

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por Decreto Presidencial
del 3 de abril de 1981



"APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA, EN LA MEJORA
DEL DESEMPEÑO EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN
VEHÍCULO EN LAS CONDICIONES DE USO DEL MISMO"

ESTUDIO DE CASO

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA DE CALIDAD

Presenta

JORGE ANTONIO MORALES MACEDO

Director: Dr. Primitivo Reyes Aguilar
Lectora: Dra. Odette Lobato Calleros
Lector: Mtro. Gustavo Torres Lozano

DEDICATORIAS

En agradecimiento a Dios Nuestro Señor, por permitirme terminar con buen éxito esta nueva etapa de mi vida académica y profesional, así como, por seguir protegiendo y Bendiciendo a toda mi familia y a mi día tras día. Gracias Señor Dios.

Gracias a mi querida y amada esposa Luisa Fernanda, por ser la mujer ideal que me ha apoyado en todos los instantes de nuestra vida conyugal. Fernanda, sin su inspiración, tenacidad y sobretodo tu inmenso amor, no habría sido posible llevar a buen termino este nuevo reto, este logro, es tuyo y mío como todo lo que hemos hecho juntos, te amo y te amaré siempre.

A mis Hijos Rodrigo Israel, Jérica Ariadna, Laura Elizabeth y Jorge Luis, por que gracias a su paciencia, ayuda y amor filial, me han demostrado que desde nuestro hogar se puede dar todo el apoyo moral que un padre necesita para poder salir avante ante los retos de la vida. Solo quiero decirles Gracias, por su comprensión durante esos fines de semana sin paseos ni mucha diversión, ¡¡lo logramos juntos!!

A mi suegra la Sra. Amalia Aranda Castillo., por su cariño de segunda madre, sus ánimos y aliento para que yo siguiera adelante y terminara con éxito este reto académico.

A mis padres Águeda y Jorge, a mis hermanos Teresa, Elena, Judith, Rosa y Fernando, por ser mi familia paterna, les dedico esta obra, esperando que consigan todos sus anhelos y metas.

INDICE

Introducción

- Antecedentes
- Justificación
- Objetivos
- Alcance y trascendencia
- Planteamiento del problema

Capitulo 1. Introducción a la Metodología Seis Sigma

- 1.1 La métrica de Seis Sigma
- 1.2 Mediciones para Seis Sigma
- 1.3 Cálculo de Sigmas del proceso
- 1.4 Diez pasos de Motorola para la mejora de procesos
- 1.5 Las Fases DMAIC de Seis Sigma

Capitulo 2. Fase de Definición

- 2.1 Propósito
- 2.2 Etapas de la fase de Definición

Capitulo 3. Fase de Medición

- 3.1 Introducción
- 3.2 Etapas de la fase de Medición
- 3.3 Estadística básica para la fase de Medición
- 3.4 Herramientas para la solución de problemas
- 3.5 Análisis de los Sistemas de Medición (R & R)
- 3.6 La Distribución Normal
- 3.7 Capacidad de procesos normales
- 3.8 Capacidad de procesos no normales

Capitulo 4. Fase de Análisis

- 4.1 Introducción
- 4.2 Etapas de la fase de Análisis
- 4.3 Regresión lineal
- 4.4 Cartas Multi Vari
- 4.5 Pruebas de Hipótesis de una población

4.6 Pruebas de Hipótesis de dos poblaciones

4.7 Análisis de Varianza de una vía (ANOVA)

Capitulo 5. Fase de Mejora

5.1 Introducción

5.2 Etapas de la fase de Mejora

5.3 Diseño de experimentos factoriales

5.4 El diseño factorial 2^k

Capitulo 6. Fase de Control

6.1 Introducción

6.2 Etapas de la fase de Control

6.3 Cartas de control

6.4 Dispositivos a Prueba de Error

Capítulo 7. Caso práctico de aplicación de la Metodología Seis Sigma en la Mejora del Desempeño en el Consumo de Combustible de un Vehículo en las condiciones de uso del mismo.

7.1 Antecedentes

7.2 Fase de Definición.- Carta compromiso del Proyecto

7.3 Fase de Medición.- ¿Quién el Cliente? y ¿Cuál es su Voz?

7.4 Fase de Análisis.- Análisis de problemas encontrados

7.5 Fase de Mejora.- Diseño de Experimentos propuesto

7.6 Fase de Control.- Mantenimiento de la Mejora

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

INTRODUCCIÓN

PROLOGO

Este estudio de caso se desarrollo usando como fuente de información las obras de varios autores de reconocido prestigio, así mismo, se uso como base la tesis del Maestro Luís Rosete, a quien le agradezco su inapreciable ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Para la elaboración de este trabajo, se procedió a ir describiendo las diferentes técnicas estadísticas que pueden ser incluidas en las diferentes fases de la Metodología Seis Sigma, se propusieron ejemplos para la completa comprensión de las herramientas y al final se propuso la solución de un caso real mediante el uso de esta metodología.

ANTECEDENTES

En la actualidad, uno de los mayores retos que enfrentan las empresas es el de la fuerte competencia dentro de los mercados tanto a nivel local como a nivel global, como dice Jack Welch: "Esté abierto al cambio. Olvide el pasado."..."Estemos listos para ir más allá."¹

Según Sergio Novelo, "Hace diez años, en México, todavía se veían los **Sistemas de Calidad** como algo que solo se medía con índices estadísticos. Desde entonces, la Calidad ha ido posesionándose donde debe. En todos los niveles sociales, ideológicos y económicos, siendo al día de hoy, ya no solamente un anexo en los procesos y productos, sino también, un complemento de la vida misma."²

Las **organizaciones de manufactura y las instituciones de servicio**, tienen que ser cada vez más eficientes es decir, altamente

¹ Slater, Robert, ¡Mejorar o Ser Vencido!, p 13, México, Editorial Diana, 2003

² Novelo Rosado, Sergio A., La Calidad y La Mejora Continua, p 13, México, Editorial Panorama, 2001

productivas dada la alta competencia en el mercado global. De tal manera que deben forjar una **cadena de valor** que logre satisfacer totalmente las necesidades de sus clientes, con Calidad, en el menor tiempo posible, y a un costo competitivo.

Las **oficinas de diseño del producto**, tienen el reto de innovar, modificar y optimizar en el menor tiempo posible sus diseños, para lanzar nuevos productos rápidamente, aún y cuando los productos sean altamente complejos. **La manufactura** experimenta retos que anteriormente eran inimaginables ya que tiene que producir tanto mayores como menores volúmenes de producción, con mucho menos recursos, de los que antes destinaba para ello. Las **instituciones de servicio**, tienen que reducir al máximo sus tiempos de entrega e **incrementar la creación de valor** de sus operaciones para lograr la **satisfacción total de sus clientes**.

Las organizaciones productivas de bienes y/o servicios llevan a cabo una gran variedad de procesos mediante los cuales van incrementando **la cadena de calor a los ojos del cliente**. En estos procesos la "variación" es un factor que afecta todos y cada uno de dichos procesos, siendo imperativo el controlarla. El concepto de variación establece que no "existen dos artículos que sean perfectamente iguales", la variación es un fenómeno de la naturaleza y un hecho en el entorno de cualquier tipo de organización, por ejemplo el rendimiento de combustible entre un vehículo y otro de las "mismas" características y capacidades; el diámetro de un cilindro de un monoblock de un motor varía de una medida a otra en el mismo motor, el contenido del líquido de refresco varía de una botella a otra y el tiempo requerido para asignar un asiento en el mostrador de registro de una línea aérea varía de un pasajero a otro. Si ignoramos la existencia de la variación (o si suponemos que ésta es pequeña), se pueden llegar tomar decisiones incorrectas sobre

problemas importantes, lo cual impactaría en la calidad de los productos incidiendo esto en la satisfacción de los clientes finales.

A lo largo del devenir del tiempo, las técnicas para mejorar la calidad han ido evolucionando paulatinamente; en un principio la calidad se detectaba y "controlaba", mediante **inspecciones finales de los productos** (siglo XIX), aquellos productos que estaban dentro del rango de especificaciones eran aceptados, los que no, se rechazaban, teniendo que ser reprocesados o desechados (scrap).³

Este sistema de "controlar" la calidad, tiene varios inconvenientes: el primero, es tener que estar reprocesando una gran cantidad de artículos defectuosos, el segundo, es el tener que "tirar" piezas ya producidas, el tercero es que a pesar de la inspección por muy rigurosa que sea, llega a permitir que productos en mal estado lleguen a las manos del consumidor final debido a que la inspección final de manera visual no es confiable y por último y no por esto menos grave, el incrementar de forma alarmante el Normal Operating Cost⁴ al añadir operaciones que no agregan valor al producto. En todos estos casos la probabilidad de incurrir en **costos de calidad**⁵ y de imagen ante el cliente es muy alta.

Para eliminar pérdidas económicas que generaban los desperdicios y buscando mejorar la calidad de los productos y servicios han surgido una serie de nuevas ideas y metodologías.

Durante la Segunda Guerra Mundial Walter Shewhart y Dodge Romig en la Western Electric de la Bell Telephone desarrollaron el **Control Estadístico de Procesos (CEP)**⁶, enfocado al control de los procesos

³Scrap: Desecho por su traducción al idioma español

⁴Normal Operating Cost: Costo normal de producción, por su traducción al español

⁵Campanella, Jack, Principios de los Costes de Calidad, pp 22-38, España. Editorial Díaz de Santos. 2002

⁶Brassard, Michael, Six Sigma Memory Jogger II, pp 77-94, E. U. A. Editorial Goal/QPC. 2002

por medio de la aplicación de métodos estadísticos para la reducción de la variación y en los niveles de inspección.

En la década de los cincuenta surge el **Aseguramiento de la Calidad**, en el Departamento de Defensa de los EUA y Gran Bretaña, aquí, se ve la necesidad de involucrar a todos los departamentos de la planta en el diseño, planeación y ejecución de políticas de calidad.

En la década de los noventa surge la **Administración Estratégica por Calidad Total**, con enfoque al mercado y a la satisfacción de las necesidades del consumidor, reconociendo el efecto estratégico de la calidad en el proceso de competitividad.⁷

En los noventa, Motorola, Inc., de EUA desarrolló una metodología llamada **SIX SIGMA**,⁸ el cual consta de las fases **DMAIC**⁹ por sus siglas en inglés, para la solución de problemas, basándose en la aplicación de técnicas estadísticas (básicas y avanzadas), para reducir la variación de los procesos al máximo posible.

Seis Sigma, ha mejorado las ganancias de las empresas hasta en un 20% año tras año¹⁰, engloba técnicas de Control Estadístico de Procesos, el Despliegue de la función de calidad (QFD), el Análisis del Modo y Efecto de la Falla, Ingeniería de calidad de Taguchi, entre otras; siendo una sólida alternativa para mejorar los procesos y por lo tanto, lograr la satisfacción total de los clientes.

Entre las principales ventajas de esta metodología se encuentran las siguientes: contiene una serie de pasos disciplinados para llevar a cabo la implementación en cualquier tipo de empresa, tanto de manufactura como de operaciones transaccionales, las herramientas que la

⁷ Ishikawa, Kaoru, ¿Qué es el Control Total de la Calidad?, pp 106-110, México, Editorial Norma, 1985

⁸ Six Sigma: es un nombre registrado por Motorola Inc., en E. U. A.

⁹ DMAIC: Define – Measure – Analyze – Improve – Control = Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar

¹⁰ Harry, Mikel, Six Sigma Breakthpugh Management Strategy, pp 1-2, E. U. A, Editorial Currency. 2000

conforman pueden ser utilizadas por usuarios de diferentes áreas del conocimiento y niveles jerárquicos dentro de la organización; representa un desafío para las empresas que lo llevan a cabo ya que la meta es alcanzar un nivel de variación "mínimo".⁹

Se usa el término **SIGMA** es una letra del alfabeto griego (**σ**) para describir el nivel de desempeño de una unidad productiva o un proceso particular, la medida que comúnmente se utiliza es: defectos por unidad. Un nivel de calidad sigma "Alto" significa que los defectos tienen menores posibilidades de ocurrir, mientras que uno nivel de sigma "Bajo", tendrá mayor probabilidad de presentarse. El nivel *Seis Sigma* (**6σ**) significa que se encontrarán únicamente **3.4 defectos por cada millón de unidades producidas** considerando la capacidad de los procesos en el largo plazo.⁹

La Metodología *Seis Sigma* involucra una medida, para determinar el grado en que los diferentes procesos logran sus metas, además ofrece varias estrategias para realizar las mejoras a dichos procesos.

La aplicación de ésta técnica en todas las funciones de la empresa, conlleva a un alto nivel de calidad a bajos costos y con una reducción en los tiempos ciclo de las operaciones que agregan valor; resultando con todo esto, alta rentabilidad y ventaja competitiva del negocio.

Es importante que la administración se enfoque en los problemas que están ocultos, por ejemplo: las horas extra para corregir errores, errores en documentación, la pérdida de oportunidad de producción, imagen ante el cliente, exceso de inventario y no solamente en los que saltan a la vista, como: los re-procesos, rechazos, reclamaciones por parte de los clientes. Es importante tener un plan perfectamente definido para alcanzar el éxito al implementar proyectos de mejora.

Seis Sigma es una "**estrategia de negocios**", implantada por General Electric (GE), Sony, y Allied Signal, con la cual, han obteniendo grandes beneficios, tanto estratégicos, como económicos.

Seis Sigma se caracteriza por la continua y disciplinada aplicación de una estrategia de "proyecto por proyecto" tal como lo recomienda Joseph Juran en su trilogía de la calidad, los proyectos son seleccionados mediante estrategias clave de negocios, lo cual conduce a recuperar la inversión realizada y obtener mayores márgenes de utilidad. La gente que lidera los proyectos de *Seis Sigma* son comúnmente llamados: *Black Belts* y *Green Belts*¹¹.

Usar *Seis Sigma* en piso implica "**Cambiar la cultura de la organización**", ya que se fomenta el trabajo en equipo para la solución de problemas, se mejora la comunicación, aumenta el grado de confianza y seguridad en los individuos para realizar el trabajo, de esta manera se rompe la resistencia al cambio para poder ser más ambiciosos y alcanzar así, metas cada vez más desafiantes.

