ellos. El diagrama de afinidades está pensado para estimular la creatividad y la participación plena en equipos de trabajo de tamaño reducido, de preferencia constituidos por personas que están acostumbradas a trabajar juntas (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2009).

Ejemplo: El área de compras de una compañía de transporte realiza una lluvia de ideas sobre las características que buscan en autos que pretenden adquirir de acuerdo a las necesidades del servicio que ofrecen. Algunas de las características son:

- Cilindraje
- Potencia Hp
- Torque Nm
- Dirección
- Frenos de disco
- Sistema ABS
- Tracción delantera
- Alarma acústica
- Birlos de seguridad en 4 ruedas
- Bolsas de aire
- Inmovilizador electrónico
- Puertas traseras con seguro de niños
- Aire acondicionado
- Ajuste de altura de faros
- Elevadores eléctricos
- Radio con ranura SD, MP3 y USB
- Desempañador trasero
- Vestiduras de piel
- Cristales entintados
- Faros antiniebla
- Rines de aluminio

Estas ideas entonces se deberán separar por categorías y así formar el diagrama de afinidad que se muestra en la Figura 2-12.

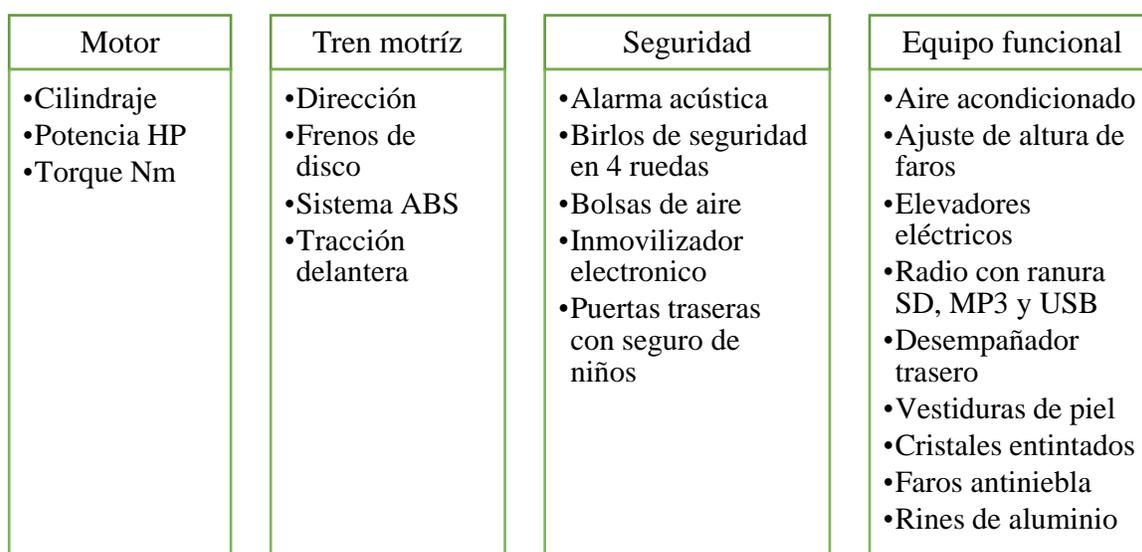


Figura 2-12.- Diagrama de Afinidad. Fuente: Autor.

2.7.2.2 Diagrama de relaciones.

Besterfield (2009) describe como el diagrama de interrelaciones (ID - *interrelationship diagram*) aclara las interrelaciones de muchos factores de una situación compleja. Permite que el equipo clasifique las relaciones de causa a efecto entre todos los factores para poder usar los impulsores y resultados clave en la solución del problema. El procedimiento es algo más complicado que los métodos anteriores, y se dividirá en puntos.

1. El equipo debe concordar acerca del enunciado del asunto o problema.
2. Todas las ideas o asuntos de otras técnicas, o de una lluvia de ideas, se deben externar, de preferencia en un círculo
3. Comenzar con el primer asunto y evaluar la relación de causa a efecto. En este caso, si asunto X es más fuerte que el asunto W; por consiguiente, se traza la flecha desde el asunto X hacia el asunto W. Cada asunto en el círculo se compara con el asunto W. La primera iteración está completa.
4. La segunda iteración consiste en comparar el asunto B con los asuntos C. En la tercera iteración se compara el asunto C con los asuntos D, E y F. La cuarta iteración es comparar el asunto D con los asuntos E y F. La quinta iteración es comparar el asunto E con el asunto F.
5. Se debe revisar y modificar todo el diagrama donde sea necesario. Se aconseja obtener información de otras personas sobre los procesos anteriores y posteriores.
6. El diagrama se completa contando las flechas que llegan y salen, y poniendo esta información abajo del cuadro.

2.7.2.3 Diagrama de árbol.

El diagrama de árbol tiene una apariencia similar a la de un organigrama funcional de una organización. Su objeto es identificar ideas en detalle creciente. La pregunta que desencadena el proceso es: ¿Cuál es el componente principal de esta idea?, pasando a continuación a responder la pregunta ¿Cómo debe llevarse a cabo esta idea? Es una herramienta que va más allá de los diagramas de afinidad y de relaciones, siendo fundamental en la identificación que pudiera haberse olvidado durante el proceso de los diagramas mencionados (Vilar Barrio, Gómez Fraile, & Tejero Monzon, 1998).

Con el diagrama de árbol se obtiene una visión de conjunto de los medios mediante los cuales se alcanza una meta. Es el resultado de la organización sistemática de metas y de los medios correspondientes para el logro de dichas metas. El diagrama de árbol sirve, pues, para presentar en forma organizada el conjunto de medidas con las que se alcanza un determinado propósito. A semejanza del diagrama de relaciones, en el diagrama de árbol cada medio se convierte a su vez en una meta a alcanzar (Gutiérrez, 2004) como se muestra en la Figura 2-13. Gutiérrez (2004) propone la siguiente serie de pasos para elaborar un diagrama de árbol:

1. Se enuncia, con la mayor claridad posible, la meta a alcanzar. Dicho enunciado se pone por escrito.
2. Se identifican los medios que directamente conducen a dicha meta y se ponen por escrito en tal forma que quede expresado que con dichos medios se logra la meta.
3. Debido a que los medios identificados en el paso anterior se convierten a su vez en meta a alcanzar, se identifican los medios mediante los cuales se alcanza dicha meta; y así sucesivamente.

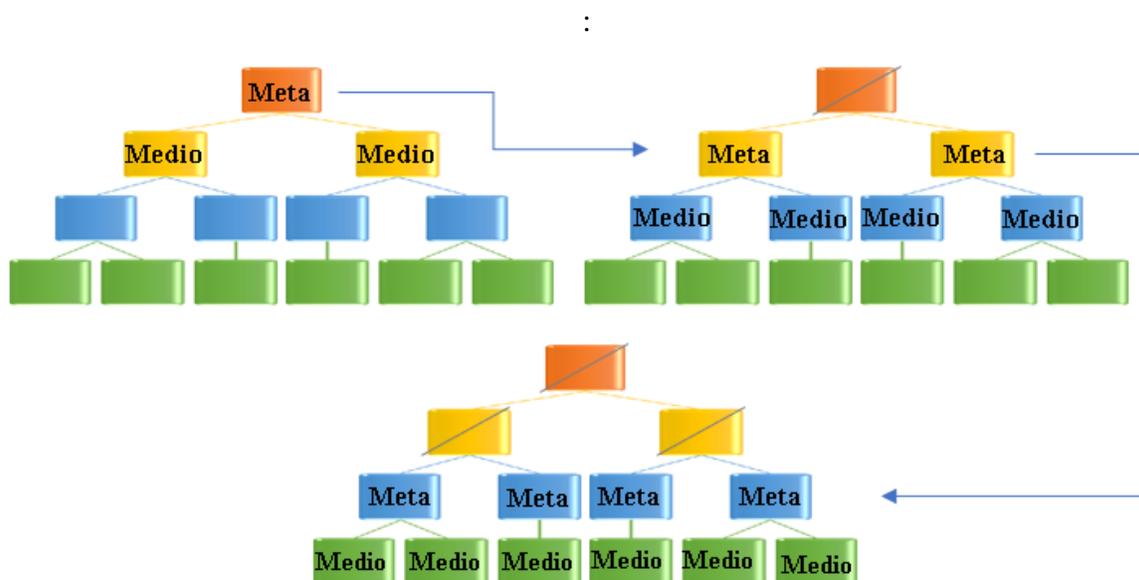


Figura 2-13.- Fases del diagrama de árbol. Fuente: Autor

2.7.2.4 Diagrama matricial.

El diagrama matricial es una herramienta utilizada para enlazar múltiples elecciones con múltiples resultados para cada una de ellas. Representa gráficamente la relación entre

diversos factores y el grado de importancia de los mismos en términos cualitativos. La aplicación más común de este diagrama se lleva a cabo en el método QFD (Despliegue de la función calidad).

Antes de emplear un diagrama matricial es preciso identificar el número de factores que se van a analizar y posteriormente determinar el tipo de relación existente entre ellos. En la Figura 2-14 se muestra un diagrama que relaciona cuatro tipos de datos. Este diagrama facilita la identificación de los factores principales y muestra información de forma clara con todas las relaciones existentes entre los aspectos estudiados. Esta herramienta es de gran utilidad para planificar actividades, identificar necesidades y relacionar éstas con aspectos técnicos de la empresa, los competidores o ambos (González Gaya, Domingo Navas, & Sebastián Pérez, 2013).

●		○		C1	●		○	●
○	●		●	C2		●		
		●		C3	○		●	
	○			C4		●		●
A1	A2	A3	A4		B1	B2	B3	B4
			○	D1			○	
	○		●	D2		●		
●		○		D3	●			●
	○			D4			○	

● ; Relación muy fuerte ● ; Relación fuerte ○ ; Relación débil

Figura 2-14.- Relación entre cuatro tipos de datos. Fuente: Autor.

2.7.2.5 Diagrama portfolio o de priorización.

El diagrama de priorización o también llamado de portfolio, se emplea para priorizar una serie de soluciones a un problema en función de dos variables que normalmente suelen ser el beneficio que se espera de la implantación de la solución y el esfuerzo que supone la implantación de esa solución. En la Figura 2-15 se muestra como un ejemplo de diagrama portfolio para priorizar las características que hacen excelente un autobús. Se llega a la conclusión de que lo primero que hay que hacer es poner papeleras en los autobuses (Sangüesa Sánchez, Mateo Dueñas, & Ilzarbe Izquierdo, 2006).

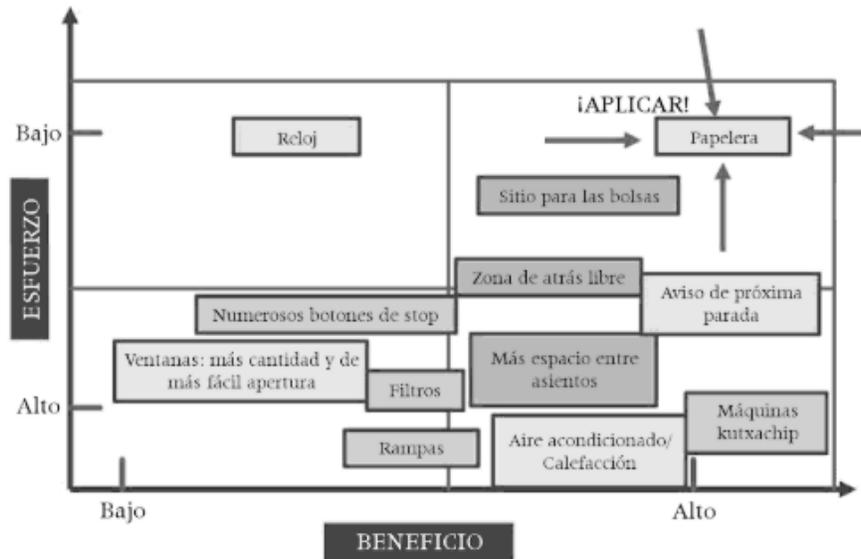


Figura 2-15.- Ejemplo de diagrama portfolio. Fuente: (Sangüesa Sánchez, Mateo Dueñas, & Ilzarbe Izquierdo, 2006).

2.7.2.6 Diagrama de flechas.

El diagrama de flechas o red de actividades consiste en la ilustración gráfica del conjunto de operaciones de un proyecto y de sus interrelaciones. La red está formada por flechas que representan actividades y nodos que simbolizan hechos. Cuando se encuentran varias flechas conectadas una tras otra es que existe una secuencia entre ellas; esa es la manera de ilustrar la dependencia. Los nodos o uniones de flechas, denominados hechos, se representan en la forma gráfica en forma de círculos y significan la terminación de las actividades que culminan en un hecho determinado, así como la iniciación de las subsecuentes (Díaz Jiménez, 2005).

De acuerdo con Díaz Jiménez (2005), el ciclo de planeación y control se desarrolla de acuerdo a las siguientes actividades:

1. Fijar objetivos
2. Preparar plan
3. Publicar plan
4. Ejecutar plan
5. Medir avance
6. Comparar plan con avance
7. Tomar decisiones correctivas
8. Realizar cambios externos (inicio o actividad generadora)

A partir de la lista anterior, se desarrolla el diagrama de flechas mostrado en la Figura 2-16.

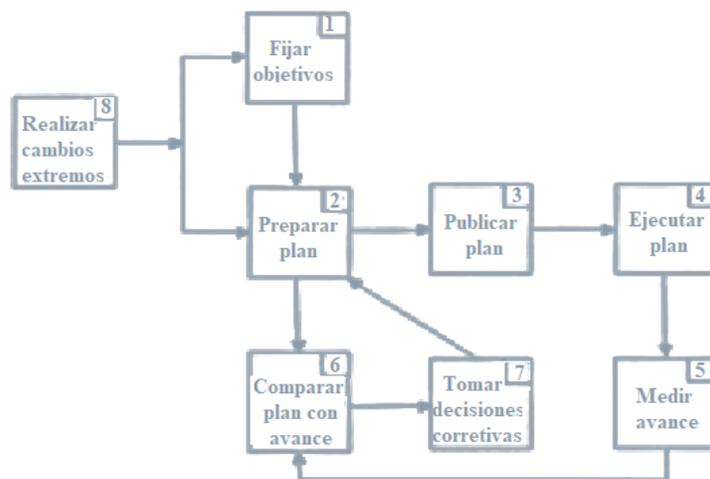


Figura 2-16.- Diagrama de flechas del ciclo de planeación y control.

2.7.2.7 Diagrama de proceso de decisión.

El diagrama del proceso de decisión es una herramienta utilizada por lo general con posterioridad a la construcción de un análisis del árbol de fallos. Ambos gráficos tienen en común la capacidad de detectar aquello que puede fallar en el proceso, haciéndolo en el ya conocido formato de árbol. La diferencia fundamental consiste en que el diagrama del proceso de decisión relaciona de forma explícita las contramedidas para todo aquello que puede fallar. Esta herramienta suele utilizarse en la planificación de actividades no emprendidas con anterioridad. Consiste en identificar y registrar todo lo que puede fallar mejora sustancialmente la probabilidad de tener éxito en el proyecto abordado (Vilar Barrio, Gómez Fraile, & Tejero Monzon, 1998).

Es una herramienta muy útil para detectar posibles obstáculos o inconvenientes al implementar un plan de acción, permitiéndonos tomar decisiones a tiempo para solucionarlos. Se parte desde la actividad inicial y se va descendiendo. En primer lugar, encontramos a las fases, que son las tareas fundamentales que deben realizarse para alcanzar el objetivo. De cada una de ellas se plantean problemas que puedan surgir (problemas potenciales) los cuales aparecen en el nivel inmediato inferior. Para cada problema se determinan medidas para contrarrestarlos. Las medidas aparecen en el nivel inferior. Si la medida es efectiva, se coloca un círculo (O) debajo. Si no lo es, una cruz (X). Se implementan, entonces, sólo las medidas que llevan un círculo (Sejzer, 2016).

2.7.3 Control estadístico de procesos (SPC)

El control estadístico de procesos o SPC por sus siglas en inglés, no se trata realmente de estadísticas o control, se trata de competitividad. Las organizaciones, cualquiera que sea su naturaleza, compiten en tres cuestiones: calidad, entrega y precio. No puede haber muchas personas en el mundo que sigan estando convencidas de que la reputación que tiene una organización por la calidad de sus productos y servicios es clave para su éxito y el futuro de sus empleados. Además, si la calidad es correcta, es probable que la entrega y el rendimiento del precio también sean competitivos (Oakland, 2003).

El SPC es una excelente metodología donde se emplean gráficas de control con el objeto de ayudar a los operadores, supervisores y a los administradores a estar monitoreando continuamente la producción de un proceso, esto con la idea de observarlo, así como de eliminar las causas especiales de variación, es bien sabido que con esta metodología puede evitarse grandes cantidades de desperdicio, reproceso y así aumentar la productividad. El SPC, es aplicable también para conocer la capacidad de un proceso. Esta herramienta también es considerada al igual que el APQP, PPAP, AMEF y MSA parte de las Core Tools del sector automotriz y es un requerimiento de la especificación técnica ISO/TS 16949.