Como ejemplos de los beneficios que han obtenido algunas empresas que han utilizado la Metodología *Seis Sigma* tenemos los siguientes:

- En la división de Sistemas Médicos de GE, la implementación de la metodología, provocó que se incrementara diez veces la vida de un scanner (lector) de rayos-X, aumentando el grado de confiabilidad y rentabilidad del equipo, así como el nivel de atención a los pacientes.
- En plásticos GE después de un riguroso esfuerzo del equipo de trabajo, obtuvo trescientos millones de libras en capacidad (peso), equivalente a una nueva planta, se ahorraron \$400 millones de dólares tan solo en inversión.

¹¹ Black Belt y Green Belt son nombres registrados por Motorola Inc., en E. U. A.

- *Lockheed Martin*, usaba doscientas horas de trabajo tratando de fabricar una parte para que el tren de aterrizaje de un jet ajustará correctamente. El personal aportó grandes ideas durante mucho tiempo, sin embargo el problema no se solucionaba. Con el uso de esta técnica, se detectó que la parte se desviaba por una milésima de pulgada. Ahora que se ha corregido el problema la compañía ahorra \$14,000 dólares por cada jet fabricado.

JUSTIFICACION

La Metodología Seis Sigma es una herramienta disciplinada que sirve para mejorar la calidad de los procesos, productos y servicios, dando mayor rentabilidad y crecimiento al negocio. Esta metodología puede ser usada en todas las áreas que componen la organización y no solamente a un departamento específico como el de calidad. La bibliografía es demasiado compleja y el lenguaje en algunos casos resulta difícil de entender, por los términos y conceptos de estadística que se usan. Por lo anteriormente expuesto, este trabajo mostrará la aplicación de la metodología en un proyecto de mejora real.

OBJETIVOS

Objetivo general:

El objetivo general de este Caso de Estudio es el de mostrar un caso práctico de aplicación de la *METODOLOGÍA SEIS SIGMA* que evidencie en forma clara y concisa los pasos a seguir para la solución de un problema real planteado; servirá como una guía que facilite la comprensión de aplicación de los diferentes métodos y herramientas estadísticas para la mejora de la calidad al lector de este trabajo.

Objetivos específicos:

- Mostrar como se pueden utilizar paquetes estadísticos para reducir el tiempo de desarrollo de los proyectos.
- Se pretende que este trabajo sea una guía, tanto para la capacitación como para la consulta, de aquellos que implementen proyectos de mejora bajo la Metodología Seis *Sigma*.
- Lograr que las empresas cambien su "mind set"¹² y así logren adoptar esta herramienta para el manejo de problemas, de forma cotidiana.
- Incentivar en el ambiente industrial mexicano el deseo de la mejora continua expandiendo así sus fronteras comerciales a nivel mundial.¹³

ALCANCE Y TRASCENDENCIA

Este Caso de Estudio servirá como base de consulta a aquellas personas que tienen la responsabilidad de resolver problemas de calidad y realizar proyectos de mejora, basándose en la Metodología Seis *Sigma*, logrando con esto la mejora de los procesos de producción de bienes y servicios, sin embargo, en estricta teoría no es un proyecto de Seis Sigma, ya que, aunque está enfocado a garantizar la satisfacción del cliente (reducción del gasto de combustible y por ende ahorro de recursos económicos del mismo), además de que está alineado a la estrategia de negocio (posicionamiento de la empresa automotriz como una de las empresas preocupadas por la reducción de las emisiones contaminantes al aire), no está dirigido a un proceso clave del negocio

¹² Mind set: Fijación en la mente por su traducción al español

¹³ Enríquez Cabot, Juan. El Reto de México: Tecnología y Fronteras en el Siglo XXI, pp 25-28, México, Editorial Planeta, 2000

(proceso productivo). Por está última razón, nuestro proyecto no es un proyecto completo de Seis Sigma.

Aún y cuando nos es un proyecto total de Seis Sigma, será posible que aquellas personas de otras disciplinas del saber, o con poca instrucción académica (secundaria o preparatoria) puedan familiarizarse con la aplicación de los métodos estadísticos avanzados, para mejorar de la calidad de cualquiera de los procesos de negocio en cualquier empresa, aumentando con esto, los niveles de rentabilidad y crecimiento de sus negocios, ya que el uso de la Metodología Seis Sigma, tiene un impacto altamente positivo en la reducción de los costes de calidad para la sociedad en su conjunto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al igual que ayer, hoy se requiere que el aprovechamiento de los recursos naturales sea el máximo posible, **el agua** es uno de estos recursos que siempre es y será vigilado, debido a la trascendencia que tiene para la supervivencia humana. Otro recurso natural que por su escasez y su muy lenta renovación (miles o hasta millones de años), proveniente de residuos fósiles es **EL PETROLEO**, del cual se deriva uno de los combustibles más usados para el transporte motorizado, el cual es: **LA GASOLINA.**¹⁴

El lograr el óptimo aprovechamiento de este combustible –cada vez más escaso–, es el fundamento del presente Caso de Estudio. El incremento en el desempeño –en millas por galón–, de los vehículos que usan este hidrocarburo es el objetivo de este trabajo.

¹⁴ Gasolina, <http://tq.educ.ar/tq03028/html/naftas.htm> Fecha de consulta 16 marzo 2007, 9:00hrs.

Las compañías automotrices, tienen varios segmentos a los cuales destinan sus esfuerzos de producción, estos son:

- a) Autos sub compactos
- b) Autos compactos
- c) Autos familiares
- d) Autos deportivos
- e) Autos de lujo y
- f) Autos de súper lujo

El presente caso de estudio se enfocará en el segmento de Autos de lujo, dentro de los cuales se encuentran aquellos que ocupan motores V-8, con capacidad volumétrica de 4.2 Litros; esto es, son vehículos con una fuerte inclinación al consumo de combustible, siendo aquí, donde el equipo de trabajo dedicará sus esfuerzos de reducción de los índices de consumo de combustible por milla recorrida.¹⁵

El uso de la Estadística para el mejoramiento de la calidad –en este caso el rendimiento de combustible–, en la mayoría de los casos no ha sido difundido a todas las áreas de las empresas, principalmente por que no se conocen los beneficios que se pueden obtener, en el manejo y análisis de información y debido a que existe una cantidad de deducciones y fórmulas matemáticas, que solo son conocidas por aquellas personas que son especialistas en la materia.

La mayoría de los ingenieros se han enfocado en aspectos meramente técnicos, dejando a un lado las técnicas de medición y análisis de información proporcionados por la Estadística, siendo que en la

¹⁵ Optimización de las condiciones de rendimiento en el motor
<http://motor.terra.es/motor/articulo/html/mot25961.htm> fecha de consulta 18 de marzo 2007 18:12 hrs.

mayoría de las veces los problemas pueden ser resueltos mediante la ayuda de dichas técnicas.

Para lograr la adecuada implementación de *Seis Sigma* se propone que este trabajo sea una guía que describa paso a paso la aplicación de la metodología Seis Sigma en el mejoramiento de la calidad de los procesos para la elaboración de los productos y/o servicios. Es importante que la implantación de *Seis Sigma* sea realizada por personas que posean liderazgo y adecuado conocimiento del tema, generalmente estas personas son denominados Black Belts o Green Belts, que son además los que pueden conducir equipos de trabajo y llevar a cabo la administración de los proyectos de mejora.

HIPÓTESIS

Con el propósito de dar respuesta al problema y a los objetivos de investigación planteados en el presente estudio, se formula la siguiente hipótesis:

La optimización de los parámetros de manejo (velocidad), el grado de mantenimiento del vehículo (presión de aire en las ruedas) así como el tipo de combustible usado (nivel de octanaje) dará como resultado la optimización en el consumo de combustible en el vehículo a gasolina seleccionado.

Por ende habrá una reducción en los gastos de combustible al usar el vehículo, esto redundará en un ahorro de para el cliente final (enfoco al cliente)

Este proceso de optimización, está alineado a la Estrategia del Negocio, ya que posicionará a la ensambladora en un lugar preponderante, en lo que a

Las conclusiones y comentarios a cerca de la hipótesis planteada, serán presentadas en el capítulo 7 de este Estudio de Caso, donde se dará fin a este trabajo.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA *SEIS SIGMA*

En este capítulo se tratará sobre la métrica de Seis Sigma, la forma de obtener y revisar las mediciones de un proyecto, el cálculo de la habilidad de un proceso mediante sigmas (habilidad para hacer bien el proceso), se tratarán los pasos de Motorola para la mejora de los procesos y por último se mencionaran las fases de la metodología.

1.1 La métrica de *Seis Sigma*

El nivel sigma, es utilizado comúnmente como medida dentro de la Técnica *Seis Sigma*, incluyendo los cambios o movimientos “típicos” de $\pm 1.5\sigma$ de la media (concepto que será explicado más adelante). Las relaciones de los diferentes niveles de calidad sigma no son lineales, ya que para pasar de un nivel de calidad a otro, el porcentaje de mejora del nivel de calidad que se tiene que realizar no es el mismo, cuando avanzamos a un nivel mayor el porcentaje de mejora será más grande.

La tabla 1.1, muestra el factor de mejora requerido para cambiar de un nivel sigma a otro de mayor nivel.

Tabla 1.1 Factores de Mejora

| Nivel actual | Cambio | Factor de mejora requerido |
|--------------|-----------|----------------------------|
| 3σ | 4σ | 10x |
| 4σ | 5σ | 30x |
| 5σ | 6σ | 40x |

Realizando un comparativo del nivel de calidad sigma de varias empresas se determinó que el promedio de éstas se encuentra en el nivel 4σ , Las empresas con nivel 6σ son denominadas de “Clase

Mundial". El objetivo de la implementación *Seis Sigma* es precisamente convertirse en una empresa de Clase Mundial.

En la figura 1.1, se muestra el concepto básico de la métrica de *Seis Sigma*, en donde las partes deben de ser manufacturadas consistentemente y estar dentro del rango de especificaciones. La figura muestra los parámetros de los niveles tres y seis sigma.

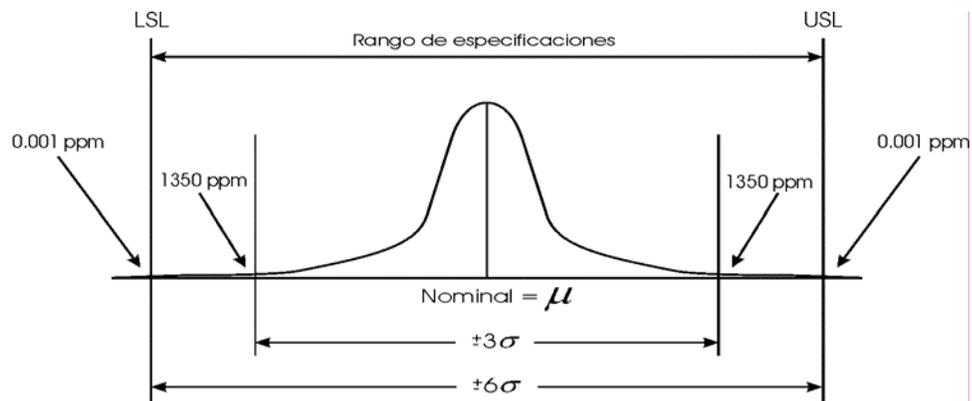
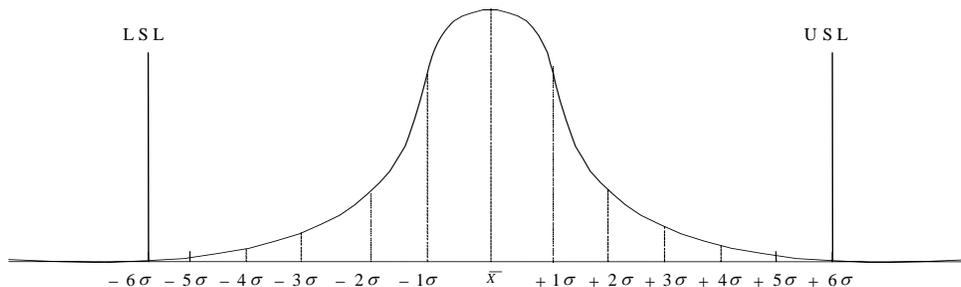


Figura 1.1. Se indica el número de partes por millón (ppm) que estarán fuera de los límites de especificación usando como límite el valor de cada desviación estándar.¹⁶



| Límite de especificación | Porcentaje | Defectos ppm |
|--------------------------|------------|--------------|
| $\pm 1\sigma$ | 68.27 | 317,300 |
| $\pm 2\sigma$ | 95.45 | 45,500 |
| $\pm 3\sigma$ | 99.73 | 2,700 |
| $\pm 4\sigma$ | 99.9937 | 63 |
| $\pm 5\sigma$ | 99.999943 | 0.57 |
| $\pm 6\sigma$ | 99.9999998 | 0.002 |

Figura 1.2. Distribución normal centrada.

¹⁶ Forrest W. Breyfogle III, Implementing Six Sigma, p 9 USA John Wiley & Sons Inc., 2001

En la Figura 1.2, muestra una distribución normal centrada dentro de los *límites de especificación*, se tendrá solo una porción de 0.002 ppm.

La variación a lo largo del tiempo en el centrado del proceso provoca que la media de la distribución tenga un desplazamiento $\pm 1.5\sigma$ para Motorola, (esto no aplica para todas las empresas), ver la Figura 1.3.

Esto proporciona una idea real de la capacidad del proceso a través de varios ciclos de manufactura en el tiempo, el desplazamiento puede ser en dirección positiva o negativa, pero nunca en ambas direcciones¹⁷

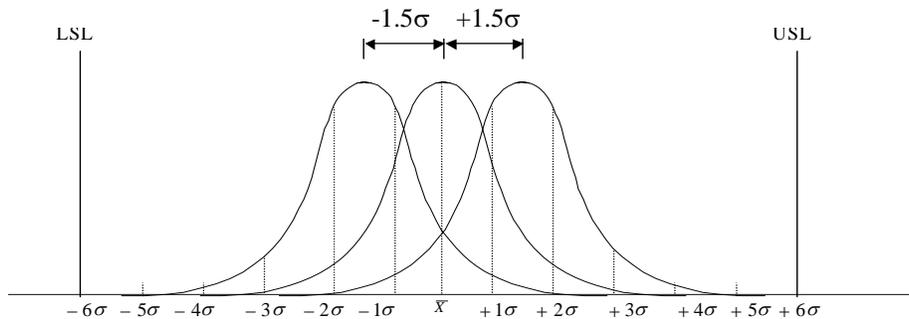


Figura 1.3 Distribución normal descentrada 1.5σ

En la Tabla 1.2, se muestra una medida que describe el grado en el cual el proceso cumple con los requerimientos es la **Capacidad del Proceso**. Los índices utilizados son C_p y C_{pk} .

Un nivel *Seis Sigma* tiene la habilidad de lograr índices de 2.0 y 1.5 respectivamente. Para lograr esta capacidad la meta a alcanzar es, el producir al menos 99.99966% piezas o productos con calidad, no más de 3.4 defectos en un millón de piezas o productos producidos en el largo plazo.

¹⁷ Juran, J. M. Análisis y planeación de la calidad. Mc. Graw Hill, 1995 pp. 397

| Límite de especificación | Porcentaje | Defectos ppm |
|--------------------------|------------|--------------|
| $\pm 1\sigma$ | 30.23 | 697,700 |
| $\pm 2\sigma$ | 69.13 | 308,700 |
| $\pm 3\sigma$ | 93.32 | 66,810 |
| $\pm 4\sigma$ | 99.379 | 6,210 |
| $\pm 5\sigma$ | 99.9767 | 233 |
| $\pm 6\sigma$ | 99.99966 | 3.4 |

Tabla 1.2 Porcentajes y cantidad de defectos a los que corresponden los diferentes niveles "Sigma"

1.2 Mediciones para *Seis Sigma*

La mejora de las métricas tiene un impacto muy significativo en los resultados del negocio, al reducir la oportunidad de tener defectos. Es de suma importancia medir la capacidad del proceso en términos cuantificables y monitorear las mejoras a través del tiempo.

La letra griega Sigma (σ), representa la desviación estándar poblacional de un proceso de manufactura o de servicio, siendo la dispersión de cada uno de los datos poblacionales alrededor de la media poblacional.

Seis Sigma *es una metodología*, enfocada a la mejora de los procesos, reduciendo primeramente su variación y después, manteniéndolos en el valor objetivo o lo más cerca posible de él.

Definiciones básicas¹⁸:

- Unidad (U): Es un lote de artículos producidos o procesados, que esta sujeto a una auditoria de calidad.
- Defecto (D): Cualquier evento que no cumpla la especificación de una CTQ (la cual es definida por el cliente).
- Defectuoso: Es una unidad producida que tiene uno o más defectos.

¹⁸ Forrest W. Breyfogle III. Implementing Six Sigma, p11, U S A, Ed. John Wiley & Sons, Inc., p11, 1999

- Defectos por unidad (DPU): Es la cantidad de defectos en un producto, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$DPU = \frac{D}{U} \quad (1.1)$$

- Oportunidad de defectos (O): Es cualquier atributo o especificación que pueda apreciarse o medirse y que ofrezca una *oportunidad* de no satisfacer un requisito del cliente (CTQ).

- Defectos por oportunidad (DPO):

$$DPO = \frac{D}{U \times O} \quad (1.2)$$

- Defectos por millón de oportunidades (DPMO's): Es el número de defectos encontrados en un lote de inspección, afectado por el número de oportunidades para ofrecer un defecto, en un millón de unidades.

$$DPMO's = \frac{D}{U \times O} \times 1000000 \quad (1.3)$$

- Capacidad del proceso: Es el nivel de actuación de un proceso para cumplir especificaciones o requerimientos del cliente.
- Rendimiento estándar o de primera pasada Y_{FT} : Es el porcentaje de producto y / o servicios, sin defectos.
- Rendimiento al final o de última pasada: Y_{LT} : Es el porcentaje de producto sin defectos después de realizar la revisión del trabajo.

1.3 Cálculo de los Sigmas del proceso.

Ejemplo 1.1

En la tabla 1.2, se muestra un proceso de manufactura de mesas tiene cuatro subprocesos: fabricación de patas, bastidor, cubierta y pintura. Se toman los datos de 1510 mesas fabricadas y se observa la siguiente información. Calcule el Sigma del proceso.

| Subproceso | Defectos | Oportunidades/ Unidad |
|------------|----------|-----------------------|
| Patas | 212 | 17 |
| Bastidor | 545 | 5 |
| Cubierta | 71 | 9 |
| Pintura | 54 | 1 |
| Totales: | 882 | 32 |

Tabla 1.3 Proceso de manufactura

Número de unidades procesadas = 1510

Número total de defectos = 882

$$\text{Defectos por oportunidad (DPO)} = \frac{D}{N \times O} = \frac{882}{1510 \times 32} = 0.0182$$

$$\text{DPMO} = 0.0182 \times 1,000,000 = 18,253$$

De la tabla de conversión de sigma determinamos el valor que más se acerque a 18,253 siendo este: **sigma (σ) = 3.6**

Rendimiento de primera pasada (Y_{FT}) y última pasada (Y_{LP})

El número de defectos puede medirse antes o después de que se detecten o corrijan éstos. Los resultados se miden en porcentaje (%) y el número de efectos en defectos por oportunidad (DPO) o defectos por millón de oportunidades (DPMO's). Observemos la figura 1.4:

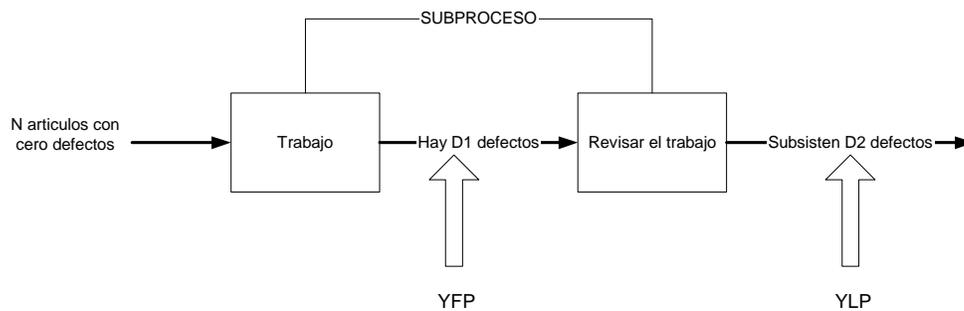


Figura 1.4 Subproceso de producción

Aquí se puede observar la entrada de N artículos con cero defectos, se realiza un trabajo donde hay D_1 defectos, este es el rendimiento a la primera (Y_{FP}), después se revisa el trabajo y al final subsisten D_2 defectos, siendo este el rendimiento en la inspección final (Y_{LP}).

Ejemplo 1.2

Una planta de productos empaqueta en una de sus líneas un cierto artículo. La producción en un turno es de 5,000 unidades. Existen 3 oportunidades de defecto en cada unidad:

- Mal sellado del empaque
- Producto maltratado
- Empaque roto

Se encontraron 64 defectos, de los cuales 14 se encontraron antes de ser enviados a la línea de empaque final, después de esto, 50 defectos todavía subsisten. Se pide calcular Y_{FP} y Y_{LP} .

Rendimiento a la primera Y_{FP}

$$DPO = \frac{64}{5000 \times 3} = 0.0042$$

$$DPMO's = 0.0042 \times 1,000,000 = 4,266.66$$

$$Y_{FP} = 1 - 0.0042 = 0.9958 = 99.58\%$$

Rendimiento en la inspección final Y_{LP}

$$DPO = \frac{50}{5000 \times 3} = 0.0033$$

$$DPMO = 3,333.33$$

$$Y_{LP} = 1 - 0.0033 = 0.9967 = 99.67\%$$

Observamos que el rendimiento en la inspección final es mayor que el rendimiento a la primera.

Rendimiento real o estándar (Y_{RT})

Con esta herramienta se mide la probabilidad de pasar por todos los subprocessos sin un defecto, se determina con el producto del resultado de cada uno de los pasos del proceso:

$$Y_{FP_1} \times Y_{FP_2} \times Y_{FP_3} \times \dots \times Y_{FP_n}$$

Es un rendimiento sensible a pasos y defectos en los pasos.

Ejemplo 1.3

Un proceso con cinco subprocesos tienen los siguientes rendimientos de salida (throughput por su denominación en inglés): 0.98, 0.93, 0.95, 0.98 y 0.94. El Rendimiento Estándar $Y_{RT} = 0.98 \times 0.93 \times 0.95 \times 0.98 \times 0.94 = 0.7976$, es la probabilidad de que el producto pase sin error.

Rendimiento Normal (Y_N)

Es el promedio **exponencial** basado en el número de pasos del proceso, no es un promedio aritmético.

$Y_N = \sqrt[n]{Y_{RT}}$, donde n es igual al número de pasos en el proceso.

Ejemplo 1.4

En un proceso con 3 pasos tenemos los siguientes Y_{FT} :

Paso 1: 80%

Paso 2: 70%

Paso 3: 90%

Calcular Y_N

Primero calculamos $Y_{RT} = 0.504$

$$Y_N = \sqrt[n]{Y_{RT}} = \sqrt[3]{0.504} = 79.6\%$$

Variación a largo plazo vs. Variación a corto plazo (Z_{shift})

Largo plazo: son los datos tomados durante un periodo de tiempo suficientemente largo y en condiciones suficientemente diversas para que sea probable que el proceso haya experimentado todos los cambios y otras causas especiales.

Corto plazo: son datos tomados durante un periodo de tiempo suficientemente corto para que sea improbable que haya cambios y otras causas especiales.

Para el cálculo de datos a largo plazo a partir de datos a corto plazo restamos 1.5σ 's, debido a los desplazamientos que sufre la media provocados por el cambio natural en los procesos.

$$Z_{ST} = Z_{LT} + 1.5 \quad \text{Donde: } Z_{ST} = Z \text{ a corto plazo.}$$
$$Z_{Bench} = Z_{YN} + 1.5 \quad Z_{LT} = Z \text{ a largo plazo.}$$

$Y_N = \text{Rendimiento Normal}$

Ejemplo 1.5

Si tenemos un $Y_{RT} = 0.38057$ con 10 operaciones. Determine Y_N y Z_{bench}

$$Y_N = \sqrt[10]{0.38057} = 0.9079$$

$$Z_{bench} = 0.9079 + 1.5 = 2.4079$$

Cálculo de Sigma en Excel

La sigma del proceso que es la sigma a corto plazo Z_{st} se determina:

MÉTODO 1:

1. El rendimiento es igual a $Y_{rt} = 1 - DPU$ o $Y_{rt} = 1 - D / DPO$
2. La Z sigma a largo plazo $Z_{lt} = \text{distr. norm. estand. inv}(Y_{rt})$
3. La Z sigma a corto plazo o Sigma del proceso = $Z_{st} = Z_{lt} + 1.5$

MÉTODO 2:

1. Se determina Z_{lie} y Z_{lse} en base a las especificaciones
2. Se determina la fracción defectiva $P(Z_{lie})$ y $P(Z_{lse})$
3. Con $P(Z_{lie}) = \text{distr. norm. estand. inv}(Z_{lie})$ y $P(Z_{lse}) = \text{distr. norm. estand. inv}(-Z_{lse})$
4. La fracción defectiva total es $P(Z_t) = P(Z_{lie}) + P(Z_{lse})$
5. El rendimiento se determina con $Y_{rt} = 1 - P(Z_t)$
6. La Z sigma a largo plazo $Z_{lt} = \text{distr. norm. estand. inv}(Y_{rt})$
7. La Z sigma a corto plazo o Sigma del proceso = $Z_{st} = Z_{lt} + 1.5$

Cálculo de Sigma con MINITAB

1. La Z sigmas del proceso a largo plazo en base al rendimiento se determina como:

Calc > Probability Distributions > Normal

Seleccionar Inverse Cumulative probability Mean 0.0 Estándar deviation 1.0

Input constant valor de Yrt OK, se obtiene la Z_{lt} de largo plazo.

2. La Z del proceso se determina con $Z_{st} = Z_{lt} + 1.5$

| Sigma | DPMO | YIELD | Sigma | DPMO | YIELD |
|-------|--------|-----------|-------|---------|-------|
| 6 | 3.4 | 99.99966% | 2.9 | 80,757 | 91.9% |
| 5.9 | 5.4 | 99.99946% | 2.8 | 96,801 | 90.3% |
| 5.8 | 8.5 | 99.99915% | 2.7 | 115,070 | 88.5% |
| 5.7 | 13 | 99.99866% | 2.6 | 135,666 | 86.4% |
| 5.6 | 21 | 99.9979% | 2.5 | 158,655 | 84.1% |
| 5.5 | 32 | 99.9968% | 2.4 | 184,060 | 81.6% |
| 5.4 | 48 | 99.9952% | 2.3 | 211,855 | 78.8% |
| 5.3 | 72 | 99.9928% | 2.2 | 241,964 | 75.8% |
| 5.2 | 108 | 99.9892% | 2.1 | 274,253 | 72.6% |
| 5.1 | 159 | 99.984% | 2 | 308,538 | 69.1% |
| 5 | 233 | 99.977% | 1.9 | 344,578 | 65.5% |
| 4.9 | 337 | 99.966% | 1.8 | 382,089 | 61.8% |
| 4.8 | 483 | 99.952% | 1.7 | 420,740 | 57.9% |
| 4.7 | 687 | 99.931% | 1.6 | 460,172 | 54.0% |
| 4.6 | 968 | 99.90% | 1.5 | 500,000 | 50.0% |
| 4.5 | 1,350 | 99.87% | 1.4 | 539,828 | 46.0% |
| 4.4 | 1,866 | 99.81% | 1.3 | 579,260 | 42.1% |
| 4.3 | 2,555 | 99.74% | 1.2 | 617,911 | 38.2% |
| 4.2 | 3,467 | 99.65% | 1.1 | 655,422 | 34.5% |
| 4.1 | 4,661 | 99.53% | 1 | 691,462 | 30.9% |
| 4 | 6,210 | 99.38% | 0.9 | 725,747 | 27.4% |
| 3.9 | 8,198 | 99.18% | 0.8 | 758,036 | 24.2% |
| 3.8 | 10,724 | 98.9% | 0.7 | 788,145 | 21.2% |
| 3.7 | 13,903 | 98.6% | 0.6 | 815,940 | 18.4% |
| 3.6 | 17,864 | 98.2% | 0.5 | 841,345 | 15.9% |
| 3.5 | 22,750 | 97.7% | 0.4 | 864,334 | 13.6% |
| 3.4 | 28,716 | 97.1% | 0.3 | 884,930 | 11.5% |
| 3.3 | 35,930 | 96.4% | 0.2 | 903,199 | 9.7% |
| 3.2 | 44,565 | 95.5% | 0.1 | 919,243 | 8.1% |
| 3.1 | 54,799 | 94.5% | | | |
| 3 | 66,807 | 93.3% | | | |