En el control de procesos, la variabilidad no desaparecerá, su objetivo es reducirla. Los factores que provocan la variabilidad son:

- La maquinaria o herramienta empleada, que no trabaja siempre de la misma manera.
- La materia prima, que no tiene en todo momento las mismas características.
- El factor humano, cuyo trabajo depende de muchas circunstancias externas e internas.

2.7.4 DOE clásico

El diseño experimental es una estructura de investigación donde al menos se manipula una variable y las unidades son asignadas aleatoriamente a los distintos niveles o categorías de la variable o variables manipuladas. Muchos científicos, ingenieros y estadísticos contribuyeron en el desarrollo y aplicación del DOE en las industrias a lo largo de casi 90 años del enfoque clásico; el resultado, un enfoque válido y robusto. Su objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

Montgomery nos comenta sobre la existencia de 4 etapas en el desarrollo del DOE clásico. La primera etapa, iniciada por Fisher en los 20's, la cual se caracteriza por la introducción sistémica del pensamiento científico, la aplicación de diseños factoriales y el análisis de varianza (ANOVA) en las experimentales científicas. La segunda etapa, iniciada por Box & Wilson, se caracteriza por el desarrollo de la superficie de respuesta (RSM). En esta etapa surgen los diseños compuestos centrales (CCD) y diseños de Box-Behnken (BBD). La tercera etapa comienza a principios de los 80's con la aparición de enfoques de Taguchi y Shainin, presentados poco metodologías sencillas y eficientes para la experimentación. En los 90's comienza la cuarta etapa que democratiza la estadística gracias a la expansión de Seis Sigma y la oferta de softwares estadísticos útiles para todos los tipos de industria (Tanco, Viles, & Pozueta, 2009).

2.7.4.1 ANOVA anidado

El ANOVA anidado es una herramienta estadística que hace extensión al ANOVA de una vía o de un factor entre grupos, se utiliza cuando las variables se anidan unas en otras, es decir, cuando los niveles de una variable B ocurren con un solo nivel de A, teniendo el experimentador la libertad de elegir arbitrariamente los niveles de B. Por lo anterior, se debe entender que, en este tipo de diseño, no es posible evaluar la interacción, lo posible, en todo caso, es la evaluación de efectos principales.

Cada nivel del factor A contendrá diferentes niveles del factor B. Se dice que los niveles del factor B están anidados dentro de los niveles del factor A. En este caso, reciben el nombre de diseños de factor anidado, también se conocen como diseños jerárquicos (Kuehl, 2001). En los diseños anidados hay una especie de relación padre-hijo entre los niveles del factor A (padres) y los niveles del factor B (hijos) (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, Análisis y diseño de experimentos, 2012)

Se utiliza el análisis de varianza anidado (ANOVA anidado) cuando se tiene una variable de medición y dos o más variables nominales. Las variables nominales se anidan, lo que significa que cada valor de una variable nominal (los subgrupos) se encuentra en combinación con un solo valor de la variable nominal de más alto nivel (los grupos). El análisis de varianza anidado, como todos los ANOVA, supone que las observaciones dentro de cada subgrupo se distribuyen normalmente y tienen varianzas iguales (Badii, Guillen, &

Abreu, 2010). Un diseño anidado se puede considerar como una disposición jerárquica de factores (de ahí el nombre alternativo de los diseños jerárquicos), por lo que un tratamiento se sub replica progresivamente (Logan, 2010). Un problema potencial para la aplicación de diseños anidados es que, en ocasiones para obtener un número razonable de grados de libertad en el nivel más alto, puede terminarse con muchos grados de libertad (quizá demasiados) en las etapas inferiores (Montgomery, 2004). Suponiendo un diseño anidado donde es necesario medir las características dimensionales, cada parte se mide por un solo operador; siendo el tipo de diseño utilizado en pruebas destructivas (Grima Cintas, Marco Almagro, & Tort-Martorell Llabrés, 2012).

2.7.5 Taguchi

El enfoque estadístico para el diseño de experimentos y la técnica de análisis de varianza (ANOVA) fue desarrollado por R.A. Fisher. La técnica proporciona un método muy poderoso y económico para determinar factores significativos e interacciones de factores que afectan la variabilidad dentro de un producto. Este enfoque clásico para el diseño de experimentos se desarrolló aún más a fines de los años 80 cuando Genichi Taguchi desarrolló su propia forma de diseño estadístico de experimentos (Thomas & Antony, 2005).

Este enfoque de experimentación (también conocido como diseño robusto) sugirió diseños factoriales altamente fraccionados y arreglos ortogonales (OA), junto con algunos métodos estadísticos novedosos para industrias de partes discretas, incluyendo automotriz, aeroespacial, electrónica y semiconductores (Prashar, 2017). La idea de diseñar productos y procesos cuyo desempeño sea insensible a las condiciones ambientales (robustez del sistema) y realizar esto en las etapas del diseño a través del uso de DOE ha sido la piedra angular de la metodología de Taguchi (Medina V., Cruz T., & Restrepo, 2007). Las fortalezas de la metodología de Taguchi son:

- Enfatizar en la calidad durante la etapa del diseño del proceso.
- Reconoce la importancia relativa de los factores que influyen en el desempeño de los productos.
- Enfatiza en la reducción de la variabilidad, por medio del uso de la función de pérdida y de la razón señal-ruido.

- Se concentra en el concepto de diseño de parámetros que sirvan para disminuir la variabilidad en el desempeño de los procesos.

La filosofía de Taguchi está basada en un modelo aditivo de los efectos principales para la cual, la presencia de interacciones es algo indeseable en el caso en que el proceso se encuentre en una relación de este tipo esta es tomada como parte del error experimental (Fowlkes & Creveling, 1995). Su metodología se concentra en el consumidor, valiéndose de su famosa función de pérdida (Ecuación 2-5) la cual nos dice que si el valor de $L = 0$, significa que la calidad obtenida es la deseada, mientras que si el valor de $L \neq 0$, entonces nos estamos alejando del objetivo. La figura 2-17 muestra gráficamente la función de pérdida de Taguchi.

Ecuación 2-5

Función de pérdida de Taguchi

$$L(y) = k(y - t)^2$$

Donde:

$L(y)$ = pérdida.

k = constante que convierte $(y - t)^2$ en unidades monetarias.

y = valor esperado de la característica analizada.

t = valor real obtenido de la característica analizada.

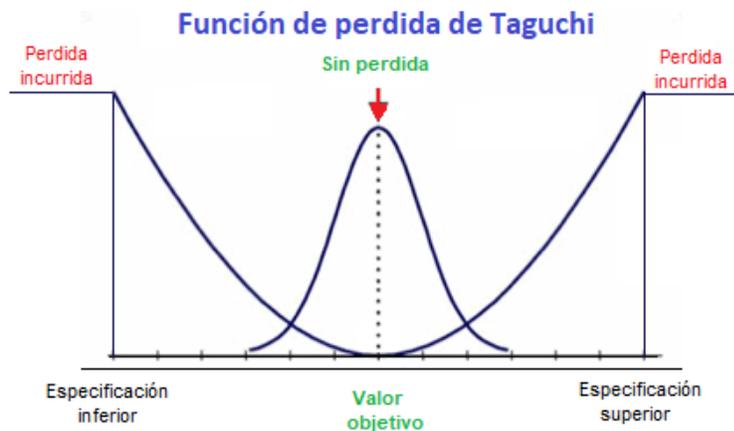


Figura 2-17.- Función de pérdida de Taguchi. Fuente: Autor

Otra característica clave de esta metodología son los arreglos ortogonales, los cuales no son más que arreglos factoriales fraccionados en los que se basa como medio para la realización del experimento, así como la utilización de una medida de variabilidad denominada razón señal ruido (S/N) para la realización del análisis de resultados (Medina V., Cruz T., & Restrepo, 2007).

Un ejemplo bien conocido de los diseños de Taguchi es el de la empresa japonesa de losetas Ina Tile Company en la década de 1950. La empresa estaba produciendo demasiadas losetas fuera de las dimensiones especificadas. Un equipo de calidad descubrió que la temperatura del horno utilizado para cocer las losetas variaba, causando falta de uniformidad en la dimensión de las losetas. Ellos no podían eliminar la variación de temperatura, porque construir un nuevo horno era demasiado costoso. Por lo tanto, la temperatura era un factor de ruido. Usando experimentos diseñados de Taguchi, el equipo descubrió que, al aumentar el contenido de cal de la arcilla, un factor de control, las losetas se volvían más resistentes o robustas ante la variación de temperatura en el horno, lo cual permitía producir losetas más uniformes (Minitab, 2017).

2.7.6 Seis Sigma

La metodología de mejora Seis Sigma fue lanzada al mundo por el ingeniero Bill Smith en la década de los 80's mientras trabajaba para la empresa Motorola. Posterior a su lanzamiento, le siguieron iniciativas en diversas empresas tales como Allied Signal (compañía de equipos electrónicos) y Texas Instruments (compañía de diseño y fabricación de semiconductores), pero su potencial no fue difundido a nivel mundial hasta que Jack Welch implantara esta metodología en General Electric, consiguiendo resultados impactantes.

Sigma (σ) es una letra en el alfabeto griego que se ha convertido en el símbolo estadístico y métrico de la variación. La escala de medida Sigma está perfectamente correlacionada con características tales como defectos por unidad, partes defectuosas por millón y probabilidad de falla. Seis (Seis), es el número de Sigmas medidas en un proceso, donde la variación alrededor del objetivo es tal que solo 3.4 unidades por millón son defectuosas bajo el supuesto de que el promedio del proceso puede derivar en el largo plazo tanto como 1.5 desviaciones estándar (Park, 2003).

Seis Sigma puede definirse de diversas formas, Zinkgraf (2006) define Seis Sigma como una metodología que se centra en los procesos para mejorar el crecimiento y la productividad. Por otro lado, Gygi, DeCarlo y Williams comentan que Seis Sigma es una metodología para minimizar los errores y maximizar el valor.

Seis Sigma, tal como se practica hoy, toma la forma de proyectos realizados en fases generalmente reconocidas como Definir – Medir – Analizar – Mejorar – Control, o DMAIC. Generalmente, después de la fase de definición del proyecto, las características clave del proceso se identifican y se comparan en las fases de Medir y Analizar; a esto le sigue la fase de Mejora, donde se cambia un proceso para un mejor desempeño, y luego la fase de Control tiene como objetivo monitorear y mantener las ganancias. La idea común a través de estas fases es el uso del pensamiento estadístico en el que los datos medidos son un proxy indispensable para las realidades y los hechos (Goh, 2002).

DMAIC se desarrolló originalmente como un método para la reducción de la variación del proceso, pero el desarrollo posterior de la metodología condujo a su aplicación reciente en la resolución de problemas genéricos y el enfoque de mejora. Las acciones dirigidas a lograr mejoras se derivan de las relaciones detectadas entre las entradas y salidas del proceso. El método prescribe que los problemas se describen claramente mediante parámetros cuantificados. Seis Sigma subraya la aplicación de métricas cuantitativas, tales como mediciones de variación de proceso, métricas de calidad crítica, parámetros críticos de proceso, tasas de defectos, así como medidas de calidad tradicionales, como la capacidad del proceso. Estas métricas se utilizan para definir los objetivos de mejora y se siguen durante toda la vida útil del proyecto de mejora (Kosina, 2015).

2.7.7 Dorian Shainin

Cuando uno piensa en los pioneros del movimiento de calidad en todo el mundo, nombres como Deming, Crosby, Juran y Taguchi vienen rápidamente a la mente. Dorian Shainin puede ser un gurú de la calidad "menos conocido", pero su filosofía y técnicas no académicas ahora están cobrando importancia. Dorian Shainin desafió a la comunidad de fabricantes a buscar una forma más básica y efectiva de hacer el DOE. A través de sus métodos fáciles de usar, la capacidad de proceso aumentada se alcanza fácilmente (Goodman & Wyld, 2001).

Dorian Shainin pone varias técnicas -tanto conocidas como recién inventadas-, en una estrategia coherente paso a paso para la mejora de procesos en un entorno de fabricación. Esta estrategia se llama Sistema Shainin. Parte de la estrategia es promovida por Bhote (2000). Tanto Shainin, como especialmente Bhote, presentan el Sistema Shainin como una alternativa a los métodos de SPC y Taguchi. El sistema ha sido descrito en varios documentos. Dado que los elementos del sistema Shainin están legalmente protegidos como marcas de servicio y otros métodos rara vez se discuten en la literatura; es difícil obtener una descripción completa.

Partir de un problema sobre el objetivo de la estrategia, es seleccionar una, dos o tres causas absolutas de variación (llamadas Red X, Pink X y Pale Pink X, respectivamente) de todas las causas posibles (las X). Esto se consigue mediante un método de "orientación": mediante el uso de herramientas de análisis estadístico, se seleccionan las clases de causas en las que probablemente se encuentren las causas importantes, logrando así un acercamiento a la Red X. Una vez que la Red X se identifica, se toma una acción correctiva irreversible o se ajustan y controlan las tolerancias en la Red X. El sistema Shainin se basa en un conjunto de herramientas que se entienden y se aplican fácilmente, evitando las técnicas más avanzadas (De Mast, Schippers, Does, & Van Den Jeuvel , 2000).

Los métodos de Shainin se basan de hecho en una teoría estadística sólida y son absolutamente rigurosos. Justo antes de la jubilación de Dorian Shainin, la compañía Shainin Problem Solving and Prevention contrató los servicios de Carl Bennett, un destacado estadístico, para garantizar que los métodos se mantuvieran estadísticamente sólidos (Shainin, 2012).

2.7.8 ¿Cuál es el enfoque más adecuado?

Antes de seleccionar un enfoque con la creencia de que será el más adecuado para el control de variabilidad en nuestro proceso, debemos tener claro su grado de efectividad, el costo que nos representara utilizar este enfoque, el tiempo que estamos dispuestos a invertir, el nivel de dificultad que tiene, así como otros tantos datos que no tenemos claros solo con saber de su existencia y cómo funcionan. En la Tabla 2:3 se muestra un comparativo sobre los 3 enfoques que se utilizan en el Diseño de Experimentos.

Tabla 2:7 Comparativa de enfoques utilizados en el Diseño de Experimentos. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000)

Característica	Clásico	Taguchi	Shainin
Técnicas	Uno o dos enfoques de factorial de fracción y método de superficie de respuesta	Una aproximación: matriz ortogonal	Por lo menos 10 aproximaciones (Fig. 2-4)
Capacidad de generación de pistas	Pobre: conjeturas	Pobre: conjeturas	Poderoso: “hablar con las partes”
Efectividad	Rango de mejora moderada: el retroceso es posible	Rango de mejora baja: el retroceso es probable	Rango de mejora alta: no hay retroceso
Costo	Alto: 30 – 60 corridas	Alto: 50 – 100 corridas	Bajo: 1 – 30 corridas
Complejidad	- Conceptos difíciles - Se requiere ANOVA	- Conceptos difíciles - Multiplicación de matriz interna y externa ANOVA	- Conceptos fáciles, simples y lógicos. - Experimentos hechos por los operadores e ingenieros.
Tiempo	a) Largo: 3 días o 2 semanas b) Largo: pistas débiles significan volver a empezar	a) Largo: una o dos semanas b) Largo: pistas débiles, resultados pobres requieren varias corridas	a) Corto: un día b) Corto: los experimentos se finalizan de entre un día a tres semanas
Validez estadística	Débil: Los efectos de interacción se confunden con los efectos principales	Muy débil: - Sin aleatorización - Los efectos de interacción se confunden con los efectos principales	Fuerte: Separación clara y cuantificación de efectos de interacción y de interacción
Aplicabilidad	- Requiere hardware - Uso principal en producción	Se puede usar en un estudio en papel con simulación por computadora, pero con peligro de resultados incorrectos	- Requiere hardware - Tiene aplicabilidad universal en el diseño de producto / proceso, producción, campo,

			proveedores y procesos administrativos
	- Difícil	- Difícil	- Fácil
Facilidad de implementación	- Resultados incorrectos si las interacciones son fuertes	- Resultados incorrectos probablemente debido al alto grado de fraccionamiento	- Con técnicas de generación de pistas, no es necesario repetir experimentos Sin paradas en los experimentos de generación de pistas, los cuales pueden resolver el 70% de los problemas crónicos de calidad
Interrupciones en la producción	La producción se detiene durante la experimentación	La producción se detiene durante la experimentación	

2.8 Red X

La metodología Red X fue desarrollada por Dorian Shainin desde la década de 1950 hasta la década de 1990. La principal diferencia entre el enfoque de Shainin para la resolución de problemas y la metodología tradicional de resolución de problemas es el enfoque convergente que se utiliza para identificar una causa raíz, también llamado "Efecto de la causa" (Y hasta X). Para aplicar el enfoque convergente, es absolutamente necesario comprender la salida Y. El conocimiento del producto y los procesos relacionados, los síntomas de falla y el contraste entre las partes buenas y malas son elementos clave para entender la salida Y. La salida Y debe ser un parámetro técnico medible con una clara relación con la física de la falla, esto define la salida que queremos mejorar: Green Y. La estrategia progresiva y convergente es un componente crucial en la identificación de las posibles causas raíz (X) mediante una investigación profunda de las partes (también llamada "hablar con las partes"), la eliminación de los sospechosos y la comparación de partes buenas y malas junto con descubrir extremos y contrastes. Las posibles causas, los candidatos de Red X, se prueban utilizando métodos de confirmación eficientes (Kosina, 2015).