Tabla 1.4 Conversión de la Capacidad del Proceso en Sigmas

1.4 Diez pasos de Motorola para la mejora de procesos

Motorola sugiere una serie de pasos para mejorar el desempeño de los procesos usando la metodología Seis Sigma, como se muestra:

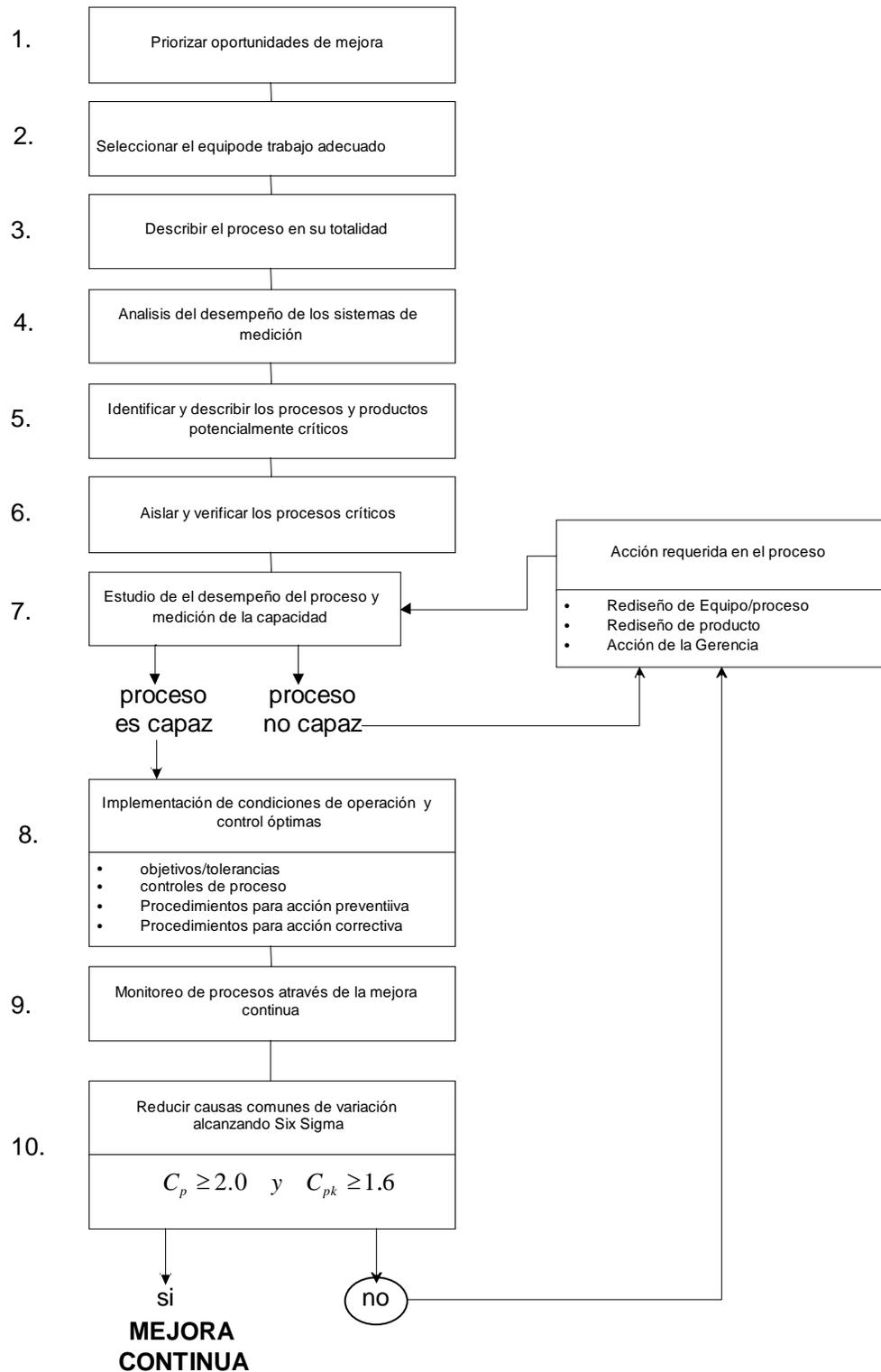
1. **Priorizar oportunidades de mejora:** Conocer y especificar los problemas haciendo las siguientes preguntas: cómo, cuando, donde, por qué y quién. Indicar cual es el impacto al cliente, confiabilidad, calidad del producto, costos de calidad.
2. **Seleccionar el equipo de trabajo adecuado:** Seleccionar un pequeño grupo de gente que conozca el producto / proceso, con la experiencia, disciplina y conocimiento en el área. Establecer el rol de cada miembro, Seleccionar un *Champion* que será el encargado de proporcionar los recursos, conducir y asesorar al grupo.
3. **Describir el proceso totalmente:** Mediante el uso de diagramas de flujo mostrar las variaciones del proceso. Incluyendo a la gente, los métodos, herramientas, instrumentos de medición y equipos.
4. **Análisis del desempeño de los sistemas de medición:** Evaluar: exactitud, repetitibilidad y reproducibilidad, linealidad y estabilidad del instrumento o indicador usado, para asegurar que la capacidad del mismo sea la adecuada, más del 10% de variación no se permite para características críticas o 30% máximo para características no críticas. La resolución del instrumento sea al menos 20 veces mayor que la magnitud que se va a comparar. Por ejemplo si la tolerancia es de 10 mm. el medidor debe tener una resolución o distancia entre marcas de al menos 0.5 mm.
5. **Identificar y describir los procesos y productos potencialmente críticos:** Enumerar todos los procesos críticos

potenciales, mediante el uso de tormentas de ideas, datos históricos, reportes de rendimiento, análisis de falla etc.

6. **Aislar y verificar los procesos críticos:** Reducir la lista enfocándonos en los pocos vitales, identificar las relaciones de entrada y salida que provocan problemas específicos. Verificar las causas potenciales de variación en los procesos, usando diseño de experimentos, diagramas de dispersión, y diagramas multivariados.
7. **Estudio de el desempeño del proceso y medición de la capacidad:** Identificar y definir las limitaciones de los procesos. Asegurar que los procesos sean capaces de alcanzar su máximo potencial. Determinar las especificaciones "reales". Se considera que un proceso es capaz cuando $C_p \geq C_{pk} \geq 1.6$, si el proceso es capaz se continúa con el paso 8. , de lo contrario se requiere tomar acciones de rediseño del proceso o del producto.
8. **Implementación de condiciones de operación y control óptimas:** Llevar a cabo un plan permanente de acciones correctivas para prevenir causas especiales de variación. Es necesario tener un proceso estable y predecible, por lo cual se deberá tener continuamente controles de proceso.
9. **Monitoreo de procesos a través de la mejora continua:** Los sistemas, métodos, procedimientos deberán de ser modificados cuando sea necesario para evitar las causas especiales de variación. También será necesario identificar las acciones futuras requeridas para mejorar el proceso.
10. **Reducir causas comunes de variación para alcanzar *Seis Sigma*:** Se deben reconocer las limitantes del proceso. Solamente a

través de la reducción o eliminación de las causas comunes de variación, será posible alcanzar el nivel **Seis Sigma**.

Figura 1-5 10 pasos de Motorola para la mejora de procesos.



1.5 Las fases DMAIC de la Metodología *Seis Sigma*

La metodología Seis Sigma es un método disciplinado de mejora de los procesos conformado por las fases siguientes: Definición, Medición, Análisis, Mejora y Control (DMAIC), como se explican a continuación:

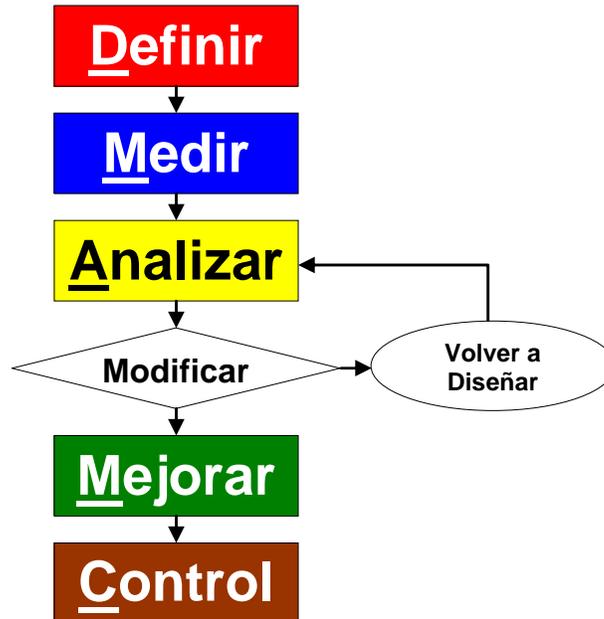


Figura 1.6 Proceso DMAIC

Resumen

En este capítulo se presentaron a grandes rasgos los pasos a seguir para la aplicación de la Metodología Seis Sigma, se ejemplificó el cálculo de la habilidad de los procesos en función de las sigmas del proceso y por último se determinó la capacidad del proceso a la primera pasada.

Contenido del Estudio de caso

En el primer capítulo se presenta, la métrica de Seis Sigma, las Mediciones de Seis Sigma, el cálculo del rendimiento del proceso, los 10 pasos de la mejora de Motorola y las fases DMAIC de la Metodología Seis Sigma.

En el segundo capítulo se tiene, el propósito y las etapas de la fase de Definición

En el tercer capítulo se presenta: las etapas de la fase de medición, la estadística básica, las herramientas para la solución de problemas, el análisis del sistema de medición, la distribución Normal y la capacidad de los procesos normales y No-normales.

El cuarto capítulo propone, las etapas de la fase de análisis, la regresión lineal, cartas Multi Vari, pruebas de una o dos poblaciones y el análisis de varianza de una vía.

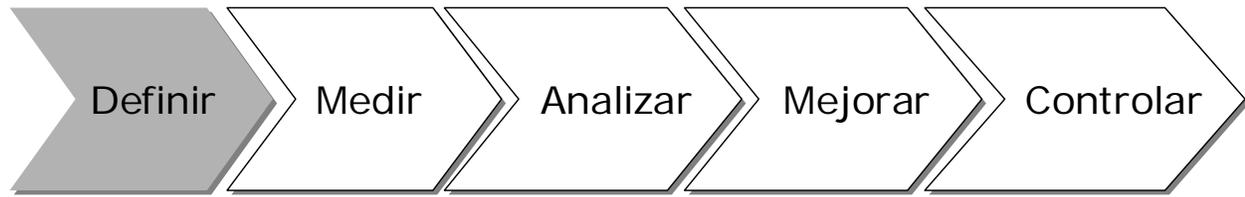
En el capítulo quinto se incluyen, las etapas de la fase de mejora, el diseño de experimentos factoriales y el experimento factorial 2^k .

Las etapas de la fase de control, las cartas de control y una descripción de los dispositivos a prueba de error, se presentan en el sexto capítulo.

En el capítulo séptimo, se presenta el caso práctico de la aplicación de la Metodología Seis Sigma en la Mejora del Desempeño en el Consumo de Combustible de un Vehículo, pasando por todas y cada una de las fases.

Por último se termina este trabajo con algunas conclusiones, recomendaciones y la bibliografía que se uso en la elaboración de este proyecto.

CAPÍTULO 2 FASE DE DEFINICIÓN



2.1 Propósito

Identificar el problema a resolver, estratificándolo tanto como sea posible, por ejemplo: reclamación de un cliente por falla, identificar la familia de productos por importancia mediante el uso del diagrama de Pareto (ver diagrama Pareto fase de medición), después identificar el producto, la línea donde se hace, el equipo específico, etc. En este momento ya se puede definir el problema y la oportunidad de mejora. En esta fase la primera de la Metodología *Seis Sigma*, se trata de detectar cual es el problema, definir las CTQ´S (Criticas para la calidad) con base en la voz del cliente (VOC), el impacto que tiene para el negocio la realización del el proyecto, las metas que se pretenden lograr, el alcance y los ahorros financieros.

2.2 Etapas de la fase de definición

Las etapas de la fase de definición son las siguientes:

2.2.1 Identificación de clientes internos y externos:

El primer paso en la definición de un proyecto es identificar cuales son los clientes a los que el proceso impacta, se define como cliente interno a la persona siguiente en el proceso, esto es, dentro de la compañía. Por ejemplo el cliente del almacén es producción ya que ellos se encargan de proveer los insumos para que producción pueda realizar el proceso de transformación. Los clientes externos son todos aquellos a los que la empresa provee un producto o servicio pagando por él.

2.2.2 **Determinar las CTQ's del proyecto:**

CTQ Critica para la calidad (*Critical to Quality en inglés*), es un atributo o característica de calidad de un producto o servicio que es importante bajo la expectativa del cliente.

Nota: También existen otros conceptos como CTD (*Critical to Delivery*) y CTC (*Critical to Cost*), en este tipo de proyectos en el CTD el objetivo es reducir el tiempo de respuesta y para los CTC en reducir los costos.

Tanto en los CTQ, CTD y CTC el objetivo para la empresa es reducir los costos, aumentar la satisfacción del cliente y mejorar el margen.

Para determinar los CTQ, se tiene que conocer la voz del cliente interno o externo (VOC), o sea ¿qué es lo que espera nuestro cliente acerca del servicio o producto que le proporcionamos? Mediante la voz del cliente podemos saber cual es el grado de satisfacción que éste tiene.

Ejemplo de CTQ:

- Entregas a tiempo
- Mantenimiento
- Durabilidad
- Confiabilidad
- Seguridad

Para determinar las CTQ's se pueden tomar los siguientes puntos:

- Metas del negocio
- Entrevistas
- Quejas
- Datos de Benchmarking
- Matriz de Causa Efecto
- QFD
- Tendencias del mercado futuras

2.2.2 Selección del problema:

Un problema se da por: devoluciones, bajo nivel de servicio, entregas tardías, desperdicios, producto defectuoso, documentos inadecuados.

El problema se selecciona con base en las políticas de la organización, al grupo de trabajo, jefe inmediato y a los resultados organizacionales.

Criterios para seleccionar el problema

- Seguridad
- Calidad
- Entrega
- Costo
- Nivel de servicio

2.2.4 Razón de la Selección

Expresa los antecedentes, la importancia y la prioridad de los problemas.

En este punto explicamos porqué se seleccionó el problema:

- Efecto económico, reclamo de mercado, rechazos, % de ventas pérdidas , otros.
- Impacto para los procesos posteriores, monto de pérdida, incremento de tiempo de operación, paro de línea, etc.

Todo el equipo evaluará las razones descritas mediante la matriz de evaluación (Figura 2.1) y enfocarse en un solo tema.

2.2.5 Impacto en el negocio:

En este punto se enuncia como impacta la mejora del proceso al negocio¹⁶. Se mencionan cuales serían las consecuencias en caso de no realizar el proyecto. Se debe conocer cual ha sido la situación en el negocio debido al proceso actual. Qué nos ha ocasionado: Pérdida de

¹⁶ Everett Adam, Administración de la Producción y las Operaciones, p126. México, Editorial Pearson, 1991

clientes? Incumplimiento en los niveles de servicio?, Así como cuantificar (en porcentajes y en pérdidas de utilidades). Es importante describir como se alinea el proyecto con las iniciativas y metas del negocio. Estas últimas son definidas por la dirección. En la tabla 2.1 encontramos puntos a considerar para definir los objetivos de manera precisa.

| Criterio de evaluación | 3 puntos | | 2 puntos | | 1 punto | |
|-------------------------|-------------------|--------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| | Im por- tancia | Prior. | Política Deppto. | Periodo de Ejec. | Facti- bilidad | Orden |
| Problema | | | | | | |
| DEVOLUCIONES | | | | | | 12 Puntos 1er. lugar |
| ENTREGAS TARDIAS | | | | | | 10 Puntos 2o. lugar |
| DOCS. INADEC. | | | | | | 10 Puntos 2o. lugar |
| NIVEL SERVICIO | | | | | | 9 Puntos 3er. lugar |

Tabla 2.1 Matriz de evaluación.

2.2.6 Descripción del problema:

Se preguntará por qué? Por qué? Por qué?, hasta definir el problema del proceso, del producto o del servicio de forma específica, indicándolo de forma cuantitativa, para evidenciar la necesidad de modificar su estado actual. Es mejor no usar la solución para nombrar un problema, sin antes realizar la búsqueda de la causa verdadera, se creará duda de si esa solución es la definitiva.

2.2.7 Definición de los objetivos del proyecto

Para determinar los objetivos del proyecto nos cuestionamos ¿qué es lo que vamos a obtener con la realización del proyecto? Generalmente es mejorar e implementar el proceso para una fecha específica. Ejemplo: Implementar el 100% de las mejoras de un proceso en la fecha propuesta, Incrementar el nivel de servicio en un 98%.

2.2.8 Alcance del proyecto:

Sirve para delimitar el proceso. (alcance del proyecto de Calidad).

Punto de inicio: Identificar la actividad en donde empieza el proceso.

Punto final: Identificar la actividad donde termina el proceso.

Dentro del alcance: Actividades que se encuentran dentro del proceso.

Fuera del alcance: Actividades que no están dentro del proceso.

| PUNTO CRITICO | ACTIVIDADES |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>* Aclarar la meta del valor del objetivo .</p> <p>* No plasmar simplemente los deseos y expectativas en el objetivo, si no establecer un objetivo factible de manera escalonada .</p> <p>* Establecer un objetivo con fundamento, no se debe tomar una decisión de impulso (sin analizar).</p> <p>(Punto clave para establecer el valor objetivo).</p> <p>* Definirlo tomando en cuenta las políticas de la empresa.</p> <p>* En caso de no tener un concepto claro de las políticas, analizar la importancia de los problemas y / o mejoras, cuando nos ocasionen un defecto al proceso posterior, factibilidad de cumplimiento, programa, distribución de cargo, etc. y definirlo .</p> <p>Establecer un objetivo que tenga relación con la selección del tema y razón de la selección.</p> | <p>* Indicar el objetivo con valores en forma numérica en lo posible.</p> <p>* El objetivo debe tener relación con el efecto esperado .</p> <p>* El objetivo debe de ser concreto.</p> <p>Ejemplo: ¿QUÉ? ***** Reducir el defectuoso en productos A</p> <p>¿HASTA CUÁNDO?**** De Mayo del 2002 Octubre del 2002</p> <p>¿HASTA CUANTO?**** Bajar hasta 1% ó menos del 1% promedio de defectuoso.</p> <p>* Hay un método para establecer el objetivo final de una vez; otro estableciendolo en forma gradual entre objetivo primario y secundario, establecer periodos de tiempo cortos.</p> <p>Establecer objetivos graduales en los casos Sigüientes :</p> <p>(1).- Que el tema sea demasiado grande y se requiera dividirlo.</p> <p>(2).- Que el tema sea complicado y que se relacione con otras áreas.</p> <p>(3).- Que se requiera la selección de las actividades conforme a la habilidad real del grupo de trabajo</p> |

Tabla 2.2 Definición de los objetivos del proyecto.

Ejemplo:

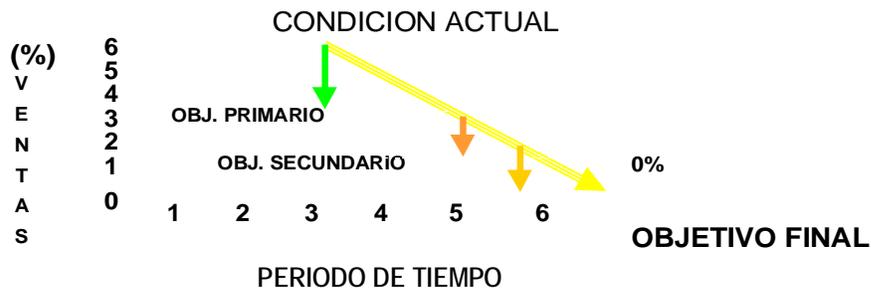


Figura 2.1 Ejemplo objetivos del proyecto.

La realización de los proyectos normalmente es asignada a líderes de proyecto "Green Belts" quienes aplican la metodología Seis Sigma en los proyectos de mejora del desempeño de los procesos.

- a) Los proyectos de los Green Belt son relacionados a sus actividades diarias- a nivel transaccional y operativo, para que estén bien enfocados y con un alcance corto. Cuando el proyecto sea demasiado grande conviene dividirlo o fraccionarlo, entre diferentes *Green Belts*.

2.2.8 **Ahorros:**

Identificar de dónde se van a obtener los ahorros financieros para el proyecto de Calidad. Cuales son las fuentes o actividades de donde se van a estimar los ahorros.

Por ejemplo: Reducción de costos al mejorar la productividad de un proceso, reducción del tiempo de ciclo, reducción de desperdicios, reducción de reclamaciones de clientes, etc.

Cabe mencionar que no siempre hay ahorros, si el CTQ se deriva de una mejora de la competencia, se hará una inversión.

2.2.10 **Metas cualitativas**

Si se tienen que identificar metas cualitativas. Por ejemplo: Incrementar los niveles de seguridad en las instalaciones. Mejorar la imagen del negocio, cumplimiento con lineamientos corporativos.

2.2.11 **Mapa del proceso:**

Realizar un mapeo del proceso de alto nivel, identificando cuales son los proveedores, entradas, proceso, salidas, clientes.



Figura 2.2 Mapa de proceso. "high level"

2.2.12 Selección del equipo de trabajo:

- Seleccionar a las personas clave que intervienen o que están involucradas directamente y que reciben beneficios del proceso.
- Incluir nombre, posición roles y responsabilidades a desempeñar en el desarrollo del proyecto.
- Es necesario incluir además de los miembros del equipo, al Champion del proceso así como un Black Belt que apoye y asesore a los equipos de proyecto guiados por Green Belts.

Recomendaciones:

- Todos los miembros del equipo deben reconocer que la meta que persiguen como tal es importante para ellos y para la empresa.
- Los miembros deben ser asignados a un grupo de acuerdo con sus habilidades y potencial.
- Desarrollar un código de conducta, y reglas para que éste se cumpla.
- Proporcionar retroalimentación y reconocimiento en forma oportuna.
- La estructura de comunicación debe asegurar el flujo de información requerido para la toma de decisiones.
- Asignar recursos y financiamiento para realizar los planes de mejora.
- Orientación y supervisión de los equipos para que tengan un mejor desempeño.

➤ ***Es importante identificar en que casos se debe seguir la metodología Seis Sigma y en que casos es mejor utilizar alguna otra de resultados más rápidos o para solución de problemas***

crónicos como la de círculos de calidad. En realidad aunque se quisieran proponer soluciones a un problema después de estratificarlo, sería imposible llevarlo a cabo.

Hasta aquí se mostraron los pasos para poder definir un proyecto de mejora, los cuales incluyen, el identificar al cliente, escuchar su voz (voice of the customer VOC en inglés), determinar la característica crítica para la calidad, describir el problema, su alcance, sus objetivos, formar el equipo de trabajo, así como identificar los posible beneficios económicos del proyecto una vez concluido éste.

A continuación se presenta la fase de medición donde se colectan datos para establecer un diagnóstico de la situación actual del problema y sus posibles causas.

CAPÍTULO 3 FASE DE MEDICIÓN



3.1 Introducción

En la fase de definición se identificaron los CTQ's del cliente, y se desarrolló un mapa de alto nivel para determinar los CTQ's del proceso.

En todos los procesos existe variación, en esta fase el propósito es medir dicha variación, para saber si existen datos que se encuentren fuera de especificaciones, que estén causando problemas en nuestros procesos. Para realizar esta actividad es de suma importancia conocer: **¿que es lo que necesitamos medir? y ¿como lo vamos a medir?** A lo largo de este capítulo tenemos diferentes herramientas que nos ayudarán a responder estas preguntas.

Dependiendo de las condiciones y necesidades que tengamos seleccionaremos una o más herramientas, cabe mencionar que no necesariamente se utilizan todas las herramientas, lo importante es seleccionar cuidadosamente aquellas que nos proporcionen la información más objetiva y precisa.

Objetivos:

- Conocer el uso de las herramientas de la fase de medición
- Determinar que mediciones son importantes para el proyecto
- Recolectar datos relevantes
- Convertir los datos en números para conocer su comportamientos
- Detectar cual es la frecuencia con la que ocurren los defectos

3.2 Etapas de la fase de medición

Esta fase consta de las siguientes etapas:

3.2.1 Seleccionar los CTQ´s del proceso (Crítico para la calidad)

Observemos la siguiente tabla:

$$Y = F(X)$$

| Y | X_1, X_2, \dots, X_n | Z's |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Variable dependiente• Salida (respuesta)• Efecto• Síntoma• Monitoreable | <ul style="list-style-type: none">• Variable independiente• Entrada-Proceso• Causa• Problema• Controlable. | <ul style="list-style-type: none">• Variables de ruido• Incontrolables |

Tabla 3.1 Variables dependiente, independiente y de ruido.

Para la selección de Y's podemos utilizar un diagrama de Pareto para priorizar y centrar nuestra atención en el(los) efecto(s) más importantes. La variable dependiente "Y" fue previamente determinada en la fase de definición.

La Y es la variable de respuesta y las X's son las variables de entrada, las Z's son las variables de ruido.

Los CTQ's del cliente (interno o externo) corresponden a la "Y", y los CTQ's del proceso corresponden a las "X's"

En esta etapa se tratarán de determinar las X's, ya que son las variables que podemos medir y controlar.

Para determinar los CTQ's del proceso seleccionaremos alguna o algunas de las herramientas apropiadas a las necesidades del proyecto.

A continuación se enuncian y describe brevemente cada una de las herramientas en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Tipo de herramientas

| Herramienta | ¿Para qué es utilizada? |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estadística Descriptiva | Definiciones básicas con ejemplos de Estadística |
| Probabilidad | Definiciones básicas con ejemplos de Probabilidad |
| Distribución Normal | Propiedades de la distribución Normal |
| Lluvia de ideas | Cada miembro del equipo propone posibles soluciones a un problema, se determinan las mejores soluciones por consenso. |
| Técnica de grupos nominales. | Permite al equipo rápidamente realizar un consenso de la importancia de problemas o soluciones posibles. Las causas más importantes son atacadas y se priorizan para encontrar la mejor solución |
| Análisis de Campo de Fuerzas. | Analizar cuales son las fuerzas dentro de una organización o proceso que están dando empuje a las soluciones y cuales están frenando el progreso. |
| Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa o Fishbone) | Representa de forma ordenada todas las causas que pueden originar un problema (efecto) es una herramienta muy efectiva para encontrar las causas más importantes de un problema. |
| Why-Why-Why | Se usa después de haber determinado las causas importantes de un problema, se pregunta 3 veces porqué, podremos llegar a la solución del problema |
| 5W/1H | Técnica en la cual se responde a las siguientes preguntas: que, quién, porque, cuando, donde, como, para la solución de problemas. |

| | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diagrama de Pareto | Priorizar los problemas que tienen el potencial más grande de mejora. Muestra la frecuencia relativa en una gráfica de barras descendiente. |
| Diagramas Matriz | Método utilizado para mostrar las relaciones que existen entre métodos, causas, actividades, etc. determinando la fuerza que existe entre estas. |
| Matriz Causa y efecto | Relaciona las entradas CTQ's y el diagrama de flujo del proceso como su principal fuente. Sirve para priorizar las entradas clave a usar en AMEF's, planes de control y estudios de capacidad. |
| Diagrama de Relaciones | Permite al equipo identificar, analizar y clasificar sistemáticamente las relaciones causa y efecto que existen entre todos los elementos críticos, para lograr una solución efectiva. |
| Diagrama de Afinidad | Agrupar en categorías afines las posibles causas que ocasionan un problema, permitiendo obtener fácilmente la causa que lo origina. |
| Hoja de Verificación | Recolectar datos basados en la observación del comportamiento de un proceso con el fin de detectar tendencias, por medio de la captura, análisis y control de información relativa al proceso. |
| Carta de tendencias | Conocer el comportamiento de un proceso gráficamente para poder tomar las acciones correctivas a tiempo cuando es necesario. |
| Diagrama de Dispersión | Técnica usada para estudiar la relación entre dos variables, facilita la comprensión del problema. |
| Mapa de procesos | Proveen una secuencia gráfica de cada uno de los pasos o actividades que componen una operación desde el inicio hasta el final. Permitiendo una mejor |

| | |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | visualización y comprensión del proceso. Sirve para identificar pasos innecesarios, compara el proceso actual contra el ideal. |
| QFD | Método gráfico en el que se identifican los deseos del cliente (CTQ'S) y las características de diseño del producto, procesos o servicios. Permite traducir de un lenguaje ambiguo a los requerimientos específicos del diseño del producto, proceso o servicio. En otras palabras relacionas los ¿qués? del cliente con los ¿cómo's? del proceso. |
| Benchmarking | Estudio que ayuda a realizar un comparativo de productos, procesos o servicios contra el "mejor en la clase" puede ser dentro de la empresa o, para identificar oportunidades de mejora. |
| Análisis sistema de medición (Análisis R & R) | Sirve para determinar que tan grandes son las variaciones en base a ciertos parámetros de los sistemas de medición, incluyendo equipo y gente. |