Red X se utiliza para la reducción de la variabilidad en un proceso como medio clave para mejorar su eficacia y desempeño. El método de Shainin elimina el paso teórico, por lo que inicialmente requiere encontrar las causas que causan la variación en un proceso utilizando

una o más técnicas de generación de pistas que están diseñadas para determinar las causas que realmente aportan un porcentaje significativo a dicha variación. Estos métodos se basan en un pensamiento estadístico con la visión de la ingeniería para resolver problemas que se consideran o consideraban irresolubles.

Esta metodología se ocupa de la resolución de problemas técnicos enfocados a la rapidez, eficiencia y sostenibilidad en ambientes complejos y restringidos utilizando como medio principal la identificación de la o las causas raíz de dichos problemas para así poder atacar directamente el cáncer que representan. Las soluciones alternativas para un arreglo duradero llegan una vez se ha detectado la verdadera causa del fallo. El sistema completo de acuerdo a la metodología de Shainin se presenta en la Figura 2-18, donde observamos el camino a seguir para lograr la satisfacción del cliente (cero defectos en la característica crítica) mediante el proyecto de mejora.

Ha Dao (2008) nos comenta que “la ruta más rápida hacia la Red X es la búsqueda progresiva”, argumentando lo siguiente: la búsqueda progresiva utiliza generadores de pistas y un proceso de eliminación para eliminar familias de causas (grupos) para encontrar la Red X. Para ilustrar esta estrategia convergente, a menudo usamos el ejemplo del juego de diccionario. El objetivo es encontrar una palabra secreta en un diccionario preguntando a alguien que la conoce. En este caso, consideraremos la palabra secreta como la Red X. El primer paso en la estrategia es dividir el diccionario por la mitad y preguntar si la palabra está en la mitad frontal del diccionario. Si la respuesta es sí, eliminamos la mitad de las palabras en el diccionario en la mitad posterior. Luego dividimos el diccionario de nuevo por la mitad y hacemos la misma pregunta. Con cada pregunta subsiguiente en la estrategia, reducimos a la mitad el número de posibles candidatos. Cuando lleguemos a las 17 preguntas, solo quedará una palabra de candidato. Comenzamos haciendo preguntas amplias y avanzamos progresivamente hacia preguntas más estrechas. Esta es una búsqueda progresiva, utilizando el proceso de eliminación para converger a la Red X.

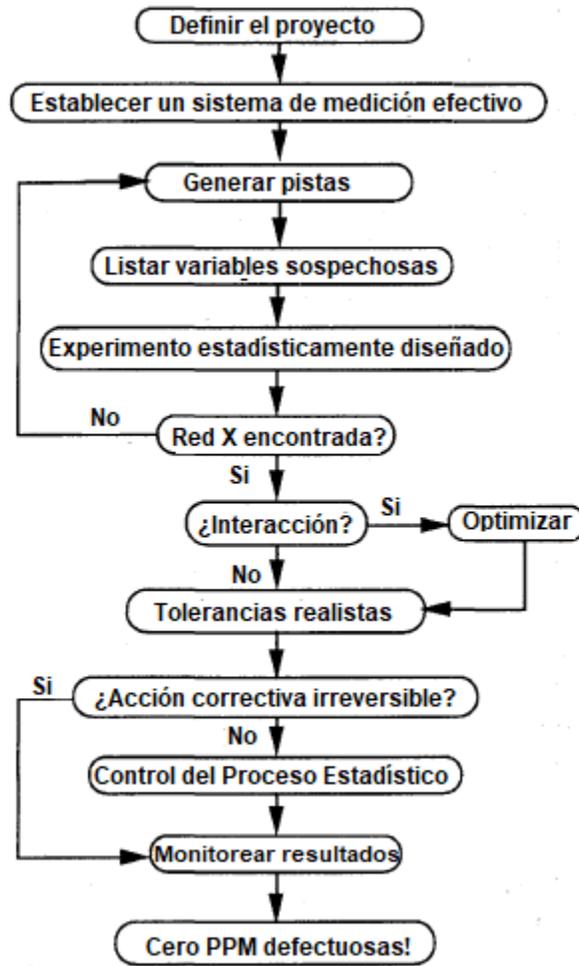


Figura 2-18.- El sistema Shainin. Fuente: (Shainin, 1993)

2.8.1 ¿Qué problemas resuelve y qué herramientas utiliza para lograrlo?

Problemas técnicos enfocados a la rapidez, eficiencia y sostenibilidad en ambientes complejos y restringidos. Lo anterior, buscando las características de los componentes críticos ocultos o los parámetros del proceso de fabricación que causan una variación no deseada del producto, todo esto gracias a la utilización del mapa de flujo propuesto por Keki y Adi Bhote (2000). A continuación, se enuncian y describen las herramientas más utilizadas por Shainin en la resolución de los proyectos que son llevados a cabo bajo su sistema, siendo su objetivo localizar y neutralizar las causas de variabilidad.

- Búsqueda de componentes
- Búsqueda de variables

- Gráfico Multi-vari
- Comparaciones aparejadas
- Desarrollo de factoriales completos
- Análisis Mejor vs Actual (Better vs Current)
- Diagrama de dispersión
- Isoplot

2.8.1.1 Búsqueda de componentes

Los patrones de búsqueda de componentes nos proporcionan una búsqueda sistemática para averiguar por qué unos equipos fallan y otros no. Se puede utilizar en:

- a. Los conjuntos (equipos o sistemas) que incorporen subconjuntos (equipos o componentes).
- b. Cuando la característica de calidad debe ser medible y repetible.
- c. Equipos o sistemas que pueden ser montados y desmontados sin que estos se destruyan en el proceso.

Las etapas por seguir en esta búsqueda son:

- 1) Acotamiento (Ballpark): nos deja ver si las causas principales están incluidas.
- 2) Eliminación: utilizada para eliminar los muchos triviales (en palabras de Juran).
- 3) Comprobación (Capping Run): etapa útil para comprobar que las causas clasificadas como principales realmente tienen un efecto de significancia alto y el resto no.
- 4) Análisis factorial: calcula la magnitud del efecto y las interacciones.

2.8.1.2 Búsqueda de variables

Los patrones de búsqueda de variables se usan cuando el número de variables sospechosas es de cinco o más. Estos siguen las mismas reglas que los patrones de búsqueda de componentes; sin embargo, se usan dos niveles de cada variable sospechosa, típicamente alta y baja, en lugar de pares de componentes buenos y malos (Shainin, 1993).

Este método se utiliza para reducir el número de factores de variación sospechosos y para separar los factores importantes de los no importantes (Bhote & Bhote, 2000).

El principio utiliza un proceso de eliminación a través de una comparación organizada. La característica de comparación debe ser mensurable. Finalmente, la selección de niveles “alto” y “bajo”, es apropiada, para cuantificar el cambio sobre la característica de calidad estudiada (Medina, Cruz, & Restrepo, 2007).

La función principal de la búsqueda de variables está dentro de la etapa de diseño de un producto o proceso para evitar que los problemas lleguen a la producción en primer lugar. Esta búsqueda se desglosa en cuatro etapas que se muestran en la Tabla 2:4, las cuales abrigan desde la determinación de variables adecuadas hasta la cuantificación y efectos de interacciones asociadas.

Tabla 2:8 Etapas de la búsqueda de variables. Fuente: (Bhote & Bhote, 2000)

Etapa	Objetivo
1.- Ball Park (acotamiento)	Para determinar si las variables correctas y los niveles correctos para cada variable se han seleccionado para el experimento.
2.- Separación de variables importantes y sin importancia	- Para separar las variables importantes de las variables sin importancia. - Para eliminar la falta de importancia y sus factores asociados efectos de interacción.
3.- Verificación de corrida	Para validar que las variables importantes se confirman como importantes y las no importantes se confirman como sin importancia.
4.-Análisis factorial	Cuantificar la magnitud y los niveles deseados de las variables importantes y sus efectos de interacción asociados.

2.8.1.3 Gráfico Multi-vari

El gráfico Multi-vari, es una herramienta grafica que ilustra patrones de variación en una serie de datos. Es utilizada principalmente para identificar la o las variables que presenten la mayor significancia de variación llamada(s) Red X (s) o familias de variación, estas familias de variación se visualizan de manera más clara en la Figura 2-19.

Con un gráfico multivariable, podemos descubrir las causas de variación asignables de las distribuciones que están en control estadístico, así como de las distribuciones que están fuera de control (Shainin, 1993).

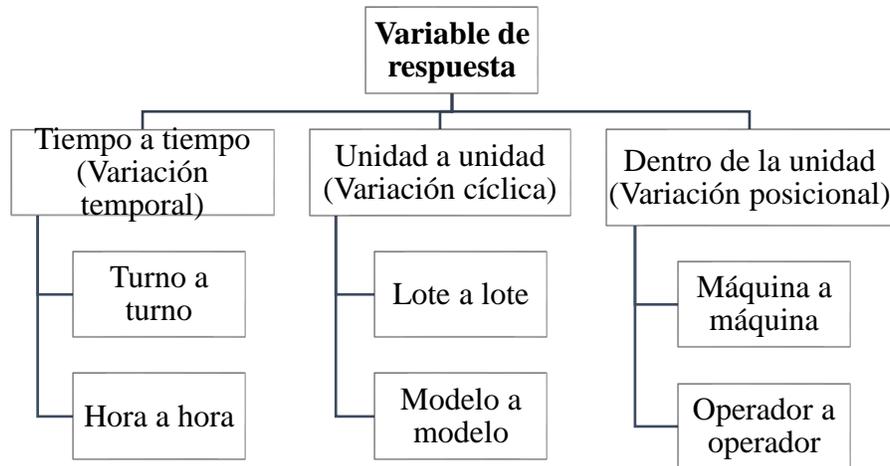


Figura 2-19.- Familias de variación. Fuente: (Lozano Torres, Hernández Ripalda, & Jiménez García, 2019)

Los gráficos Multi-vari, son una forma de presentar un análisis de varianza de datos de una manera gráfica, facilitando una alternativa visual (Tanco Rainusso, 2008). Un gráfico Multi-vari es una herramienta excelente al principio de la búsqueda progresiva de una causa dominante. Este gráfico proporciona una visualización de los componentes de variación asociados con cada familia (Steiner, MacKay, & Ramberg, 2008).

El gráfico Multi-vari es una poderosa herramienta estadística sin los cálculos estadísticos. Planificado y ejecutado correctamente, el gráfico revelará la mayor familia de variaciones y hará una contribución importante y temprana a la búsqueda de la Red X. El poder de un gráfico Multi-vari proviene de la aplicación del principio de Pareto a las fuentes de variación en un proceso (Shainin, Multi-Vari Charts, 2008).

Es importante que la variación de cada familia y subfamilia de variación se cuantifique. La variación familiar de tiempo a tiempo es la diferencia (o rango) entre el promedio de tiempo más alto y el promedio de tiempo más bajo. La variación de familia de unidad a unidad es la diferencia (o rango) entre el promedio más alto dentro de la unidad y el promedio más bajo dentro de la unidad. La variación de la familia dentro de la unidad es la altura de la barra vertical más larga de una unidad dada (Bhote & Bhote, 2000). El gráfico Multi-vari es una herramienta poderosa para reducir el número de variables sospechosas. Es una herramienta muy útil para que las unidades de fabricación a pequeña escala reduzcan el rechazo de la “casa”. El período de entrenamiento es muy corto en días o semanas. Las personas de piso

también pueden entender estas herramientas. El costo de los experimentos es menos. (Sanghvi, Devgania, Deshpande, & Pathak, 2017).

El uso del gráfico Multi-vari, podrá influir en la reducción de una lista de varias posibles causas de variación, llevándola a prestar atención a la o las causas más significativas además de detectar tendencias no aleatorias. Estos ofrecen una vista rápida del proceso sin la necesidad de cantidades masivas de datos. Mario Perez-Wilson (1992) comenta que hay algunas reglas que se deben mantener cuando se construye un gráfico Multi-vari. Estas reglas son las siguientes:

- No realice cambios de proceso mientras recolecta datos.
- La secuencia no debe ser aleatoria

La apariencia de los gráficos Multi-vari depende del orden en que se introduce cada factor. Dado que las apariencias de algunos gráficos son más claras de interpretar que otras, se debe probar el orden de varios factores (Grima Cintas, Marco Almagro, & Tort-Martorell Llabrés, 2012).

2.8.1.4 Comparaciones aparejadas

Este análisis es útil cuando las prioridades no están claras y con él es posible identificar la opción más importante utilizando el resultado final. Son apropiadas cuando la familia más grande de variación es pieza por pieza. Ocho pares de partes, cada una con una buena parte y una mala, se seleccionan para su análisis. Las partes que componen cada par deberían haberse tomado del proceso de producción lo más cerca posible. Las partes se analizan en detalle para identificar diferencias consistentes entre las partes de cada par. Cualquier variable que se mueva en la misma dirección en la que estudiamos las partes buenas y malas en los ocho pares es sospechosa (Shainin, Strategies for technical problem solving, 1993).

2.8.1.5 Desarrollo de factoriales completos

Un diseño factorial completo es un diseño en el cual los investigadores miden las respuestas para todas las combinaciones de niveles de los factores (Minitab, 2017).

2.8.1.6 Análisis Mejor vs Actual (Better vs Current)

Se usa para confirmar la Red X si nos queda solo una variable sospechosa después de la generación de pistas. Esta es una prueba de hipótesis de orden de rango de una cola que

confirma que el nuevo nivel, B (mejor), produce mejores resultados que el nivel actual, C. Si la Red X se ha dejado fuera del experimento, la aleatorización asegura que la posibilidad de llegar a una conclusión falsa se limita al riesgo alfa diseñado en el experimento. La falta de aleatorización niega la validez estadística de un experimento.

Si un experimento concluye que ninguno de los contrastes (interacciones y principales efectos) son importantes, volvemos a la generación de pistas y revisamos nuestros hallazgos previos para encontrar una nueva variable sospechosa que o bien pasamos por alto o eliminamos por error. Cualquier nueva variable que surja de este análisis se agrega a la lista original de sospechosos. No podemos eliminar a ninguno de los sospechosos originales en este momento porque pueden ser parte de una interacción con una de las nuevas variables (Shainin, 1993). Los objetivos son:

- Predecir cuánto mejor es un producto o proceso dado que otro, con una confianza del 90 por ciento o más.
- Asegurar la permanencia de un producto o proceso mejorado sobre uno anterior.
- Seleccionar un producto o proceso sobre otro, incluso si no hay mejora en la calidad, debido a algún otro beneficio tangible, como el costo o el tiempo del ciclo.
- Evaluar más de dos productos, procesos, materiales (B, C, D, E, etc.) simultáneamente.

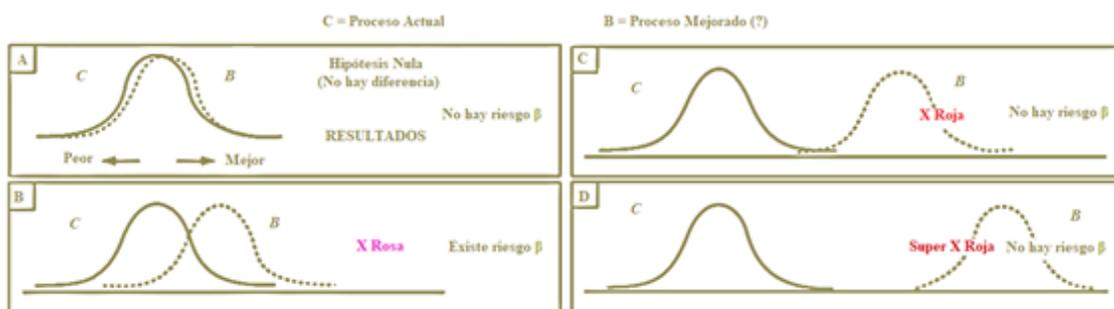


Figura 2-20.- Distribuciones posibles en B vs C. Fuente: Autor.

La Figura 2-20 nos muestra que los resultados podrían ser cualquiera de las cuatro distribuciones de frecuencia. En la parte (A), podemos observar que prácticamente no hay mejora por lo que la hipótesis es nula. En la parte (B), el proceso mejorado genera mejores resultados que el proceso actual, sin embargo, aún se observa vacilación, ya que algunas

muestras de C son mejores que algunas de B, por lo que esto puede ser una X Rosa. En tanto a la parte (C) y (D), podemos observar claramente que, en el primer caso, las peores muestras de B son iguales a las mejores de C, y en el segundo caso, se observa sin lugar a dudas que todas las muestras de B son mejores que las de C, por lo que es indudablemente X Roja.