3.2.2 Definición de estándares de desempeño

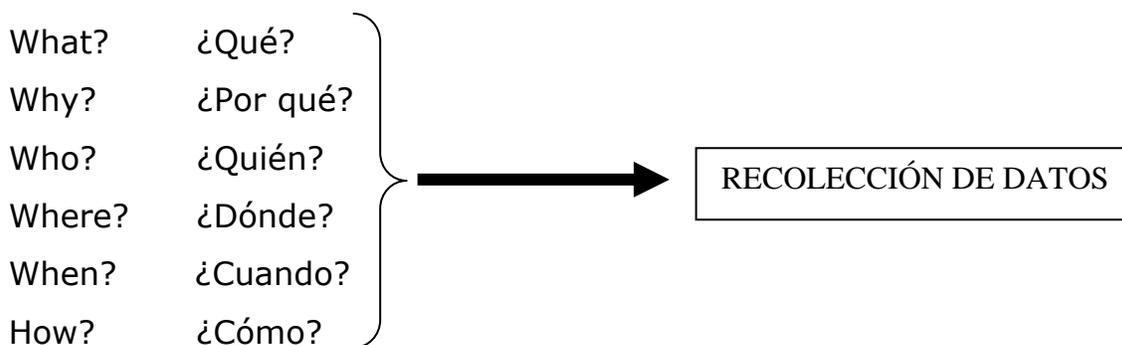
- a) Definición Operacional.- Es una descripción precisa acerca del proceso que aclara cualquier ambigüedad del mismo. Es un paso clave para el CTQ que está siendo medido.
- b) Meta de desempeño.- Estamos interesados en alcanzar la meta de desempeño de la característica de un producto o proceso. La meta es reducir la variación al máximo.
- c) Límite de especificación.- La cantidad de variación que el cliente está dispuesto a aceptar en un producto o proceso. La especificación puede ser determinada internamente por ingeniería,

siempre y cuando no afecte al consumidor, si no al contrario lo beneficie.

d) Defecto.- Cualquier característica del producto que sale de los límites de especificación o de los estándares de apariencia, color, duración, etc.

3.2.3 Establecer y validar el plan de recolección de datos

Para realiza el plan de recolección de datos podemos ayudarnos del diagrama 5W/1H el cual consiste en contestar las siguientes preguntas:



El objetivo es recolectar datos confiables, que reflejen la realidad de lo que está sucediendo. Las ventajas que nos proporciona son:

- Proveé una estrategia documentada al recolectar datos confiables.
- Da a los miembros del equipo una referencia común.
- Ayuda a asegurar que los recursos sean usados efectivamente para recolectar únicamente datos críticos.

Es importante tener cuestionarios y/ o registros validados y confiables, debiendo ser suficientemente claros para la persona que los llena, es recomendable realizar un instructivo y además deben de ser diseñados para que proporcionen la información necesaria para el análisis.

Se debe contar con equipos de medición con error mínimo, de lo contrario nuestras mediciones contendrán algún error. Para validar el sistema de medición se conduce un estudio Gage R & R

Ejemplo

En una tienda de refacciones para automóviles, disminuyeron en gran medida las ventas. El gerente general convocó a una junta con las personas involucradas, para determinar cuales eran las causas por las cuales estaba sucediendo esta situación.

Siguiendo las etapas de la fase.

3.2.4 Seleccionar los CTQ's:

El equipo de trabajo realizó una tormenta de ideas, el cuestionamiento que se hizo es porqué las ventas están disminuyendo? (efecto) Una vez terminada esta actividad, el grupo seleccionó mediante consenso las causas que consideró más importantes, después utilizaron la técnica Why-Why-Why, para encontrar la causa raíz del problema. Mediante eliminación de las otras causas se encontró que la causa principal es: el tiempo de respuesta que se le estaba dando al cliente.

Esto se confirmó ya que un miembro del equipo expuso que los clientes en ocasiones tardaban mucho tiempo en ser atendidos, existían muchas quejas y los clientes en ocasiones nunca más regresaban.

3.2.5 Definición de estándares de desempeño:

- Definición operacional.
 - En el mostrador se tiene la idea de que el tiempo de respuesta al cliente es desde el momento en que se atiende al cliente hasta que se le entrega la refacción.

- Sin embargo para el cliente el tiempo de respuesta es desde el momento que se presenta en la tienda, hasta que sale de la tienda con la refacción.

Relacionando los requerimientos internos con la voz del cliente (VOC) y para eliminar ambigüedades entre las dos definiciones anteriores realizamos la siguiente definición operacional: El tiempo de respuesta al cliente es: **“Desde el momento en que el cliente entra, espera ser atendido, pide las refacciones, le entregan las refacciones paga en la caja y recibe la factura”**.

- Meta de desempeño.- Haciendo un Benchmarking con la mejor refaccionaría de la ciudad se determinó que el 99.5% de los clientes estaban satisfechos con el tiempo de entrega.
- Límite de especificación.- Aquí no tenemos límite de especificación.
- Defecto: se define como defecto cuando un cliente no está satisfecho con el tiempo de respuesta.

Para evaluar la satisfacción del cliente en cuanto al tiempo de respuesta realizamos un cuestionario que aplicamos aleatoriamente a diferentes clientes.

3.3 Estadística básica para la fase de Medición²⁰

La Estadística descriptiva es la rama de las matemáticas que comprende la recopilación, tabulación, análisis e interpretación de datos cuantitativos y cualitativos, para tomar decisiones que se requieran a fin de que el comportamiento de los datos se mantenga dentro de los parámetros de control establecidos.

- **Población (N)**– Es el conjunto de todos los elementos de interés para determinado estudio

²⁰ Kaplan & Schuster, AP Statistics, p 54, E. U. A. Editorial Kaplan. 2004

- **Parámetro** – Es una característica numérica de la población, se identifica con letras griegas (Media = μ , Desviación estándar = σ , Proporción = n , Coeficiente de correlación = ρ)
- **Muestra (n)**– Es una parte de la población, debe ser representativa de la misma.
- **Estadístico** – Son características numéricas de una muestra, se identifican con letras latinas (Media = X , Desviación estándar = s , Proporción = p , Coeficiente de correlación = r).

La estadística inferencial se refiere a la estimación de parámetros y pruebas de hipótesis acerca de las características de la población en base a los datos obtenidos con una muestra.

La Estadística descriptiva proporciona un criterio para lograr mejoras, debido a que sus técnicas se pueden usar para describir y comprender la variabilidad. Por ejemplo, consideremos en un proceso de reactor industrial para la obtención de un producto químico, tomamos como una medida crítica el nivel de concentración de un componente, si utilizamos un instrumento de medición con la resolución suficiente, encontraremos que existe variabilidad, mediante el uso de técnicas estadísticas podemos realizar mejoras en el proceso para reducir la variación en rendimiento del reactor.

Para poder obtener consecuencias y deducciones válidas de los datos de una estadística, es muy útil contar con información sobre los valores que se agrupan hacia el centro y sobre que tan distanciados o dispersos estén unos respecto a otros.

Las medidas de tendencia central son **la media, mediana y moda**.

Las medidas de dispersión son el **Rango, la desviación estándar y el coeficiente de variación**.

Distribución de Frecuencias e Histogramas

En la tabla 3.3, se muestran los datos con los cuales de hará un Histograma (Figura 3.1). El **histograma**, es un diagrama de barras donde estas corresponden a los intervalos y las alturas a las frecuencias. Necesitándose para esto entre 50 a 100 datos.

Tabla 3.3 Tabla de datos agrupados

| Columna | Intervalo | Registro de frecuencias | | | | | | |
|---------|-----------|-------------------------|------|------|------|------|-----|----|
| 1 | 0 -8 | IIII | | | | | | 5 |
| 2 | 9-17 | IIII | IIII | | | | | 9 |
| 3 | 18-26 | IIII | I | | | | | 6 |
| 4 | 27-35 | IIII | IIII | I | | | | 11 |
| 5 | 36-44 | IIII | IIII | II | | | | 17 |
| 6 | 45-53 | IIII | IIII | IIII | IIII | IIII | III | 28 |
| 7 | 54-62 | IIII | IIII | IIII | III | | | 18 |
| 8 | 63-71 | IIII | IIII | III | | | | 13 |
| 9 | 72-80 | IIII | IIII | | | | | 10 |
| 10 | 81-89 | IIII | III | | | | | 8 |
| 11 | 90-98 | IIII | | | | | | 5 |

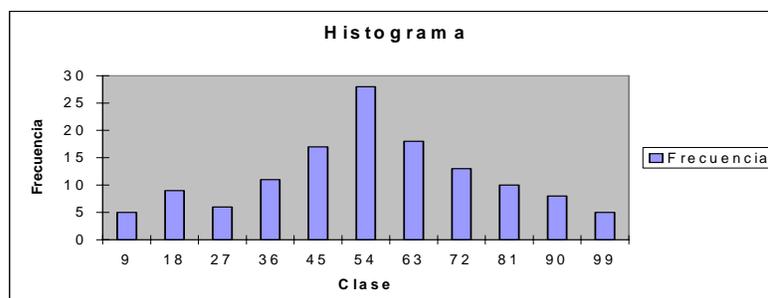


Figura 3.1 Histograma

Uso de Excel

1. En el menú seleccione la opción análisis de datos.
2. Seleccione la opción histograma.
3. Seleccione el rango de entrada, estos corresponden a los datos numéricos de la tabla.

4. Seleccione el rango de clases, previamente escribir en una columna los intervalos de clase.
5. En opciones de salida seleccione una celda de la hoja de calculo que este en blanco (a partir de está celda será insertado el histograma).
6. Ya insertado el histograma se podrán hacer modificaciones de la escala, color, títulos etc.

Gráficas de Caja

Una gráfica de caja es un diagrama que proporciona información sobre el centro, la dispersión y la asimetría o sesgo; utiliza cuartiles, y así, es resistente a las observaciones aberrantes.

Estadística descriptiva en Excel:

En el menú de Análisis de datos podemos obtener estadísticas de un conjunto determinado de datos.

Seleccione: Herramientas > Análisis de datos > Estadística descriptiva

Ejemplo 3.1

Usemos los datos siguientes, para construir una gráfica de caja:

5 7 8 9 9 11 12 12 13 14 15 16 17 18 19 20 22

La mediana es $Q_2 = 13$. el cuartil inferior es $Q_1 = 9$ y el cuartil superior es $Q_3 = 17$

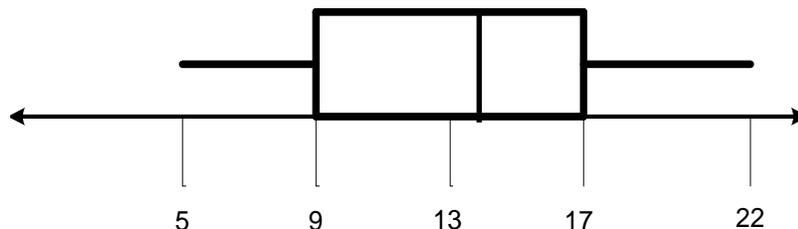


Figura 3.2 Diagrama de caja

La mediana está sesgada a la izquierda de la caja y la extensión más larga está a la derecha, la distribución está sesgada a la derecha.

Diagramas de caja en Minitab:

1. Capture los datos en la hoja de trabajo.
2. Seleccione la opción: Graph> Charactergraph>Boxplot
3. Seleccione la variable C1 como se muestra en la pantalla y presione clic en ok

3.4 Herramientas estadísticas para solución de problemas

Mapa de procesos

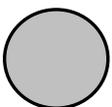
Dentro de los sistemas de calidad resulta de gran utilidad representar la estructura y relaciones de los sistemas mediante diagramas de flujo.

Ventajas de los diagramas de flujo

- Proveen una secuencia gráfica de cada uno de los pasos que componen una operación desde el inicio hasta el final. Permitiendo una mejor visualización y comprensión del proceso.
- Los diagramas de flujo pueden minimizar grandes volúmenes de documentación, incluyendo la documentación ISO 9000.
- Facilitan el desarrollo de Procedimientos Estándar de Operación.
- Al tener un procedimiento de operación estándar se reduce en gran medida la variación y el tiempo de ciclo.
- Los diagramas de flujo permiten detectar áreas de mejora en los procesos.

Descripción de símbolos

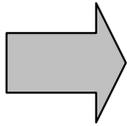
En la construcción de *diagramas de flujo de procesos* se utilizan los símbolos descritos a continuación:



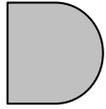
Operación de transformación: de la cual resulta un cambio físico o químico del producto.



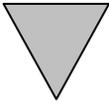
Inspección: Verificación de alguna característica mediante un estándar de calidad preestablecido.



Transporte: Movimiento físico del producto o un componente.



Demora: Indica la necesidad de un periodo de inactividad en espera de operación inspección o transporte.



Almacenamiento: Mantener un producto en almacenamiento hasta que continúe su procesamiento o sea vendido.

Pasos para la elaboración de un diagrama de flujo

- 1. Describir el proceso a evaluar:** Es importante comenzar con los procesos que se consideran de mayor impacto en la organización.
- 2. Definir todos los pasos que componen un producto o servicio:** Existen diferentes maneras de hacerlo. Una de ellas consiste en que el equipo de trabajo anote en tarjetas los diferentes pasos que conforman el proceso, con este método el equipo puede arreglar y ordenar los pasos del proceso. Otra manera de hacerlo es mediante el uso de programas de diagramas de flujo en computadoras, de esta manera se tiene mayor flexibilidad que en el método anterior y se ahorra bastante tiempo.

Cada paso deberá de ser discutido y analizado a detalle utilizando la pregunta *“¿por qué se hace de esta manera?”*

- 3. Conectar las actividades:** Cuando los pasos que componen el proceso han sido descritos se construye el diagrama de flujo, conectando las actividades mediante flechas, cada símbolo debe describir la actividad que se realiza con pocas palabras.

4. Comparar el proceso actual con el proceso considerado como “ideal” las siguientes preguntas pueden servir de guía:

¿Existen pasos demasiado complejos?

¿Existe duplicidad o redundancia?

¿Hay puntos de control para prevenir errores? ¿deberían de existir?

¿El proceso funciona en la manera en la cual debería de hacerse?

¿Se puede realizar el proceso de diferente manera?

5. Mejoras del proceso: Una vez que se contestan las preguntas mediante tormenta de ideas se realizan mejoras. Definiendo los pasos que agregan valor y los que no agregan se puede llevar a cabo una simplificación sustancial del proceso.

Las mejoras son priorizadas y se llevan a cabo planes de acción.

6. Implementar el nuevo procedimiento: Una vez realizadas las mejoras se dan a conocer a las personas involucradas en el proceso y se verifica su efectividad.

En la tabla 3.4 se muestra el diagrama de flujo: Una visita a la farmacia²¹

Tabla 3.4 Operación: despacho de una receta

| EVENTO | SÍMBO LO | TIEMP O (min.) | DISTANC IA (pies) |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Abrir la puerta, caminar hacia el área de la farmacia del almacén. |  | 0.8 | 50 |
| Esperar para ser atendido. |  | 1 | |
| Sacar la fórmula de la billetera o del bolsillo y entregarla al dependiente. |  | 0.4 | |
| Esperar hasta cuando el dependiente despache la fórmula y calcule el valor. |  | 10 | |

²¹ Adaptado de Hamid Noori/Russell Radford, Administración de Operaciones y producción, pp 282, México Editorial Mc.Graw Hill, 1999

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|---|-----|----|
| Sacar la tarjeta de crédito de la billetera y entregarla al dependiente. | ○ | 0.4 | |
| Esperar que el dependiente diligencie el desprendible de la tarjeta de crédito. | D | 1 | |
| Verificar el desprendible | □ | 0.2 | |
| Firmar el desprendible | ○ | 0.1 | |
| Esperar el desprendible y el medicamento | D | 0.3 | |
| Colocar la tarjeta y el desprendible dentro de la billetera | ▽ | 0.2 | |
| Recoger el medicamento y caminar de regreso hasta la puerta | ○ | 0.8 | 50 |

Diagrama de flujo de tiempo sin valor.

Es utilizado para detectar cuales son las actividades que agregan valor al proceso y las que no agregan valor.

Pasos para realizarlo:

- Dibujar una línea horizontal para representar el tiempo total que se ocupa en el proceso.
- Relacione todos los pasos del proceso detalladamente, después decida si el paso tiene valor para el cliente.
- Dibujar una línea vertical fina que represente el tiempo que se requiere para completar el paso.
- Dibújela arriba de la línea, si representa valor agregado, o debajo si no lo representa.
- En cada línea vertical señale el paso del proceso.
- Puede dibujar una barra con el tiempo de valor agregado como porcentaje de tiempo total del proceso.

Ventajas:

- Delinea gráficamente la cantidad de tiempo sin valor que se usa en el proceso.
- Ayuda a reducir el tiempo sin valor y eliminar pasos innecesarios.

Diagrama de Pareto

Es una herramienta utilizada para el mejoramiento de la calidad para identificar y separar en forma crítica los pocos proyectos que provocan la mayor parte de los problemas de calidad.

El principio enuncia que aproximadamente el *80% de los efectos* de un problema se debe a solamente *20% de las causas* involucradas.

El diagrama de Pareto es una gráfica de dos dimensiones que se construye listando las causas de un problema en el eje horizontal, empezando por la izquierda para colocar a aquellas que tienen un mayor efecto sobre el problema, de manera que vayan disminuyendo en orden de magnitud. El eje vertical se dibuja en ambos lados del diagrama: el lado izquierdo representa la magnitud del efecto provocado por las causas, mientras que el lado derecho refleja el porcentaje acumulado de efecto de las causas, empezando por la de mayor magnitud.

En la figura 3.3 se muestra un Pareto

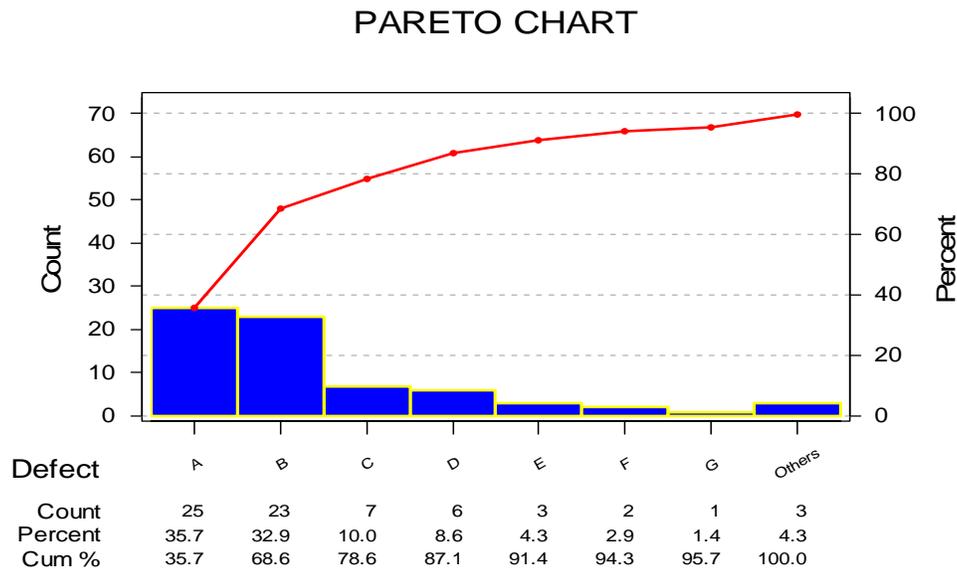


Figura 3.3 Pareto

En la gráfica observamos que aproximadamente el 80% de los efectos es debido a los defectos A, B y C (causas)

Lluvia de ideas

En las sesiones de lluvia de ideas se generan nuevas ideas mediante la participación de todo el equipo.

Para comenzar con el proceso de tormenta de ideas, en el cual se genera información la gente se reúne en una sala en la cual se recomienda la disposición de las mesas en forma de "U" para facilitar el debate. La gente que participa en la sesión deberá de pertenecer a diferentes áreas o tener puntos de vista diferentes, esto con el objeto de enriquecer la sesión.

El facilitador debe contar con experiencia en la conducción de sesiones de tormentas de ideas, o al menos haber participado en alguna previa.

Para conducir un grupo se lleva a cabo la siguiente metodología:

1. Seleccionar el problema a tratar.
2. Pedir a todos los miembros del equipo generen ideas para la solución del problema, las cuales se anotan en el pizarrón sin importar que tan buenas o malas sean estas.
3. Ninguna idea es evaluada o criticada antes de considerar todos los pensamientos concernientes al problema.
4. Aliente todo tipo de ideas, con esto, pueden surgir cosas muy interesantes, que motivan a los participantes a generar más ideas.
5. Apruebe la naturalidad y el buen humor con informalidad, en este punto el objetivo es tener mayor cantidad de ideas así existirán mayores posibilidades de conseguir mejores ideas.
6. Se les otorga a los participantes la facultad de modificar o mejorar las sugerencias de otros.
7. Una vez que se tengan un gran número de ideas el facilitador procede a agrupar y seleccionar las mejores ideas por medio del consenso del grupo de trabajo.

8. Las mejores ideas son discutidas y analizadas con el fin del proponer una solución.

La técnica tormenta de ideas se aplica con gran frecuencia al llevar a cabo otras herramientas, como por ejemplo, diagramas causa-efecto (Ishikawa), Diseño de experimentos, pruebas de confiabilidad, etc.

Diagrama de causa - efecto

El diagrama causa-efecto, también llamado "*espina de pescado*" por la semejanza de su forma, también es conocido por diagrama de Ishikawa.

Es utilizado para explorar, e identificar todas las causas posibles y relaciones de un problema (efecto) o de una condición específica en las características de un proceso.

Una vez elaborado, el *diagrama causa-efecto* representa de forma clara, ordenada y completa todas las causas que pueden determinar cierto problema.

Constituye una buena base de trabajo para poner en marcha la búsqueda de las verdaderas causas de un problema.

Los pasos para elaborar el diagrama de causa - efecto son los siguientes:

1. Seleccione el efecto (problema) a analizar. Se puede seleccionar a través de un consenso, un diagrama de Pareto, otro diagrama o técnica.
2. Realice una lluvia de ideas para identificar las causas posibles que originan el problema.
3. Dibuje el diagrama:
 - Coloque en un cuadro a la derecha la frase que identifique el efecto (característica de calidad)

- Trace una línea horizontal hacia la izquierda del cuadro que contiene la frase. A esta línea se le conoce como columna vertebral.
 - Coloque líneas inclinadas que incidan en la columna vertebral (causas principales).
 - Dibuje líneas horizontales con flechas que incidan en las líneas inclinadas conforme a la clasificación de las causas (causas secundarias)
 - Dibuje líneas inclinadas que incidan en las líneas de las causas secundarias (causas terciarias)
4. Clasifique las causas derivadas de la lluvia de ideas, de la siguiente manera:
- Causas principales.
 - Causas secundarias.
 - Causas terciarias.
5. Jerarquice las causas por grado de importancia y defina aquellas que tengan un efecto relevante sobre la característica específica.
6. Elabore y ejecute un programa de corrección de las causas relevantes.

Ejemplo 3.2²²

Una fábrica de componentes electrónicos se han detectado fallas en la línea de ensamble al probar un circuito, por lo cual se procedió a realizar una investigación utilizando el diagrama causa-efecto.

El problema es: soldadura defectuosa, siendo el efecto que se va a analizar.

Primero se determinan las causas principales 6 M's:

²² Tomado de: Alberto Galgano, Los siete instrumentos de la Calidad Total, ediciones Díaz de Santos, 1995

- Máquinas
- Mente de obra
- Métodos
- Materiales
- Mediciones
- Medio ambiente

Estas constituyen las causas primarias del problema y es necesario desafiarlas para encontrar causas más específicas secundarias y terciarias. Se construye el diagrama espina de pescado con las causas primarias (M's), a partir de estas causas se agrupan las causas secundarias y terciarias derivadas de la lluvia de ideas. En la figura 3.4 se muestra un diagrama Causa-Efecto.

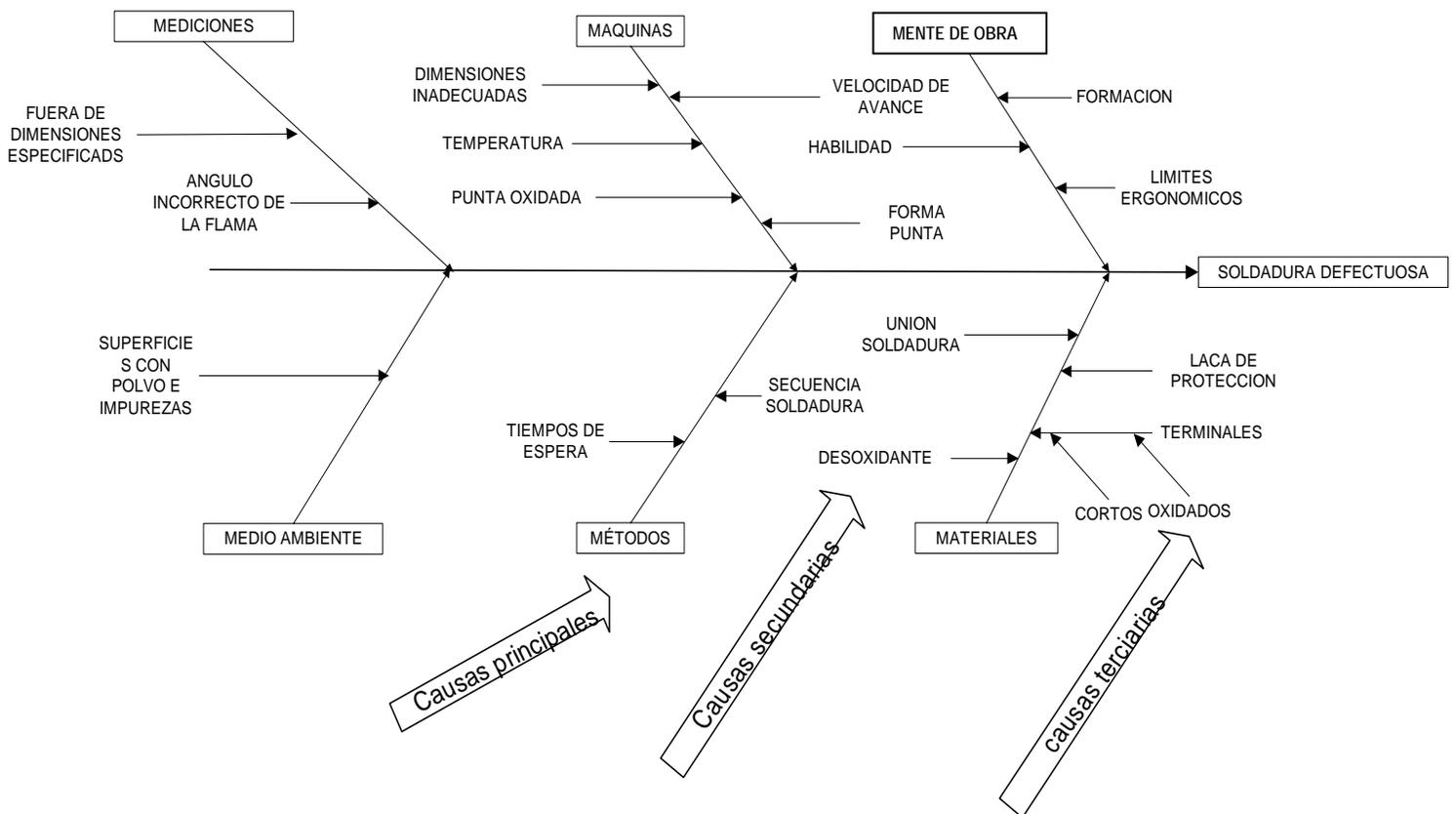


Figura 3.4 Diagrama Causa-Efecto

El equipo analiza cada causa y por medio de eliminación y consenso determina cuales son las verdaderas causas que están ocasionando el problema. Una vez determinada las causas se realiza un análisis Why-Why Why? El cual consiste en preguntarnos tres veces ¿por qué?, para encontrar la causa raíz del problema.