Si el experimento indica que B es mejor que C, entonces el experimentador rechaza la hipótesis nula (H_0) de B que es lo mismo que C. Si, en realidad, B es realmente mejor que C (en la situación real, pero desconocida), el experimentador tomó la decisión correcta. Sin embargo, si no hay ninguna mejora, el experimentador habrá cometido un error Tipo I; su probabilidad se llama riesgo α . Si el experimento indica un rango mixto, donde B es lo mismo que C, el experimentador no está rechazando la hipótesis nula. Si, en realidad, B no es mejor que C, el experimentador ha tomado la decisión correcta. Pero si B es realmente mejor que C, el experimentador habrá cometido un error Tipo II; su probabilidad se llama riesgo β (Bhote & Bhote, 2000).

2.8.1.7 Diagrama de dispersión

Es una gráfica cuyo objetivo es analizar la forma en que dos variables numéricas están relacionadas. Dadas 2 variables numéricas X y Y, medidas usualmente sobre el mismo elemento de la muestra de una población o proceso, el diagrama de dispersión es una gráfica del tipo X-Y, donde cada elemento de la muestra es representado mediante un par de valores (x_i, y_i) y el punto correspondiente en el plano cartesiano X-Y (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

2.8.1.8 Isoplot

Es una técnica gráfica que separa la variación del producto y el error de medición y proporciona estimaciones para cada uno, de modo que se puede determinar la discriminación del sistema de medición. Isoplot se puede aplicar a un solo sistema de medición con uno o más operadores para probar la repetibilidad del medidor y la reproducibilidad del operador. Es más efectivo cuando se aplica a dos medidores para que cualquier sesgo, medidor a calibrador, también se pueda medir (Shainin, 1993).

Isoplot hace un uso extensivo de pantallas gráficas y pruebas no paramétricas, y a menudo se lleva a cabo a mano. En su forma más simple, se dibujan 30 partes, y cada parte se mide (dos veces e independientemente) por el gage que se está evaluando. La técnica isoplot

comienza con un diagrama de dispersión de esos 30 pares de mediciones. El diagrama de dispersión normalmente tiene una forma de "tubo", como se ilustra en la Figura 2-21. En el diagrama, las desviaciones horizontal y vertical representan la variación de medición general para las lecturas primera y segunda, respectivamente. En relación con el rango de valores ΔS a lo largo del eje horizontal, si la extensión máxima de ΔM a lo largo del tubo es más pequeña hasta cierto punto, se considera que el indicador es adecuado para su uso (Wen-Kuei & Cheng-Feng, 2014).

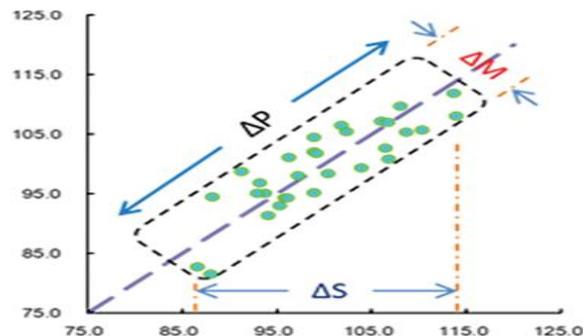


Figura 2-21.- Evaluación de la precisión de gage por isoplot. Fuente: (Wen-Kuei & Cheng-Feng, 2014)

2.8.1.9 Precontrol

La carta de precontrol es una herramienta para prevenir cambios en la media y en la dispersión de la característica de calidad monitoreada, que eventualmente llevarían a la producción de defectuosos. El precontrol es un semáforo contra el cual se comparan, en cada tiempo de inspección, los valores medidos en dos artículos consecutivos de la producción. Las zonas de operación del semáforo (para tolerancias bilaterales) resultan de dividir la tolerancia en cuatro partes: las 2 centrales constituyen la zona verde, las 2 de las orillas forman la zona amarilla, y fuera de las especificaciones se localiza la zona roja como se muestra en la Figura 2-22) (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2004).

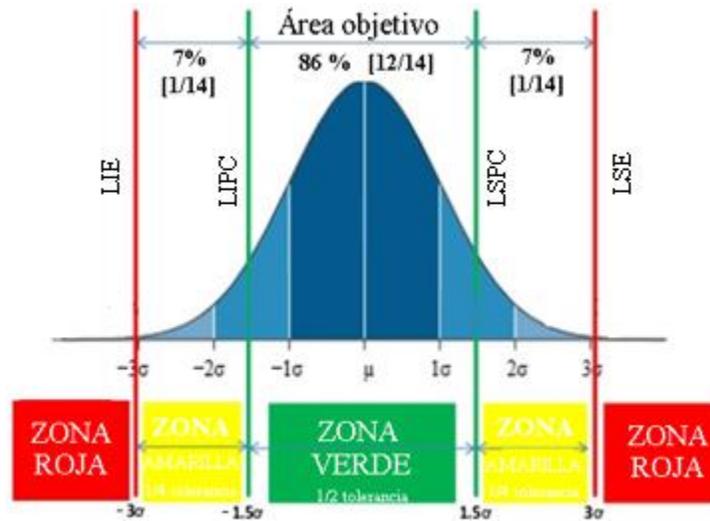


Figura 2-22.- Zonas de precontrol. Fuente: Autor.

El precontrol es efectivo para algunos procesos e los que el operario puede medir una característica de la calidad de interés (dimensión, color, resistencia, etc.) y puede ajustar el proceso para cambiar esta característica, y cuando el proceso tiene una salida continua (por ejemplo, papel) o una discreta (por ejemplo, piezas de máquinas) con una producción total de tres o más piezas. Aunque se requieren mínimo cinco unidades para calificar una preparación, si la producción total es de sólo 3 artículos, el precontrol puede proporcionar información válida antes de que se produzca el tercero (Juran & Gryna, 1993).

Encontramos dentro del precontrol también las tolerancias unilaterales, tanto para límite superior como para límite inferior. Cuando solo se tiene un límite de especificación, ya sea superior (Figura 2-23) o inferior (Figura 2-24), se debe dividir la distancia entre el límite conocido y el valor objetivo (tolerancia) entre 2 para construir una sola línea de precontrol al centro.

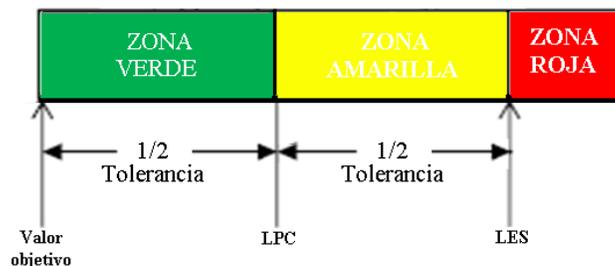


Figura 2-23.- Precontrol para tolerancias unilaterales superiores. Fuente: Autor.

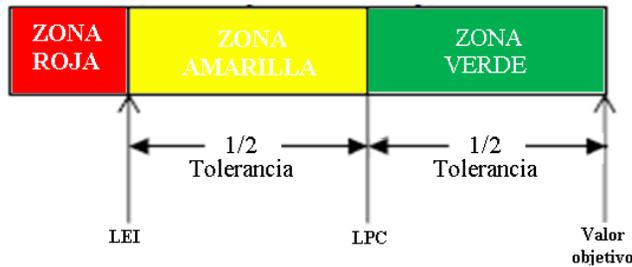


Figura 2-24.- Precontrol para tolerancias unilaterales inferiores. Fuente: Autor

2.8.2 ¿Es la mejor técnica posible?

Es casi imposible el considerar el que solo una técnica pueda resolver todos los problemas en la manufactura, las diferentes técnicas existentes (Lean, Seis Sigma, Red X) son solo herramientas para la solución de problema. El ambiente manufacturero se encuentra en cambios constantes y el método utilizado para la resolución de problemas y quien lo utiliza, deben adaptarse a dichos cambios. No existe una mejor técnica, simplemente existen técnicas diversas que se adaptan al problema que se busca resolver con ella. Keki y Adi Bhote (2000) comentan:

“Nosotros estamos tan convencidos del poder del DOE de Shainin que estamos lanzando un reto: Cualquier problema que pueda ser solucionado por Métodos Clásicos o Métodos Taguchi, nosotros lo resolveremos mejor, más rápido y más barato.”

El método de Shainin ha sido reconocido particularmente por Keki & Adi Bhote como un diseño experimental mucho más simple y eficaz en el proceso de la mejora de la calidad. Para saber si esta propuesta de Shainin se adapta en la solución de un problema específico de manufactura, deberemos tener en cuenta los pros y contras de este método que se muestran en la Tabla 2:4. Sin embargo, según Kam Hoe, Hui Leng, Halim & Rudd (2013), es poco probable que haya un mejor método que se adapte a todo tipo de situaciones. Debido a la facilidad de implementación en la fábrica, el método de Shainin puede convertirse en una estrategia más ampliamente utilizada para la mejora de la calidad siempre que se resuelvan sus limitaciones.

Tabla 2:9 Pros y contras del método de DOE de Shainin. Fuente: (Kam Hoe , Hui Leng, Halim, & Rudd, 2013).

Pros	Contras
------	---------

-
- Se requieren pequeños tamaños de muestra.
 - Muy fácil de utilizar con operaciones matemáticas menos sofisticadas.
 - Las causas raíz de la variabilidad y existencia de factores de interacción están realmente identificadas.
 - El tiempo de entrenamiento y experimentación es corto.
 - Permite una alta participación de empleados de todos los niveles.
- Se basa en el juicio de ingeniería en gran medida.
 - Encontrar el valor marginal del factor de control puede causar confusión y toma tiempo.
 - No caracteriza la relación entre los factores de control y la respuesta de calidad.
 - No se incluyen herramientas estadísticas simples como ANOVA y análisis de regresión.
 - Solo es aplicable a procesos de alta estabilidad y capacidad.
-

2.9 Estado del arte

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
(2017)	International Journal of Quality Reliability Management	Integration of Taguchi and Shainin DOE for Six Sigma improvement: an Indian case	Anupama Prashar	Integra metodologías de Shainin, Taguchi y Seis Sigma en la resolución de problemas
(2015)	Quality innovation prosperity	Shainin methodology: An alternative or an effective complement to Six Sigma?	Jan Kosina	Propone modificar la metodología Seis Sigma para maximizar la eficiencia de DMAIC utilizando enfoques propuestos por Dorian Shainin (Red X).
(2012)	Quality engineering	Statistical engineering: Six decades of improved process and systems performance	Richard D. Shainin	Presenta definición de Shainin de ingeniería estadística, misma que difiere de la definición de Hoerl y Snee y evalúa su eficiencia en función de los estándares propuestos por estos últimos.

(2008)	Quality engineering	An overview of the Shainin System™ for quality improvement	Stefan H. Steiner, R. Jock MacKay & John S. Ramberg	Describe el sistema de solución de problemas de Dorian Shainin y su promoción en el sector de fabricación. Examina y compara algunas herramientas del sistema de Shainin contra métodos alternativos.
(2008)	Quality engineering	Discussion	Ha Dao	Presenta una breve historia del desarrollo del sistema creado por Shainin y comenta sobre los conceptos básicos de Red X. Nos comenta sobre la como se utiliza el algoritmo en la solución de problemas y la selección de herramientas propuestas por Shainin.
(2005)	International Journal of Productivity and Performance Management	A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment	A. J. Thomas & J. Antony	Describe y compara las propuestas de DOE de Taguchi y Shainin en la búsqueda del mejor rendimiento del producto y comenta que la técnica DOE de Shainin, proporciona un enfoque más simple en el entorno industrial.
(2001)	Managements research news	The hunt for the Red X: A case study in the use of Shainin design of experiment (DOE) in an industrial honing operation.	John Goodman & David C. Wyld.	Comenta el uso del diseño de experimentos de Shainin, enfocándose en la reducción de la variabilidad del proceso utilizando la Red X, documento el proceso y presento un análisis de datos de este. Concluye con que la metodología de Shainin es práctica y fácil de ejecutar en diversos entornos siendo la más accesible de todas las técnicas de calidad disponibles.

(1993)	Quality Engineering	Strategies for technical problem solving.	Richard D. Shainin	Este artículo muestra principalmente la forma en que se compone y aplica el sistema Shainin, muestra las herramientas que Shainin utiliza en los proyectos de solución de problemas sobre una característica del proceso que aborda con su sistema y lo que aporta cada una de estas herramientas para llegar al objetivo final.
--------	------------------------	--	-----------------------	--

CAPITULO 3: Método

A continuación, se presenta el diagrama del método aplicado en esta investigación, y en el capítulo se muestra la explicación y desarrollo del diagrama en la Figura 3-1.

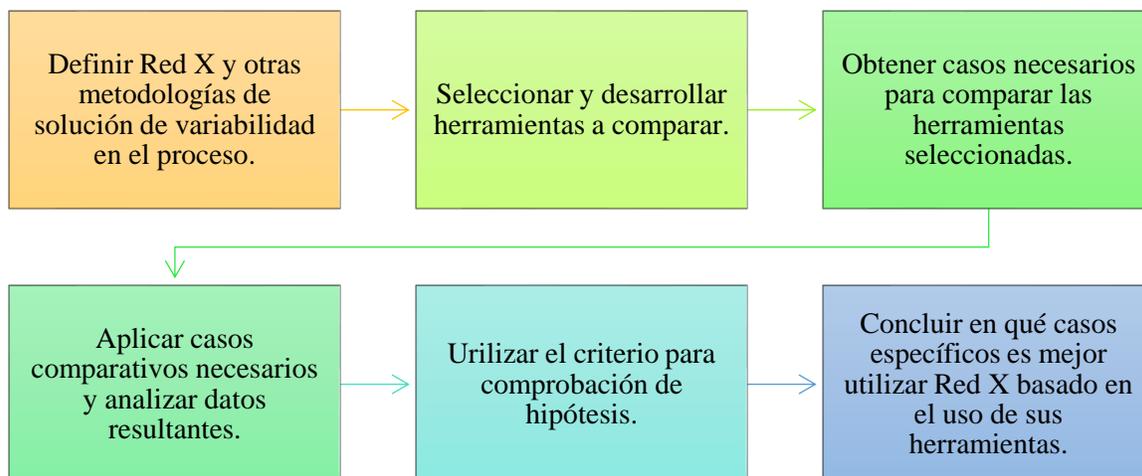


Figura 3-1.- Método de la investigación

3.1 Definir Red X y otras metodologías de solución de variabilidad en el proceso

La investigación es un proceso sistemático, organizado y objetivo destinado a responder a una pregunta problema de investigación, por lo cual debemos tener claro que no se puede tomar un método al azar y compararlo con otro tomado al azar también ya que estos pueden o no tener el mismo propósito. Se eligieron los métodos a fueron considerados como buscadores de solución de variabilidad respondiendo a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la aportación del método a tu tema de investigación?
- ¿En qué medida satisface este método las necesidades de la investigación?

Una vez hecho el descarte de métodos a comparar, se recurrió a la bibliografía y se prosiguió a describir el objetivo/actuar de cada uno. En este trabajo, el primer método que se definió fue el método creado por Dorian Shainin, Red X, el cual es la piedra angular de la investigación, y posteriormente se definieron el o los métodos considerados precisos.

3.2 Seleccionar y desarrollar herramientas a comparar por metodología.

Nuestra hipótesis imperó sobre la idea de comprobar que las herramientas de Red X son mejores tanto independiente como conjuntamente en la reducción de variabilidad, por lo que se eligieron diversas herramientas que fueron categorizadas de acuerdo a el uso de las mismas como se muestra a continuación:

- ❖ Generar / ordenar ideas
 - Diagrama de afinidad
 - Diagrama de Ishikawa
 - Diagrama de Pareto
 - Búsqueda de componentes
 - Búsqueda de variables
- ❖ Recolectar resultados y presentar información
 - Diagrama de dispersión
 - Hoja de comprobación
 - Estratificación
 - B vs C
- ❖ Conocimiento del proceso
 - Diagrama de variabilidad
 - Diagrama Multi-vari
 - ANOVA
 - ANOVA anidado
 - Cartas control

3.3 Obtener casos necesarios para comparar las herramientas seleccionadas.

Esta etapa de la investigación abrigó la generación o búsqueda de casos prácticos que puedan ser simulados con las herramientas elegidas. Inicialmente, se busca casos en la bibliografía existente para tratar de implementar la metodología de manera simulada en cada uno de ellos; en los casos que no se encontraron aplicaciones con características deseadas, se procedió a

generarlos. El generar casos prácticos, nos permitió acercar dichos casos a características específicas, como lo es la variabilidad en el proceso.

Uno de los principales métodos para simular escenarios es el Montecarlo ya que permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. En la industria se utiliza la simulación para predecir las consecuencias que tendrá la toma de una decisión determinada. El fundamento del método Montecarlo y de las simulaciones son los números aleatorios:

- Tablas de números aleatorios.
- Generadores de números aleatorios
- Números pseudo aleatorios.

También existen test de rachas para detectar patrones.

3.3.1 Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”

Un ingeniero de manufactura desea determinar las fuentes de variabilidad en la producción de frascos de vidrio en su etapa de recocido. La empresa del ingeniero produce los frascos de vidrio en cuatro lugares. Cuatro operadores miden la temperatura de los hornos para tres lotes producidos en cuatro turnos en los cuatro lugares. Los datos se clasifican como se muestra en la Tabla 3:1. La información correspondiente a las 192 muestras tomadas se podrán encontrarse en el apartado de anexos marcado como “Anexo 1” (Tabla 6:1), así mismo, en el link de descarga directa: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/TemperaturaHorno.MTW> (Minitab 18, 2017).

Tabla 3:1 Clasificación de variables en la producción de frascos de vidrio (Minitab 18, 2017).

Variable	Descripción	Tipo de variable
<i>Temperatura (Temp.)</i>	La temperatura del horno	Respuesta
<i>Planta (P)</i>	El lugar donde se hizo el frasco de vidrio: 1, 2, 3 o 4.	Factor
<i>Operador (O)</i>	El operador que midió la temperatura: 1, 2, 3 o 4.	Factor
<i>Turno</i>	El turno en que se tomaron las mediciones: 1, 2, 3 o 4.	Factor
<i>Lote (L)</i>	El identificador del lote: 1,2 o 3.	Factor

Parte de la comparativa de este caso, se obtuvo del artículo “Gráfico Multi-vari y ANOVA Anidado: Estudio de Complementariedad” (Lozano Torres, Hernández Ripalda, & Jiménez García, 2019); la portada de este artículo se adjunta como Anexo 3.

3.3.1 Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”

Nota: este ejercicio, fue generado por autor, y para la generación de “observaciones” distribuidas de forma aleatoria, se utilizó la función: $\text{índice}((\text{matriz}+f4)$, aleatorio (número inferior, número superior)), misma distribución que puede ser observada en el anexo 2 (Tabla 6:2). En el caso de los defectos, se extrajo una lista de los más comunes desde la página del fabricante italiano de pinturas y recubrimientos Lechler (Lechler S.P.A, 2019)

En una asociación de talleres destinada a la aplicación de pintura para la industria automotriz, se han detectado una serie defectos en la pintura que causan variación en los resultados buscados por el área de producción. Durante alguno tiempo, el área de producción ha tratado de solucionar cada uno de los defectos encontrados, sin embargo, no se ha podido solucionar el problema, por lo que se tomaron 1000 muestras de no conformidades separando las mismas como se muestra en la Tabla 3:2 para utilizar herramientas que den mayor claridad hacia cuales son los defectos que tienen mayor relevancia en el problema.

Tabla 3:2 Tipos de no conformidades, clave asignada y cantidad observada.

Oportunidad	Clave	# Observados
Brillo no uniforme	A	40
Arrugamiento	B	31
Burbujas de agua	C	208
Cráteres	D	49
Descolgados/ escurrimiento	E	183
Efecto piel de naranja	F	88
Estrías	G	28
Herrumbre/ corrosión	H	36
Marcas de pulido	I	25
Color no uniforme	J	36
Pulverización	K	15
Rayas de lijado	L	37
Velados	M	155
Peladuras	N	35
Impurezas en metalizados	O	34

3.3.2 Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”

Una empresa dedicada a la fabricación de placas de circuitos impresos tiene una sección de soldadura por ola para el ensamblaje de placas. La soldadura por ola consiste en una cinta transportadora que desplaza las placas que tiene todos los circuitos ensamblados, pero sin soldar, sobre una cubeta rectangular que contiene estaño líquido. En la cubeta existe un mecanismo que produce una ola en el estaño. La altura de la ola está diseñada para que toque a la placa quedando las conexiones de la placa soldadas. Se desea realizar un experimento para determinar si existen posibilidades de reducir la cantidad de estaño utilizado para poder así abaratar costos de fabricación, esto, proponiendo un nuevo nivel de variables. Para ello se decide controlar los siguientes factores en promedio: factor A: Velocidad de la cinta, factor B: Temperatura de la placa, factor C: Temperatura del estaño líquido, factor D: Densidad del estaño; los niveles (actual y propuesto) se describen en la Tabla 3:3.

Tabla 3:3 Niveles actual y propuesto de factores

Factores	Nivel actual	Nivel propuesto
Velocidad de cinta (A)	1.8 m/min	1.6 m/min
Temperatura de placa (B)	30°C	50°C
Temperatura estaño (C)	210°C	260°C
Densidad de estaño (D)	0.86 gr/cm ³	0.83 gr/cm ³

Se obtuvo la información presentada en la Tabla 3:4 tras experimentar con 16 corridas combinando los niveles propuesto y actuales.

Tabla 3:4 Matriz de niveles de factores y defectos encontrados

Velocidad de cinta	Temperatura de placa	Temperatura del Estaño	Densidad de estaño	Defectuosos
1.6	30	210	0.83	33
1.8	30	210	0.83	39
1.6	50	210	0.83	50
1.8	50	210	0.83	56
1.6	30	260	0.83	49
1.8	30	260	0.83	38

1.6	50	260	0.83	67
1.8	50	260	0.83	56
1.6	30	210	0.86	60
1.8	30	210	0.86	93
1.6	50	210	0.86	62
1.8	50	210	0.86	94
1.6	30	260	0.86	76
1.8	30	260	0.86	92
1.6	50	260	0.86	78
1.8	50	260	0.86	94

3.4 Aplicar casos propuestos y analizar datos resultantes.

Esta etapa es crucial, ya que, en el o los casos en que se utilizaron simulaciones, se tuvo libre albedrío en la forma en que los datos son colocados y, por tanto, la forma en que se afectan los resultados. De tal manera que, si esta etapa no se lleva con precisión, podríamos alterar los datos de tal forma que no estaríamos llegando al resultado ideal, sino a uno manipulado por datos que están donde no deberían.

La interpretación de los datos resultantes deberá desprender con claridad del análisis de cada tabla o gráfico que se originen del software utilizado en la simulación de casos. En todo caso, el principal resultado será demostrar si la hipótesis es aceptada o rechazada.

3.4.1 Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”

En este caso, se utilizaron los programas Minitab 18 y JMP 14 para la aplicación de las herramientas. Para el caso del gráfico Multi-vari, Grima Cintas et. al (2012) recomienda la aplicación del modificando el orden de variables en la aplicación, dejando la variable perteneciente al tiempo en la tercera posición. De acuerdo con la recomendación anterior, se obtuvieron los siguientes órdenes y resultados:

- A. Planta – Operador – Turno – Lote (Figura 3-2).
- B. Operador – Lote – Turno – Planta (Figura 3-3).
- C. Lote – Planta – Turno – Operador (Figura 3-4).

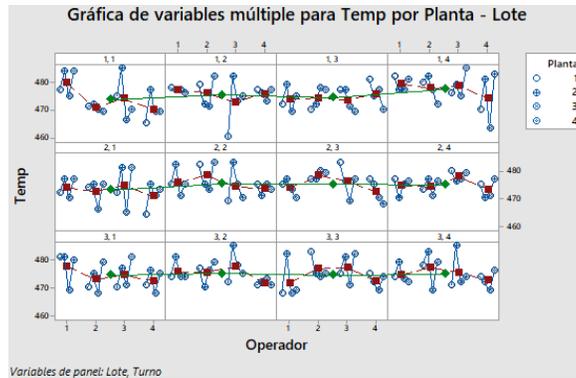


Figura 3-2.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma A. Generado en Minitab 18.

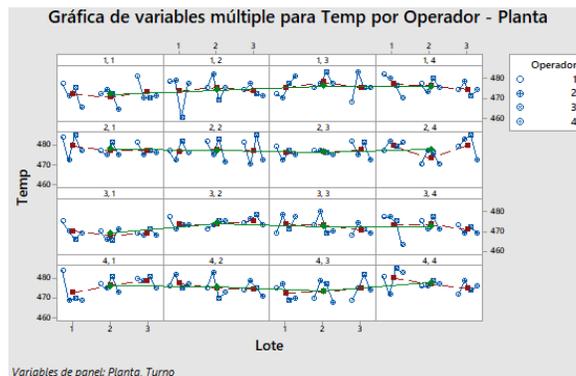


Figura 3-3.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma B. Generado en Minitab 18.

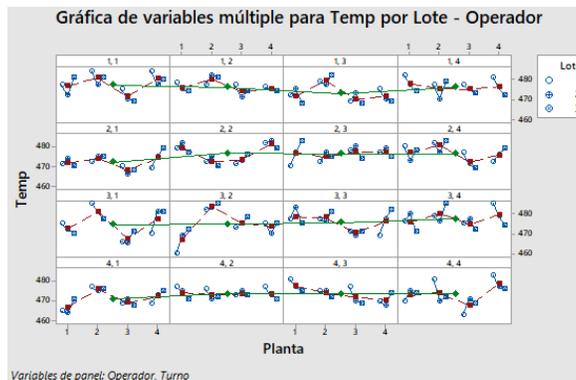


Figura 3-4.- Gráfico Multi-vari ordenado de forma C. Generado en Minitab 18.

En el caso del ANOVA anidado, la anidación no puede ser modificada, por lo cual se sigue la anidación que se muestra en la Tabla 3:4 y los resultados obtenidos en la Figura 3-5.

ANOVA anidada: Temp vs. Planta, Operador, Turno, Lote

Análisis de varianza de Temp

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Planta	3	731.5156	243.8385	5.854	0.011
Operador	12	499.8125	41.6510	1.303	0.248
Turno	48	1534.9167	31.9774	2.578	0.000
Lote	128	1588.0000	12.4062		
Total	191	4354.2448			

Componentes de la varianza

Fuente	Comp.Var.	% del total	Desv.Est.
Planta	4.212	17.59	2.052
Operador	0.806	3.37	0.898
Turno	6.524	27.24	2.554
Lote	12.406	51.80	3.522
Total	23.948		4.894

Tabla 3:5 Anidación de variables

Variable	Anidado en:
Planta	-
Operador	Planta
Turno	Operador
Lote	Turno

Figura 3-5.- Resultados ANOVA anidado. Generado en Minitab 18.

En la aplicación del gráfico de variabilidad, dentro del programa JPM, es posible elegir el tipo de modelo que tendrá el gráfico, en este ejemplo específico, se optó por el modelo “anidado”, esto para llevar a cabo de forma más adecuada la comparativa, obteniendo la Figura 3-6.

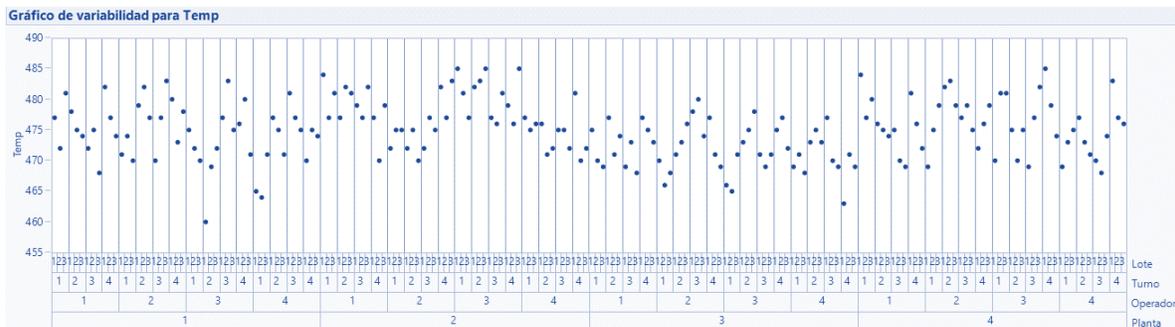


Figura 3-6 Gráfico de variabilidad. Generado en JMP 14.

En esta categoría, “Conocimiento del proceso”, se considera de vital importancia poder visualizar el panorama tanto general como específico. Para el caso de las Cartas Control, se seleccionaron 3 diferentes cartas control para la finalidad antes descrita:

- Carta de Individuales, para el panorama general (Figura 3-7)
- Carta \bar{X} -R para subgrupos de $n < 8$, para las Plantas (Figura 3-8)
- Carta \bar{X} para subgrupos continuos, para los turnos (Figura 3 - 9)

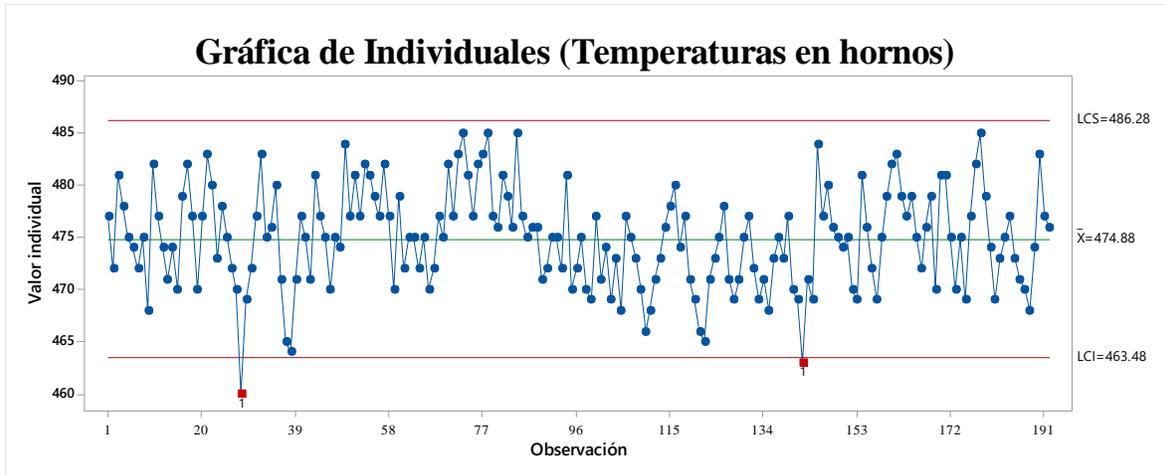


Figura 3-7 Carta de Individuales para temperaturas en hornos. Generado en Minitab 18.

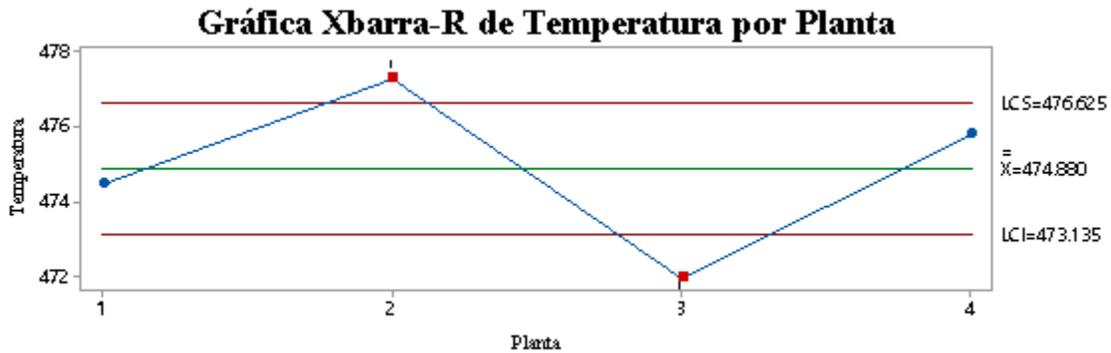


Figura 3-9 Carta \bar{X} -R para temperatura de acuerdo a cada planta. Generado en Minitab 18.

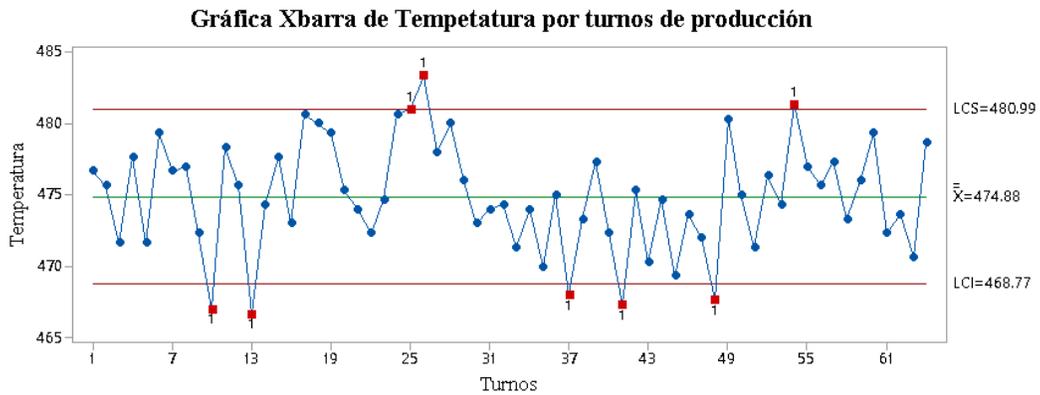


Figura 3-8 Carta \bar{X} para temperatura de acuerdo a los turnos muestreados. Generado en Minitab 18.

3.4.2 Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”

En este caso, se utilizaron los programas Excel y Minitab 18 para la aplicación de las herramientas. Para la primera herramienta utilizada, el diagrama de afinidad (Figura 3-10), se utilizaron como base la lista previamente mostrada de defectos de pintura.

Operador	Ambiente	Tratamiento previo	Materiales
<ul style="list-style-type: none"> • Descolgados • Piel de naranja • Estrías • Marca de pulido • Color no uniforme • Rayas de lijado • Impurezas en metalizado 	<ul style="list-style-type: none"> • Cráteres • Herrumbre /corrosión • Pulverización • Velados • Peladuras 	<ul style="list-style-type: none"> • Burbujas • Herrumbre 	<ul style="list-style-type: none"> • Brillo no uniforme • Arrugamientos • Color no uniforme

Figura 3-10 Diagrama de afinidad sobre defectos de pintura. Fuente: Autor

En el caso del diagrama de Pareto, se utilizó el programa Excel para realizar tanto los cálculos necesarios para el porcentaje como el diagrama mostrado en la Figura 3-11.

Tabla 3:6 Defectos, claves, observaciones e indicadores previo pareto

Oportunidad	Clave	# Observados	%	Acumulado	% Acum.
Brillo no uniforme	A	40	4%	40	4%
Arrugamiento	B	31	3%	71	7%
Burbujas en pintura	C	208	21%	279	28%
Cráteres	D	49	5%	328	33%
Descolgados/ escurrimiento	E	183	18%	511	51%
Efecto piel de naranja	F	88	9%	599	60%
Estrías	G	28	3%	627	63%
Herrumbre/ corrosión	H	36	4%	663	66%
Marcas de pulido	I	25	3%	688	69%
Color no uniforme	J	36	4%	724	72%
Pulverización	K	15	2%	739	74%
Rayas de lijado	L	37	4%	776	78%
Velados	M	155	16%	931	93%
Peladuras	N	35	4%	966	97%

Impurezas en metalizados	O	34	3%	1000	100%
--------------------------	---	----	----	------	------



Figura 3-11 Diagrama de Pareto sobre defectos de pintura. Generado en Excel

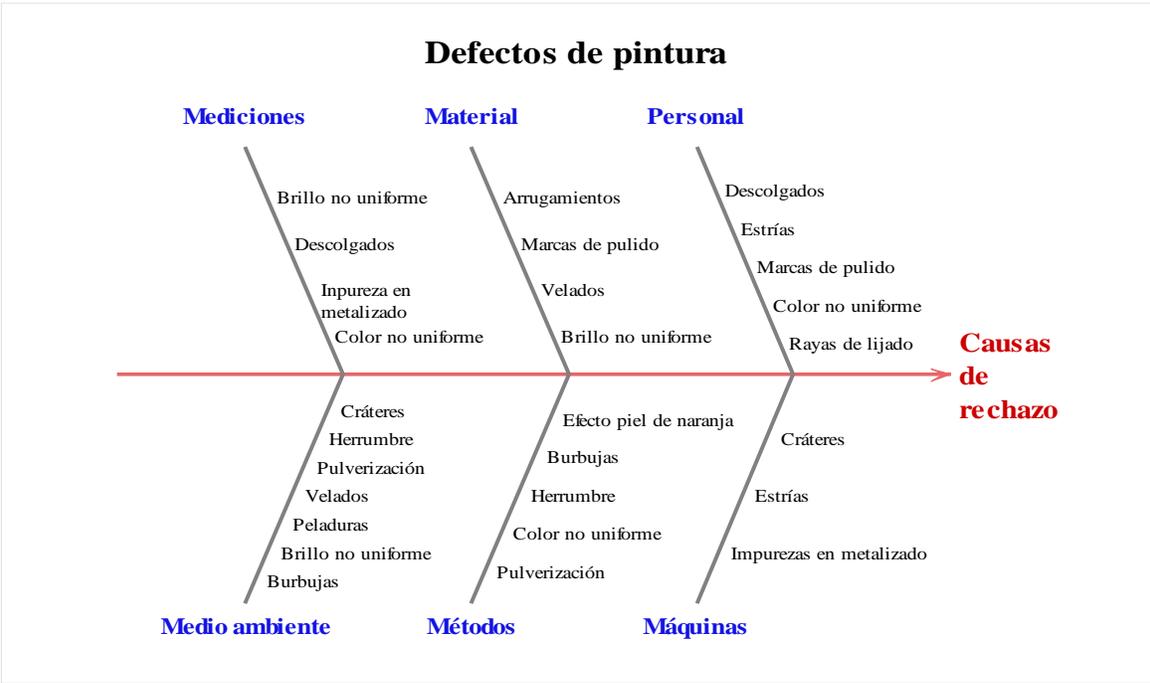


Figura 3-12 Diagrama causa - efecto sobre defectos de pintura. Generado en Minitab 18

En la aplicación del diagrama causa-efecto, se utilizó el programa Minitab 18, donde es posible el producir el diagrama con causas y subrama (Figura 3-12). En este caso, se optó

por no mostrar las subramas en el grafico debido a la extensión del mismo, por lo que se desglosa el listado de dichas subramas a continuación.

- Brillo no uniforme
 - ✓ Absorción por parte del fondo por secado insuficiente
 - ✓ Cantidad de endurecedor no idóneo
 - ✓ Secado lento por medio ambiente
 - ✓ Contacto con agentes químicos agresivos
- Arrugamiento
 - ✓ Pinturas originales sensibles a los disolventes.
 - ✓ Utilización de diluyentes no idóneos
 - ✓ Utilización de fondo no idóneo
- Burbujas
 - ✓ Tratamiento previo insuficiente
 - ✓ Sellado de juntas insuficiente
 - ✓ Espesor elevado
 - ✓ Humedad en medio ambiente
 - ✓ Temperaturas de secado elevadas
- Cráteres
 - ✓ Falta de mantenimiento en líneas de aire comprimido
 - ✓ Aire englobado
 - ✓ Presencia de disolventes en la pistola
 - ✓ Presencia de silicona en el ambiente
- Descolgados
 - ✓ Catalizadores y disolventes en cantidades no idóneas
 - ✓ Viscosidad inadecuada
 - ✓ Tiempo de espera entre manos inadecuado
 - ✓ Mala regulación del abanico de pintado por operador
- Efecto piel de naranja
 - ✓ Técnica aplicativa incorrecta
 - ✓ Regulación de pistola incorrecta
 - ✓ Diluyentes aplicados demasiado rápido

- ✓ Mala regulación de temperatura en cabina
- Estrías
 - ✓ Pistola mal regulada por operador
 - ✓ Presión de aire irregular
 - ✓ Viscosidad muy baja
 - ✓ Aplicación muy mojada
- Herrumbre / corrosión
 - ✓ Daños por contacto con agentes químicos.
 - ✓ Exposición al medio ambiente con humedad elevada
- Marca de pulido
 - ✓ Técnica de pulido mal aplicada
 - ✓ Materiales utilizados no idóneos
 - ✓ Secado de película de pintura insuficiente
- Color no uniforme
 - ✓ Errónea elección del color por operador
 - ✓ Errónea medición de pigmentos
 - ✓ Mezcla de pintura ineficiente
 - ✓ No verificar la tonalidad previa a aplicación
- Pulverización
 - ✓ Técnicas de cubrimiento mal empleadas
 - ✓ Ventilación insuficiente
 - ✓ Técnicas de aplicación ineficientes
- Rayas de lijado
 - ✓ Preparación incorrecta de piezas
 - ✓ Utilización de lija inadecuada
 - ✓ Aplicación de esmalte en espesores insuficientes
- Velados
 - ✓ Condiciones climáticas desfavorables
 - ✓ Uso de diluyentes inadecuada
 - ✓ Secado forzado
- Peladuras

- ✓ Presencia de contaminantes en medio ambiente
- ✓ Temperatura ambiental no adecuada durante la aplicación
- ✓ Superficie sucia/contaminada
- Impurezas en metalizado
 - ✓ No verificar el espesor de película transparente
 - ✓ Pistola y/o componentes en mal estado
 - ✓ Manos con falta de humedad

En la aplicación del diagrama de dispersión, se utilizó el programa Excel.

Oportunidad	Clave	# Observados
Brillo no uniforme	1	40
Arrugamiento	2	31
Burbujas en pintura	3	208
Cráteres	4	49
Descolgados/ escurrimiento	5	183
Efecto piel de naranja	6	88
Estrías	7	28
Herrumbre/ corrosión	8	36
Marcas de pulido	9	25
Color no uniforme	10	36
Pulverización	11	15
Rayas de lijado	12	37
Velados	13	155
Peladuras	14	35
Impurezas en metalizados	15	34



Figura 3-13 Diagrama de dispersión sobre frecuencia de oportunidades. Generado en Excel

En tanto a la hoja de comprobación, se asegura que se haga una verificación o una prueba de forma rutinaria, por lo cual, el operador será el más involucrado. Las Figura 3-14 muestra una hoja de comprobación para piezas individuales, mientras que la Figura 3-15, muestra una hoja de comprobación usualmente utilizada para lotes o turnos de trabajo.

HOJA DE COMPROBACIÓN		
Producto: Defensa 002	Fecha: 20-diciembre	
Etapa: Inspección final	Identificación: Def. pintura	
Cant. Inspeccionada: 1924	Inspector /operador: 001	
Oportunidad	Presente	No presente
Brillo no uniforme		X
Arrugamiento		X
Burbujas en pintura		X
Cráteres	X	
Descolgados/ escurrimiento		X
Efecto piel de naranja		X
Estrías		X
Herrumbre/ corrosión		X
Marcas de pulido		X
Color no uniforme		X
Pulverización		X
Rayas de lijado	X	
Velados		X
Peladuras		X
Impurezas en metalizados	X	

Figura 3-14 Hoja de comprobación pieza individual. Fuente: Autor

HOJA DE COMPROBACIÓN		
Producto: Defensa 002	Fecha: 20-diciembre	
Etapas: Inspección final	Identificación: Def. pintura	
Cant. Inspeccionada: 1924	Inspector /operador: 001	
Oportunidad	Registro	Total
Burbujas en pintura		208
Descolgados/ escurrimiento		183
Velados		155
Efecto piel de naranja		88
Cráteres		49
Brillo no uniforme		40
Otros		277
	Total	1000

Figura 3-15 Hoja de comprobación para inspección de lotes y/o turnos. Fuente: Autor

3.4.3 Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”

En este caso, se utilizaron los programas Minitab 18 y Design-Expert 7 para la aplicación de las herramientas.

Para la búsqueda de variables se seleccionaron niveles “actual” y “propuesto”, mostrados en la Tabla 3:3, ya que se consideró, son apropiados para cuantificar el cambio sobre la característica de calidad estudiada. Inicialmente se realizaron tres corridas, con los niveles “actuales” y tres corridas evaluando la operatividad a los nuevos niveles de funcionamiento propuesto. En la tabla 3:7 se muestran los resultados de la búsqueda de variables. El cifrado que aparece en dicha tabla, refiere a la variable y el nivel al que se utilizó, por ejemplo, A_nR_p, significa que la variable A se utilizó en nivel propuesto mientras que las otras variables (R), se utilizaron a nivel actual

Tabla 3:7 Resultados de la búsqueda de variables

Corrida	Factor	Nivel propuesto	Resultados	Nivel actual	Resultados
			62		71
Iniciales		A _p B _p C _p D _p	63	A _n B _n C _n D _n	73
			66		93
1	A	A _n R _p	56	A _p R _n	60
2	B	B _n R _p	49	B _p R _n	94
3	C	C _n R _p	50	C _p R _n	92

4	D	D _n R _p	78	D _p R _n	39
---	---	-------------------------------	----	-------------------------------	----

Se realizó una comparación entre los rendimientos de los 2 niveles expuestos (actual y propuesto) con el fin de confirmar si la propuesta de mejora en efecto arrojaría mejores resultados que lo actual. En este caso, se realizaron 4 corridas con los niveles actuales y 4 con los niveles propuestos, los resultados, se muestran en la Figura 3-16.



Figura 3-16 Evaluación del proceso normal (C) vs propuesto (B)

Para el caso del ANOVA, se utilizó el programa Design-Expert 7, con el cual obtuvimos lo mostrado en la Figura 3-17.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	5803.93	6	967.32	12.40	0.0007	significant
<i>A-Velocidad</i>	462.16	1	462.16	5.92	0.0378	
<i>B-Temp. Placa</i>	346.33	1	346.33	4.44	0.0644	
<i>C-Temp. Estai</i>	240.25	1	240.25	3.08	0.1132	
<i>D-Densidad es</i>	4226.00	1	4226.00	54.16	< 0.0001	
<i>AC</i>	289.00	1	289.00	3.70	0.0864	
<i>BD</i>	240.19	1	240.19	3.08	0.1132	
Residual	702.25	9	78.03			
Cor Total	6506.18	15				

The Model F-value of 12.40 implies the model is significant. There is only a 0.07% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, D are significant model terms.

Figura 3-17 ANOVA para problema "Defectos de soldadura". Generado en Design-Expert 7

3.5 Definir un criterio de medición para la prueba de hipótesis

El criterio de medición establece la medida que utilizamos para evaluar las alternativas propuestas. El paso inicial fue elegir un problema a solucionar (casos de estudio) y justo después de ello vienen los criterios de medición, que ayudan a medir la eficacia e impacto del emprendimiento desarrollado. Los puntos que se deben tomar en cuenta en cualquier sistema de medición elegible son:

- Debe contar con un objetivo o plan específico; en nuestro caso, el objetivo específico es la reducción de variabilidad en un proceso de manufactura.
- Un medio para medir la actividad desarrollada; nuestra calificación propuesta se muestra en la Tabla 3:3, que fue creada en base a la experiencia obtenida mediante la aplicación de herramientas con ayuda de diferentes softwares empleados al aplicar los casos de estudio.

Definir un criterio de medición es esencial para el correcto desarrollo del tema de investigación, ya que, para poder llevar a cabo los análisis y conclusiones sobre las comparaciones entre metodologías, es necesario contar con una métrica que no beneficie ni opaque los resultados de una herramienta u otra por lo que para definir la evaluación se utilizó un criterio de puntuación 1-5 (de acuerdo a la experiencia que se tuvo al utilizarlas), desglosándose de la siguiente manera:

- 1 = Nada
- 2 = Poco
- 3 = Medianamente
- 4 = Suficiente
- 5 = Sobresaliente

Tabla 3:8.- Herramientas propuestas para la categoría “Generar/ ordenar ideas” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Generar / ordenar ideas	Herramienta	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Criterio					
	Diagrama de afinidad	3	4	4	2	3
Diagrama de Ishikawa	2	4	4	3	3	

Diagrama de Pareto	4	4	4	5	3
Búsqueda de componentes	0	0	0	0	0
Búsqueda de variables	0	0	0	0	0

Tabla 3:9 Herramientas propuestas para la categoría “Recolectar y presentar información” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Recolectar resultados y presentar información	Herramienta / Criterio	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Gráfico de dispersión	0	0	0	0	0
	Hoja de comprobación	0	0	0	0	0
	Estratificación	0	0	0	0	0
	B vs C	5	4	5	3	4

Tabla 3:10 Herramientas propuestas para la categoría “Conocimiento del proceso” en base a experiencia de aplicación. Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Conocimiento del proceso	Herramienta / Criterio	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Diagrama de variabilidad	4	3	4	3	3
	Diagrama Multi-vari	4	4	5	5	3
	ANOVA	0	0	0	0	0
	ANOVA anidado	3	2	4	3	3
	Cartas control	4	3	3	3	3

3.6 Concluir en qué casos específicos es mejor Red X en la solución de problemas

En esta etapa final, se analizarán los casos de estudio de acuerdo a los resultados obtenidos y, habiéndolos analizado, concluir en cuales de estos casos y por qué, es mejor utilizar el método Red X de Dorian Shainin para la solución de problemas.

3.6.1 Caso 1: Comparativa herramientas categoría “Conocimiento del proceso”

Para este caso, se propone que las herramientas gráficas sean utilizadas de forma complementaria con el ANOVA anidado, ya que como se observa en la aplicación, las herramientas nos muestran datos similares pero diferentes formas de interpretación, una gráfica, y la otra numérica. Lo anterior, recomendado para cumplir con una de las necesidades básicas de la interpretación de datos: que todos los involucrados en el proceso del cual se originan los datos, tengan la oportunidad de entender cómo se comportan los mismos, desde el personal de piso hasta el personal gerencial.

Durante el ejercicio, fue posible constatar que, aun cumpliendo con su función, el gráfico de variabilidad en comparativa con el Multi-vari, es menos claro para la lectura e identificación de variables significativas, así mismo, se sabe que no es recomendable su uso para ejercicios con más de 3 variables de control. En el caso de las cartas control, se observa cómo fue necesario la realización de 3 ejercicios (1 por cada carta desarrollada) para obtener la misma visibilidad del proceso que ofrece el gráfico Multi-vari en 1 sola aplicación. El gráfico Multi-vari, además de ser más claro, podrá ser utilizado con hasta 4 variables de control (de acuerdo con las limitaciones del programa utilizado), lo que permite que pueda utilizarse en más ejercicios que sus contrapartes.

3.6.2 Caso 2: Comparativa herramientas categoría “Generar/ ordenar ideas”

Dentro de esta categoría, no se consideraron herramientas directas de la metodología propuesta por Shainin, sin embargo, se toma en cuenta el diagrama de Pareto en como doble actor (7 herramientas y Shainin) debido a que Shainin se basa en la afirmación de que el 20% de los problemas origina el 80% de probabilidad.

Como punto adicional, se comenta que, para este caso específico, los diagramas de Pareto y dispersión, aunque requirieron más que una lluvia de ideas (caso de las otras herramientas) la lectura / comunicación y la detección de causa raíz, resultó abrumadora en comparación con sus oponentes, ya que nos muestran tanto la forma gráfica como numérica de la

información, por lo que se consideran dos de las herramientas de mejor aprovechamiento en la búsqueda de causas raíz en sus etapas tempranas.

3.6.3 Caso 3: Comparativa herramientas categoría “Recolectar resultados y presentar información”

Dentro de esta categoría fue necesario agregar un par de herramientas a comparar y eliminar de la lista otras tantas, ya que tanto los datos obtenidos como las herramientas eliminadas, no empataban en características de aplicación. En este caso, se pudieron aplicar 2 de las herramientas que propone la metodología de Shainin.

En la aplicación del B vs C, se constata que los niveles propuestos, arrojaron resultados de mayor aceptación, ya que al mostrar un “no traslape” de resultados, se concluye que se obtuvo mejores índices de eficiencia en el proceso que con los actuales. En el caso de la búsqueda de variables y el ANOVA, aun siendo herramientas más utilizadas y de mayor exigencia, en este caso, después de obtener los resultados finales, se consideró que el B vs C, fue superior en uso y comunicación que los anteriores mencionados, por lo que se sugiere su uso, sobre todo en la comunicación de mejoras al equipo de piso, esto por ser más simple y claro.

CAPITULO 4: Resultados y discusión

4.1 Resultados

Se describieron y compararon herramientas que pueden auxiliar desde distintas trincheras a la disminución de variabilidad en un proceso. Se resalta principalmente que la hipótesis propuesta al inicio del manuscrito se cumple, dado que las herramientas propuestas, utilizadas en la metodología Red X mostraron, con base en la experiencia adquirida en la utilización de diversas herramientas de calidad y estadísticas ser superiores tanto en la aplicación, como el uso y comunicación de las mismas.

A continuación, se muestran las tablas de las herramientas que pudieron ser finalmente comparadas dentro de las categorías citadas.

Tabla 4:1 Herramientas comparadas en "Conocimiento del proceso". Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Conocimiento del proceso	Herramienta	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Criterio					
	Diagrama de variabilidad	4	3	4	3	3
	Diagrama Multi-vari	4	4	5	4	3
	ANOVA anidado	3	4	4	3	3
	Cartas control	4	3	3	4	3

En la Tabla 4:1 se puede observar que el diagrama Multi-vari muestra un mayor beneficio al haber obtenido 20 puntos de los 25 posibles, siendo seguida por el diagrama de variabilidad con 17 puntos, las cartas control con 16 y el ANOVA anidado con 15. En esta tabla, fue eliminado el ANOVA "clásico" ya que como se refiere en el texto, los datos utilizados fueron de orden anidado, por lo cual, los resultados no podrían ser certeros, adicional a lo anterior, sabemos que el ANOVA "clásico" implica que los datos están cruzados y podría haber interacción, caso contrario al ejemplo, donde no se encuentra interacción.

Tabla 4:2 Herramientas comparadas en "Generar / ordenar ideas". Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Generar / ordenar ideas	Herramienta	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Criterio					
	Diagrama de afinidad	3	4	3	2	2
	Diagrama de Ishikawa	2	4	4	3	2
	Diagrama de Pareto	4	5	4	5	3

Diagrama de dispersión	4	5	4	5	3
Hoja de comprobación	5	5	5	4	1

En la Tabla 4:2 se observa que el diagrama de Pareto junto con el de dispersión muestran un mayor beneficio al haber obtenido 21 puntos de los 25 posibles, siendo seguidos por la hoja de comprobación con 20 puntos, el diagrama de Ishikawa con 15 puntos y por último por el diagrama de afinidad con 14 puntos. En esta tabla, se eliminaron las herramientas propuestas directamente por Shainin, ya que requieren información y procedimientos que no son compatibles con la categoría en cuestión. Adicionalmente, se agregó a esta categoría la hoja de comprobación y el diagrama de dispersión que en un inicio se esperaba fueran utilizados en otra categoría, pero, al desarrollarlo, fue más factible su uso junto al diagrama de Pareto.

Tabla 4:3 Herramientas comparadas en "Recolectar resultados y presentar información". Fuente: Autor.

Categoría		Grado de cumplimiento				
Recolectar resultados y presentar información	Herramienta	Facilidad de aplicación	Facilidad de lectura /comunicación	Facilidad de uso	Detección de causa raíz	Estabilidad de solución
	Criterio					
	B vs C	5	4	5	3	4
	Búsqueda de variables	4	4	4	4	4
	ANOVA	3	4	3	4	4

En la Tabla 4:3 se observa cómo las 3 que se utilizaron utilizadas tienen calificaciones altas, esto debido a que las 3 en sus diferentes aproximaciones, logran el objetivo de recolectar información y presentarla de forma clara. Por su parte, el B vs C, es el más básico por llamarlo de alguna manera, ya que presenta de forma simple si la mejora propuesta en realidad ofrece mejores resultados, por lo cual obtuvo 21 de los 25 puntos disponibles. Por su parte la búsqueda de variables, otra herramienta de Shainin, nos presenta de forma contundente la diferencia generada entre el nivel propuesto de variable y el actual, sin embargo, se queda por debajo de B vs C porque esta herramienta nos plantea un experimento donde se utiliza solo 1 variable a diferente nivel, dejando los restantes a un nivel diferente cada vez, de tal forma que no es posible separar potenciales interacciones entre los factores, por lo que se queda por debajo con 20 puntos. Por último, en el caso del ANOVA, este obtiene 18 puntos, ya que para la utilización del programa que se consideró más adecuado (Design-Expert 7), es necesario mayor conocimiento tanto del software como del proceso.

Como resultado final, se resalta que los objetivos del presente, tanto general como específicos, se cumplieron, ya que aun que no fue posible la aplicación de todas las

herramientas que se encontraron y describieron, o la aplicación de las mismas en las categorías a las que inicialmente pertenecían, las comparativas realizadas, sin duda, podrán mostrar un camino a seguir a los tomadores de decisiones y experimentadores dentro de las empresas que así lo requieran.

4.2 Discusión

La complementación es una estrategia básica al momento de emplear herramientas que ayudan a mejorar continuamente los procesos de manufactura. Las búsquedas de causantes de variabilidad en los procesos de manufactura se han investigado y reducidos paulatinamente con el desarrollo de herramientas y metodologías a lo ancho del mundo y lo largo de la historia. Este manuscrito, resalta tanto metodologías como herramientas que son consideradas básicas, específicas y poco conocidas en algunos casos, dando una mayor importancia al entendimiento, aplicación y comparación de herramientas utilizadas dentro de la metodología Red X de Dorian Shainin, puesto que pueden ser consideradas como herramientas de fácil y rápida aplicación.

Es justo decir, que uno de los enfoques principales en el desarrollo de este manuscrito son las PYMES (las cuales ofrecen 7 de cada 10 empleos formales en México), ya que, al ser empresas en crecimiento, pueden verse limitadas en recursos (financieros, experiencia, tiempo para mejora, personal, conocimiento, etc.), por lo que consideramos que utilizar un conjunto de herramientas que no necesariamente sean de la misma metodología, podrá ayudar al experimentador o encargado de la toma de decisiones a elegir la opción más conveniente a su proceso.

Es necesario comprender, que las comparaciones entre herramienta y metodologías no siempre son justas debido a los objetivos generales de las mismas no son iguales, por ejemplo, Red X tiene como objetivo general la localización de la o las causas raíz que originan la variabilidad en cualquier parte en el proceso, para tratar de llegar al inconquistable “cero PPM”, el objetivo de Seis Sigma por su parte es la reducción de la variabilidad en la salida de los procesos y el objetivo de Taguchi es reducir la variabilidad hasta llegar a una meta (objetivo) establecida.

La recomendación principal, es la aplicación de Red X tanto como metodología (cuando el proceso ya se encuentra en control), como en el uso individual de herramientas (en cualquier momento). Uno de los puntos más importantes a favor, es la facilidad de uso, la rapidez y la accesibilidad económica con la que puede actuar, debido a que la mayoría de sus herramientas, pueden trabajarse desde “piso”, además la poca experiencia o conocimiento especializado que se requiere para su desarrollo hace que las herramientas de Red X sean la mejor opción, ya que de acuerdo a los resultados mostrados en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se observa que en general, las herramientas de Red X, tienen un mayor grado de cumplimiento en los objetivos propuestos.

Bibliografía

- Badii, M. H., Guillen, A., & Abreu, J. L. (10 de 2010). Representatividad Estadística en las Ciencias Sociales. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 5(1), 170-218.
- Besterfield, D. H. (2009). *Control de calidad* (Octava ed.). México: Pearson Educación.
- Bhote, K. R., & Bhote, A. K. (2000). *World class quality: using desing of experiments to make it happen*. New York: AMACOM.
- Borrór, C. M. (2009). *The Certified Quality Engineer Handbook* (Tercera ed.). Milwaukee, USA.: ASQ Quality Press.
- Brewer, J. L., & Dittman, K. C. (2013). *Methods of it project management*. West Lafayette, Indiana: Purdue University press.
- Carot, A. V. (2004). *Control Estadístico de la Calidad*. México, D.F.: Alfaomega.
- Crosby, P. B. (1987). *La calidad no cuesta. El arte de cerciorarse de la calidad*. México, D.F.: Compañía editorial Continental. S.A. de C.V.
- Dao, H. (2008). Discussion. *Quality engineering*, 20(1), 27-30.
- De Mast, J., Schippers, W. A., Does, R. J., & Van Den Jeuvel , E. R. (2000). Steps and strategies in process improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 16(4), 301-311.
- Díaz Jiménez, L. F. (2005). *Análisis y planeamiento*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Fowlkes, W. Y., & Creveling, C. M. (1995). *Engineering methods for robust product design : using Taguchi methods in technology and product development*. Addidon- Wesley.
- Goh, T. N. (2002). The role of statistical design of experiments in six sigma: perspectives of a practitioner. *Quality Engineering*, 14(4), 659-671.
- González Gaya, C., Domingo Navas, R., & Sebastián Pérez, M. (2013). *Técnicas de mejora de la calidad*. Madrid, España: UNED cuadernos.

- González, L. (23 de 07 de 2014). *Armadoras, fuera del top 10 global*. Obtenido de El Economista: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Armadoras-fuera-del-top-10-global-20140723-0064.html>
- Goodman, J., & Wyld, D. C. (2001). The hunt for the Red X: a case study in the use of Shainin design of experiment (DOE) in an industrial honing operation. *Management Research News*, 24(8/9), 1-17.
- Grima Cintas, P., Marco Almagro, L., & Tort-Martorell Llabrés, X. (2012). *Industrial Statistics with Minitab*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2004). *Control estadístico de calidad y Seis Sigma*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma* (Segunda ed.). México, D.F.: McGraw Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (Tercera ed.). México, D.F.: McGraw-Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma* (Tercera ed.). México: McGraw Hill.
- Gutiérrez, M. (2004). *Administrar para la calidad: conceptos administrativos del control total de calidad*. México, D.F.: Limusa.
- Hernández, G. (08 de 08 de 2017). *Estratificación*. Recuperado el 2019, de Calidad y ADR: <https://aprendiendocalidadyadr.com/estratificacion/>
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2001). *Factory Physics: foundations of manufacturing management*. New York, NY: McGraw-Hill.
- INEGI. (2019). *Directorio estadístico nacional de unidades económicas*. Obtenido de Instituto nacional de estadística y geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>

- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2009). *Herramientas para la Mejora de la Calidad*. Montevideo, Uruguay: UNIT.
- Juran, J. M., & Gryna, F. M. (1993). *Manual de Control de Calidad* (Cuarta ed., Vol. II). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Kam Hoe , Y., Hui Leng, C., Halim, D., & Rudd, C. (Junio de 2013). Multi-response parameters optimisation for energy-efficient injection moulding process via dynamic Shainin DOE method. *Key Engineering Materials*, 554-557, 1669-1682.
- Kanevski, M., & Maignan, M. (2004). *Analysis and modelling of spatial environmental data*. New York: Marcel Dekker.
- Kosina, J. (2015). Shainin Methodology: An Alternative or an Effective Complement to Six Sigma? *Quality Innovation Prosperity*, 19(2), 18-31.
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos: principios estadísticos para el diseño y análisis de investigación* (Segunda ed.). México: Thomson Learning.
- Lechler S.P.A. (2019). *Lechler since 1858*. Obtenido de Los defectos de pintado de carrocerías más comunes y las soluciones para prevenirlos y resolverlos: <http://www.lechler.eu/es/Home/Refinish/Ciclos-especiales-y-defectos-de-pintura/Manual-de-Defectos-de-Pinturas>
- Logan, M. (2010). *Biostatistical design and analysis using R: a practical guide*. Chichester, Reino Unido: Wiley-Blackwell.
- Lozano Torres, R., Hernández Ripalda, M. D., & Jiménez García, J. A. (2019). Gráfico Multivari y ANOVA Anidado: Estudio de Complementariedad. *UTCJ Theorema Revista Científica*(10).
- Medina V., P. D., Cruz T., E. A., & Restrepo, J. H. (2007). Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica*, 1(34), 337-341.

- Medina, P. D., Cruz, E. A., & Restrepo, J. H. (2007). Aplicación del modelo de experimentación Shainin en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica*, 305 - 310.
- Minitab 18. (2017). *Ejemplo de ANOVA completamente anidado*. Recuperado el Octubre de 2018, de Soporte de Minitab 18: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/fully-nested-anova/before-you-start/example/>
- Minitab. (2017). *Diseños de Taguchi*. Recuperado el 24 de 05 de 2018, de Soporte técnico de Minitab 18: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
- Minitab. (2017). *Diseños factoriales y factoriales fraccionados*. Recuperado el 25 de 05 de 2018, de Soporte técnico de Minitab 18 : <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda ed.). México: Limusa.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México, D.F.: McGraw Hill.
- Oakland, J. S. (2003). *Statistical process control*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- Park, S. H. (2003). *Six Sigma for quality and productivity promotion*. Tokio, Japón: Asian Productivity Organization.
- Perez-Wilson, M. (1992). *Multi-Vari Chart & Analysis: A Pre-Experimentation Technique*. Arizona: Advanced Systems Consultants.
- Prashar, A. (2017). Integration of Taguchi and Shainin DOE for Six Sigma improvement: an Indian case. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7), 898-924.

- Sanghvi, P., Devgania, N., Deshpande, G., & Pathak, N. M. (Diciembre de 2017). Review of literature on Shainin Methodology. (IJARSE, Ed.) *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6(4), 90-98.
- Sangüesa Sánchez, M., Mateo Dueñas, R., & Ilzarbe Izquierdo, L. (2006). *Teoría y práctica de la Calidad*. Madrid, España: Paraninfo, S.A.
- Sejzer, R. (24 de 11 de 2016). *Las 7 Nuevas Herramientas de la Calidad*. Recuperado el 2019, de Calidad Total: <http://ctcalidad.blogspot.com/2016/11/las-7-nuevas-herramientas-de-la-calidad.html>
- Shainin, R. D. (1993). Strategies for technical problem solving. *Quality Engineering*, 5(3), págs. 433-448.
- Shainin, R. D. (15 de Marzo de 2008). Multi-Vari Charts. *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, 3.
- Shainin, R. D. (2012). Statistical Engineering: Six Decades of Improved Process and Systems Performance. *Quality Engineering*, 24(2), 171-183.
- Steiner, S. H., MacKay, R. J., & Ramberg, J. S. (2008). An overview of the Shainin System™ for quality improvement. *Quality Engineering*, 20(1), 6-19.
- Steiner, S. H., MacKay, R. J., & Ramberg, J. S. (2008). An overview of the Shainin System™ for quality improvement. *Quality Engineering*, 20(1), 6-19.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Nueva Jersey, E.U.A: John Wiley & Sons, Inc.
- Tanco Rainusso, P. M. (2008). *Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria*. Tesis doctoral, Universidad de Navarra, Pamplona.
- Tanco, M., Viles, E., & Pozueta, L. (2009). Diferentes enfoques del Diseño de Experimentos (DOE). *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 7, 29-37.
- Thomas, A. J., & Antony, J. (2005). A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DOE techniques in an aerospace environment. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 54(8), 658 - 678.

- Tukey, J. W. (Marzo de 1962). The future of data analysis. *Annals of Mathematical Statistics*, 33(1), 1-67.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. United States of America: Addison-Wesley.
- Vilar Barrio, J. F., Gómez Fraile, F., & Tejero Monzon, M. (1998). *Las 7 nuevas herramientas para la mejora de la Calidad*. Madrid, España: Fundación Confemetal.
- Wen-Kuei, C., & Cheng-Feng, H. (2014). Is the Isoplot an Ellipse? A Study on Isoplot for the measurement system analysis. *Quality Engineering*, 26(3), 350 - 358.
- Zinkgraf, S. A. (2006). *Six Sigma: The First 90 Days*. Nueva Jersey, E.U.A: Prentice Hall.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 6:1 Datos utilizados en la comparativa de herramientas de la categoría "Conocimiento del proceso "

Observación	Temperatura	Planta	Operador	Turno	Lote
1	477	1	1	1	1
2	472	1	1	1	2
3	481	1	1	1	3
4	478	1	1	2	1
5	475	1	1	2	2
6	474	1	1	2	3
7	472	1	1	3	1
8	475	1	1	3	2
9	468	1	1	3	3
10	482	1	1	4	1
11	477	1	1	4	2
12	474	1	1	4	3
13	471	1	2	1	1
14	474	1	2	1	2
15	470	1	2	1	3
16	479	1	2	2	1
17	482	1	2	2	2
18	477	1	2	2	3
19	470	1	2	3	1
20	477	1	2	3	2
21	483	1	2	3	3
22	480	1	2	4	1
23	473	1	2	4	2
24	478	1	2	4	3
25	475	1	3	1	1
26	472	1	3	1	2
27	470	1	3	1	3
28	460	1	3	2	1
29	469	1	3	2	2
30	472	1	3	2	3
31	477	1	3	3	1
32	483	1	3	3	2
33	475	1	3	3	3
34	476	1	3	4	1
35	480	1	3	4	2

Observación	Temperatura	Planta	Operador	Turno	Lote
36	471	1	3	4	3
37	465	1	4	1	1
38	464	1	4	1	2
39	471	1	4	1	3
40	477	1	4	2	1
41	475	1	4	2	2
42	471	1	4	2	3
43	481	1	4	3	1
44	477	1	4	3	2
45	475	1	4	3	3
46	470	1	4	4	1
47	475	1	4	4	2
48	474	1	4	4	3
49	484	2	1	1	1
50	477	2	1	1	2
51	481	2	1	1	3
52	477	2	1	2	1
53	482	2	1	2	2
54	481	2	1	2	3
55	479	2	1	3	1
56	477	2	1	3	2
57	482	2	1	3	3
58	477	2	1	4	1
59	470	2	1	4	2
60	479	2	1	4	3
61	472	2	2	1	1
62	475	2	2	1	2
63	475	2	2	1	3
64	472	2	2	2	1
65	475	2	2	2	2
66	470	2	2	2	3
67	472	2	2	3	1
68	477	2	2	3	2
69	475	2	2	3	3
70	482	2	2	4	1
71	477	2	2	4	2
72	483	2	2	4	3
73	485	2	3	1	1
74	481	2	3	1	2
75	477	2	3	1	3
76	482	2	3	2	1
77	483	2	3	2	2

Observación	Temperatura	Planta	Operador	Turno	Lote
78	485	2	3	2	3
79	477	2	3	3	1
80	476	2	3	3	2
81	481	2	3	3	3
82	479	2	3	4	1
83	476	2	3	4	2
84	485	2	3	4	3
85	477	2	4	1	1
86	475	2	4	1	2
87	476	2	4	1	3
88	476	2	4	2	1
89	471	2	4	2	2
90	472	2	4	2	3
91	475	2	4	3	1
92	475	2	4	3	2
93	472	2	4	3	3
94	481	2	4	4	1
95	470	2	4	4	2
96	472	2	4	4	3
97	475	3	1	1	1
98	470	3	1	1	2
99	469	3	1	1	3
100	477	3	1	2	1
101	471	3	1	2	2
102	474	3	1	2	3
103	469	3	1	3	1
104	473	3	1	3	2
105	468	3	1	3	3
106	477	3	1	4	1
107	475	3	1	4	2
108	473	3	1	4	3
109	470	3	2	1	1
110	466	3	2	1	2
111	468	3	2	1	3
112	471	3	2	2	1
113	473	3	2	2	2
114	476	3	2	2	3
115	478	3	2	3	1
116	480	3	2	3	2
117	474	3	2	3	3
118	477	3	2	4	1
119	471	3	2	4	2

Observación	Temperatura	Planta	Operador	Turno	Lote
120	469	3	2	4	3
121	466	3	3	1	1
122	465	3	3	1	2
123	471	3	3	1	3
124	473	3	3	2	1
125	475	3	3	2	2
126	478	3	3	2	3
127	471	3	3	3	1
128	469	3	3	3	2
129	471	3	3	3	3
130	475	3	3	4	1
131	477	3	3	4	2
132	472	3	3	4	3
133	469	3	4	1	1
134	471	3	4	1	2
135	468	3	4	1	3
136	473	3	4	2	1
137	475	3	4	2	2
138	473	3	4	2	3
139	477	3	4	3	1
140	470	3	4	3	2
141	469	3	4	3	3
142	463	3	4	4	1
143	471	3	4	4	2
144	469	3	4	4	3
145	484	4	1	1	1
146	477	4	1	1	2
147	480	4	1	1	3
148	476	4	1	2	1
149	475	4	1	2	2
150	474	4	1	2	3
151	475	4	1	3	1
152	470	4	1	3	2
153	469	4	1	3	3
154	481	4	1	4	1
155	476	4	1	4	2
156	472	4	1	4	3
157	469	4	2	1	1
158	475	4	2	1	2
159	479	4	2	1	3
160	482	4	2	2	1
161	483	4	2	2	2

Observación	Temperatura	Planta	Operador	Turno	Lote
162	479	4	2	2	3
163	477	4	2	3	1
164	479	4	2	3	2
165	475	4	2	3	3
166	472	4	2	4	1
167	476	4	2	4	2
168	479	4	2	4	3
169	470	4	3	1	1
170	481	4	3	1	2
171	481	4	3	1	3
172	475	4	3	2	1
173	470	4	3	2	2
174	475	4	3	2	3
175	469	4	3	3	1
176	477	4	3	3	2
177	482	4	3	3	3
178	485	4	3	4	1
179	479	4	3	4	2
180	474	4	3	4	3
181	469	4	4	1	1
182	473	4	4	1	2
183	475	4	4	1	3
184	477	4	4	2	1
185	473	4	4	2	2
186	471	4	4	2	3
187	470	4	4	3	1
188	468	4	4	3	2
189	474	4	4	3	3
190	483	4	4	4	1
191	477	4	4	4	2
192	476	4	4	4	3

Anexo 2

Tabla 6:2 Observaciones de defectos en pintura

Observación	Oportunidad	Observación	Oportunidad	Observación	Oportunidad
1	L	335	C	669	E
2	M	336	J	670	H
3	M	337	H	671	L
4	N	338	E	672	C
5	M	339	C	673	H
6	C	340	E	674	C
7	F	341	N	675	H
8	N	342	C	676	C
9	C	343	C	677	F
10	M	344	M	678	H
11	G	345	C	679	C
12	M	346	K	680	A
13	I	347	C	681	E
14	M	348	M	682	E
15	C	349	F	683	C
16	L	350	C	684	C
17	L	351	O	685	C
18	I	352	O	686	C
19	L	353	J	687	M
20	O	354	F	688	M
21	E	355	C	689	O
22	C	356	J	690	M
23	E	357	C	691	C
24	E	358	D	692	M
25	E	359	A	693	F
26	O	360	E	694	C
27	C	361	C	695	E
28	A	362	F	696	E
29	E	363	M	697	C
30	C	364	E	698	C
31	C	365	G	699	M
32	A	366	D	700	E
33	H	367	E	701	M
34	L	368	E	702	C
35	N	369	E	703	L
36	M	370	E	704	H

37	E	371	M	705	B
38	B	372	N	706	C
39	M	373	F	707	D
40	C	374	J	708	G
41	O	375	J	709	E
42	A	376	C	710	C
43	B	377	L	711	G
44	N	378	C	712	I
45	C	379	B	713	G
46	H	380	C	714	K
47	F	381	C	715	F
48	M	382	C	716	O
49	M	383	M	717	D
50	I	384	C	718	A
51	N	385	G	719	G
52	E	386	M	720	F
53	D	387	I	721	E
54	B	388	E	722	M
55	I	389	C	723	M
56	F	390	M	724	F
57	C	391	M	725	M
58	H	392	E	726	M
59	C	393	C	727	F
60	H	394	E	728	M
61	C	395	E	729	A
62	M	396	E	730	G
63	O	397	E	731	E
64	D	398	H	732	C
65	D	399	C	733	O
66	F	400	F	734	C
67	C	401	D	735	M
68	F	402	F	736	C
69	N	403	F	737	E
70	C	404	E	738	O
71	M	405	C	739	E
72	C	406	G	740	E
73	B	407	C	741	J
74	C	408	C	742	M
75	A	409	M	743	M
76	C	410	F	744	G
77	I	411	C	745	M
78	O	412	C	746	E
79	M	413	A	747	L

80	M	414	G	748	C
81	G	415	C	749	N
82	C	416	A	750	D
83	E	417	B	751	C
84	B	418	M	752	N
85	F	419	I	753	I
86	L	420	M	754	C
87	D	421	C	755	E
88	F	422	M	756	B
89	C	423	O	757	C
90	C	424	H	758	C
91	E	425	C	759	M
92	M	426	E	760	M
93	L	427	M	761	N
94	D	428	H	762	D
95	M	429	M	763	N
96	O	430	D	764	J
97	C	431	E	765	L
98	M	432	O	766	O
99	C	433	F	767	D
100	E	434	E	768	F
101	G	435	L	769	C
102	E	436	I	770	C
103	O	437	F	771	E
104	N	438	F	772	C
105	F	439	E	773	O
106	M	440	C	774	M
107	M	441	E	775	F
108	B	442	I	776	M
109	O	443	E	777	M
110	M	444	K	778	M
111	M	445	C	779	K
112	F	446	M	780	E
113	M	447	E	781	C
114	D	448	F	782	I
115	A	449	A	783	M
116	E	450	D	784	F
117	E	451	C	785	C
118	C	452	C	786	K
119	E	453	M	787	M
120	C	454	G	788	M
121	E	455	F	789	O
122	J	456	A	790	M

123	C	457	L	791	C
124	J	458	C	792	M
125	C	459	C	793	F
126	E	460	M	794	E
127	E	461	K	795	C
128	M	462	E	796	C
129	O	463	N	797	F
130	J	464	L	798	E
131	M	465	C	799	K
132	E	466	D	800	N
133	K	467	N	801	I
134	E	468	M	802	C
135	M	469	F	803	M
136	E	470	C	804	E
137	M	471	A	805	D
138	F	472	I	806	C
139	C	473	F	807	N
140	M	474	C	808	A
141	C	475	J	809	C
142	M	476	C	810	M
143	F	477	M	811	H
144	M	478	M	812	M
145	E	479	M	813	L
146	C	480	N	814	L
147	N	481	M	815	E
148	F	482	C	816	A
149	M	483	E	817	M
150	E	484	E	818	L
151	C	485	M	819	C
152	M	486	C	820	H
153	C	487	D	821	E
154	I	488	C	822	K
155	C	489	M	823	M
156	N	490	M	824	O
157	N	491	M	825	N
158	M	492	C	826	D
159	E	493	F	827	E
160	E	494	M	828	C
161	I	495	C	829	M
162	F	496	F	830	F
163	E	497	C	831	E
164	C	498	C	832	C
165	F	499	E	833	C

166	F	500	M	834	F
167	E	501	F	835	E
168	M	502	B	836	E
169	F	503	E	837	C
170	J	504	B	838	D
171	C	505	M	839	J
172	I	506	E	840	E
173	H	507	N	841	D
174	C	508	N	842	F
175	E	509	J	843	C
176	M	510	C	844	E
177	B	511	E	845	E
178	A	512	C	846	G
179	M	513	D	847	D
180	C	514	M	848	K
181	L	515	E	849	E
182	F	516	E	850	D
183	M	517	E	851	F
184	J	518	J	852	C
185	H	519	O	853	C
186	E	520	E	854	L
187	L	521	B	855	C
188	E	522	L	856	C
189	H	523	E	857	K
190	F	524	M	858	F
191	O	525	E	859	N
192	E	526	E	860	C
193	C	527	M	861	E
194	F	528	C	862	M
195	E	529	C	863	J
196	G	530	M	864	K
197	F	531	M	865	C
198	J	532	E	866	E
199	C	533	C	867	C
200	E	534	M	868	M
201	C	535	C	869	F
202	D	536	M	870	O
203	J	537	L	871	E
204	A	538	D	872	M
205	E	539	J	873	N
206	E	540	C	874	E
207	F	541	C	875	I
208	N	542	M	876	J

209	C	543	C	877	C
210	C	544	E	878	B
211	A	545	G	879	C
212	M	546	E	880	A
213	H	547	M	881	E
214	H	548	J	882	A
215	E	549	D	883	G
216	A	550	H	884	E
217	F	551	G	885	O
218	E	552	K	886	C
219	E	553	A	887	C
220	G	554	G	888	G
221	M	555	E	889	E
222	C	556	C	890	I
223	C	557	C	891	B
224	C	558	E	892	M
225	H	559	H	893	A
226	G	560	M	894	M
227	F	561	D	895	E
228	C	562	L	896	C
229	M	563	M	897	C
230	M	564	M	898	E
231	E	565	N	899	C
232	N	566	C	900	N
233	E	567	D	901	E
234	C	568	M	902	D
235	E	569	D	903	H
236	E	570	D	904	E
237	C	571	M	905	C
238	B	572	M	906	A
239	F	573	E	907	C
240	B	574	D	908	J
241	F	575	E	909	N
242	F	576	E	910	C
243	L	577	J	911	F
244	B	578	E	912	M
245	C	579	H	913	L
246	M	580	C	914	C
247	C	581	M	915	H
248	M	582	C	916	E
249	E	583	C	917	D
250	G	584	C	918	B
251	E	585	H	919	L

252	E	586	O	920	J
253	F	587	M	921	M
254	F	588	E	922	G
255	E	589	C	923	A
256	L	590	B	924	L
257	F	591	C	925	O
258	E	592	J	926	G
259	E	593	O	927	F
260	E	594	E	928	D
261	E	595	M	929	D
262	I	596	E	930	M
263	N	597	E	931	M
264	E	598	F	932	F
265	F	599	M	933	E
266	C	600	M	934	B
267	D	601	O	935	E
268	E	602	H	936	F
269	C	603	F	937	C
270	E	604	D	938	D
271	L	605	E	939	D
272	C	606	B	940	F
273	C	607	A	941	A
274	C	608	M	942	B
275	E	609	J	943	K
276	C	610	F	944	O
277	M	611	M	945	A
278	D	612	F	946	A
279	N	613	M	947	A
280	B	614	L	948	E
281	A	615	C	949	E
282	E	616	M	950	C
283	C	617	M	951	C
284	M	618	I	952	B
285	D	619	O	953	J
286	C	620	C	954	C
287	I	621	L	955	E
288	J	622	E	956	E
289	C	623	G	957	E
290	C	624	C	958	H
291	F	625	A	959	E
292	E	626	C	960	M
293	C	627	M	961	K
294	F	628	E	962	M

295	F	629	M	963	E
296	E	630	M	964	E
297	E	631	F	965	I
298	C	632	F	966	O
299	E	633	N	967	L
300	C	634	J	968	H
301	F	635	B	969	C
302	F	636	M	970	B
303	A	637	H	971	C
304	J	638	J	972	B
305	E	639	D	973	E
306	A	640	C	974	E
307	F	641	C	975	M
308	E	642	D	976	A
309	M	643	C	977	C
310	M	644	C	978	J
311	L	645	C	979	L
312	N	646	H	980	F
313	H	647	M	981	G
314	B	648	C	982	H
315	F	649	C	983	E
316	M	650	H	984	E
317	A	651	O	985	E
318	C	652	B	986	E
319	O	653	J	987	E
320	M	654	C	988	C
321	F	655	C	989	L
322	A	656	M	990	E
323	E	657	M	991	D
324	F	658	F	992	D
325	L	659	E	993	C
326	E	660	F	994	M
327	E	661	E	995	E
328	E	662	A	996	D
329	I	663	J	997	H
330	I	664	J	998	E
331	E	665	M	999	D
332	C	666	C	1000	E
333	C	667	A		
334	E	668	E		

Anexo 3