En el ejemplo las causas primarias fueron agrupadas en (M's): mediciones, máquinas, mano de obra, medio ambiente, métodos y materiales. Puede realizarse este diagrama con causas diferentes.

3.5 Estudios de capacidad de sistemas de medición (R & R)

Frecuentemente las organizaciones no consideran el tener sistemas de medición de calidad, el hecho de que las mediciones no sean exactas puede llevar a cometer errores.

Cuando los operadores no miden una pieza de manera consistente, se puede caer en el riesgo de rechazar artículos que están bien.

Si los instrumentos de medición no se calibran, se cometen errores. Cuando sucede esto se tiene un sistema de medición deficiente, esto hará que el estudio parezca satisfactorio cuando en realidad no lo es. Teniendo como consecuencia costos de reparación de un producto o un servicio, ya que la principal fuente de variación se deriva del instrumento de medición. En la figura 3.5 se muestran las posibles fuentes de variación del proceso

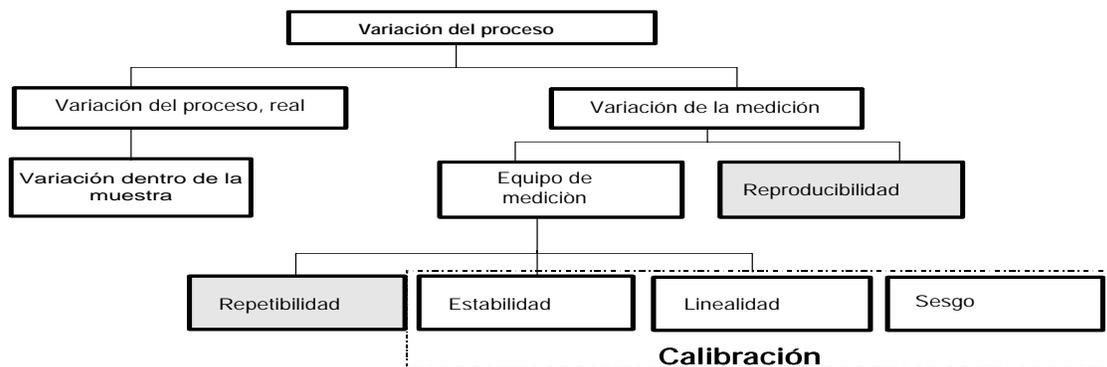


Figura 3.5 Posibles Fuentes de la Variación del Proceso

Definiciones

- *Reproducibilidad*: Variación, en los promedios de mediciones hechas por varios operadores usando un mismo instrumento de medición, midiendo las mismas características y la misma parte, ver figura 3.6.

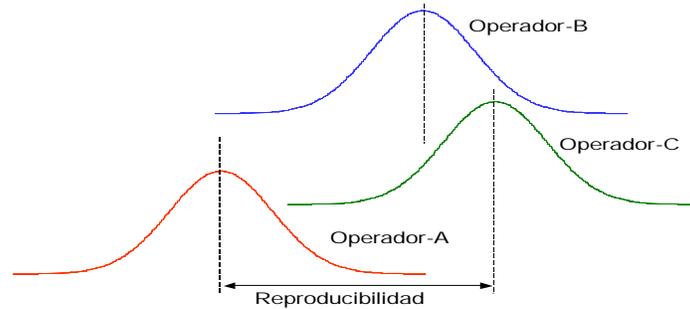


Figura 3.6 Variabilidad del sistema de medición

- *Repetibilidad*: variación de las mediciones obtenidas con un instrumento de medición, cuando es usado varias veces por un operador, midiendo las mismas características en una misma parte.



Figura 3.7 Rango de Repetibilidad

- *Valor verdadero*: Valor correcto teórico / estándares NIST²³
- *Precisión*: Es la habilidad de repetir la misma medida cerca o dentro de una misma zona

Exactitud: Es la diferencia entre el promedio del número de medidas y el valor verdadero.

Resolución: La medición que tiene exactitud y precisión.

²³ En E. U. A. se tiene el NIST (National Institute of Standards and Technology), En México se tiene el CENEAM o el Centro Nacional de Metrología

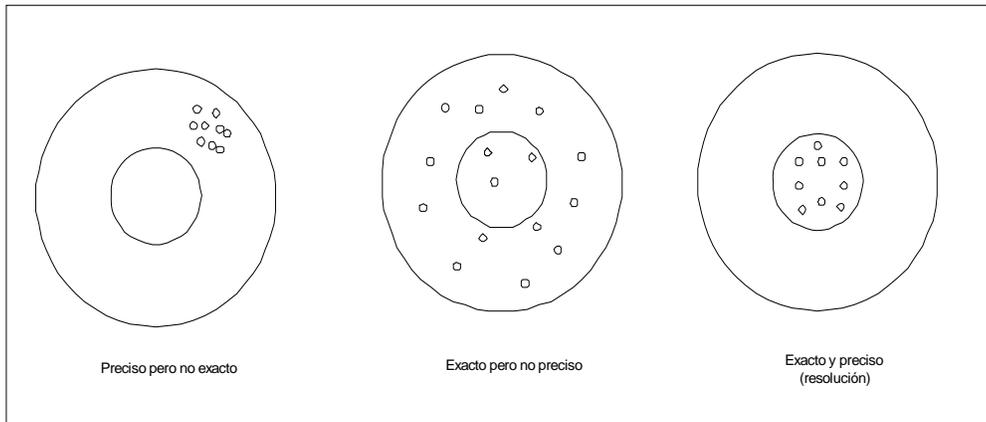


Figura 3.8 Componentes del sistema de medición

Estabilidad: es la variación total de las mediciones obtenidas con un sistema de medición, hechas sobre el mismo patrón o sobre las mismas partes, cuando se mide una sola de sus características, durante un período de tiempo prolongado.

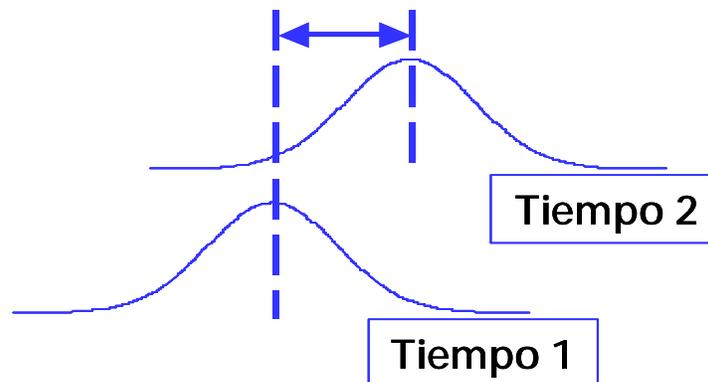


Figura 3.9 Estabilidad en el tiempo

Linealidad: diferencia en los valores de la escala, a través del rango de operación esperado del instrumento de medición.

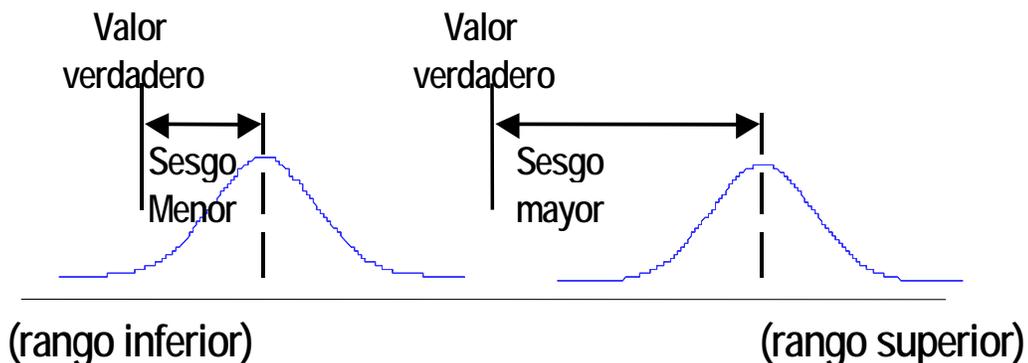


Figura 3.10 Rango de Operación del equipo

Sesgo: distancia entre el valor promedio de todas las mediciones y el valor verdadero. Error sistemático o desviación.

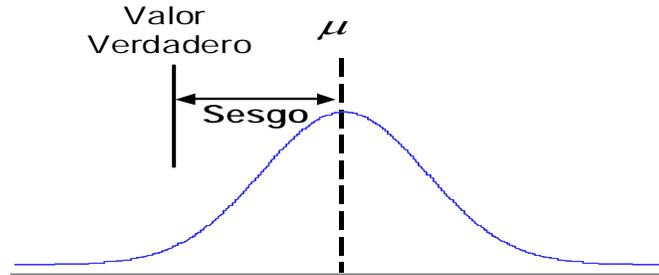


Figura 3.11 Sesgo

Calibración: Es la comparación de un estándar de medición con exactitud conocida con otro instrumento para detectar, reportar o eliminar por medio del ajuste, cualquier variación en la exactitud del instrumento.

- El equipo de medición debe tener una discriminación adecuada en la evaluación de las partes, su resolución debe de ser de al menos 1/10 de la tolerancia, sin embargo de preferencia debería de ser de 1/20.

El incluir un máximo del 10% al sistema de medición es aceptable. 10-30%. Puede ser aceptable, dependiendo si la característica a medir no es crítica >30%. **¡Es Inaceptable!**

En cualquier problema que involucre mediciones, algunas de las variaciones observadas son debidas al proceso y otras son debidas al error o variación en los sistemas de medición. La variación total es expresada de la siguiente manera:

$$\sigma^2 total = \sigma^2 proceso + \sigma^2 error medición$$

Estudio de R&R Método largo

- Generalmente intervienen de dos a tres operadores
- Generalmente se toman 10 unidades
- Cada unidad es medida por cada operador, 2 ó 3 veces.

- La resolución del equipo de medición debe ser de al menos el 10% del rango de tolerancia o del rango de variación del proceso.
- Las partes deben seleccionarse al azar, cubriendo *el rango total del proceso*. Es importante que dichas partes sean representativas del proceso total (80% de la variación)
- 10 partes NO son un tamaño de muestra significativo para una opinión sólida sobre el *equipo de medición* a menos que se cumpla el punto anterior.

Procedimiento para realizar un estudio de R & R

1. Asegúrese de que el equipo de medición haya sido calibrado.
2. Marque cada pieza con un número de identificación que no pueda ver la persona que realiza la medición.
3. Haga que el primer operador mida todas las muestras una sola vez, siguiendo un orden al azar.
4. Haga que el segundo operador mida todas las muestras una sola vez, siguiendo un orden al azar.
5. Continúe hasta que todos los operadores hayan medido las muestras una sola vez (Este es el ensayo 1).
6. Repita los pasos 3,4 hasta completar el número requerido de ensayos
7. Determine las estadísticas del estudio R & R
 - Repetibilidad
 - Reproducibilidad
 - % R & R
 - Desviaciones estándar de cada uno de los conceptos mencionados
 - Análisis del porcentaje de tolerancia
8. Analice los resultados y determine las acciones a seguir si las hay.

Métodos de estudio del error R & R:

I. Método de Promedios - Rango

- Permite separar en el sistema de medición lo referente a la Reproducibilidad y a la Repetibilidad.
- Los cálculos son más fáciles de realizar.

II. Método ANOVA

- Permite separar en el sistema de medición lo referente a la Reproducibilidad y a la Repetibilidad.
- También proporciona información acerca de las interacciones de un operador y otro en cuanto a la parte.
- Calcula las varianzas en forma más precisa.
- Los cálculos numéricos requieren de una computadora.
 - ✓ El Método ANOVA es más preciso

Ejemplo 3.3 (MINITAB)

Método X Barra - R

Se seleccionan 10 muestras de un proceso de manufactura, cada parte es medida dos veces por tres operadores. Realice un estudio R&R mediante el método ANOVA.

| OPERADOR | A.- | | | B.- | | | C.- | | |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | columna 1 | Columna 2 | columna 3 | columna 4 | columna 5 | columna 6 | columna 7 | Columna 8 | columna 9 |
| Muestra | 1er Intento | 2do Intento | 3er Intento | 1er Intento | 2do Intento | 3er Intento | 1er Intento | 2do Intento | 3er Intento |
| 1 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0045 |
| 2 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0045 |
| 3 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0040 |
| 4 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 |
| 5 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0040 |
| 6 | 0.0050 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0060 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0050 |
| 7 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0050 |
| 8 | 0.0050 | 0.0050 | .0050 | .0050 | .0050 | .0050 | 0.0060 | 0.0050 | 0.0050 |
| 9 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0050 | 0.0055 | 0.0045 | 0.0045 |
| 10 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0045 | 0.0045 |
| Totales | 0.0470 | 0.0475 | 0.0455 | 0.0485 | 0.0465 | 0.0465 | 0.0500 | 0.0470 | 0.0460 |

Tabla 3.4 Datos para estudio Gage R & R

- Capture los datos en la hoja de trabajo de Minitab en tres columnas C1, C2, C3

| Partes | Operadores | Medición | Partes | Operadores | Medición | Partes | Operadores | Medición |
|--------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|
| 1 | 1 | 0.0045 | 1 | 2 | 0.0045 | 1 | 3 | 0.005 |
| 2 | 1 | 0.0045 | 2 | 2 | 0.0055 | 2 | 3 | 0.0055 |
| 3 | 1 | 0.0045 | 3 | 2 | 0.0045 | 3 | 3 | 0.0045 |
| 4 | 1 | 0.005 | 4 | 2 | 0.005 | 4 | 3 | 0.005 |
| 5 | 1 | 0.0045 | 5 | 2 | 0.004 | 5 | 3 | 0.0045 |
| 6 | 1 | 0.005 | 6 | 2 | 0.006 | 6 | 3 | 0.005 |
| 7 | 1 | 0.005 | 7 | 2 | 0.0055 | 7 | 3 | 0.0045 |
| 8 | 1 | 0.005 | 8 | 2 | 0.005 | 8 | 3 | 0.006 |
| 9 | 1 | 0.005 | 9 | 2 | 0.0045 | 9 | 3 | 0.0055 |
| 10 | 1 | 0.004 | 10 | 2 | 0.004 | 10 | 3 | 0.0045 |
| 1 | 1 | 0.0045 | 1 | 2 | 0.0045 | 1 | 3 | 0.0045 |
| 2 | 1 | 0.0055 | 2 | 2 | 0.005 | 2 | 3 | 0.0045 |
| 3 | 1 | 0.0045 | 3 | 2 | 0.0045 | 3 | 3 | 0.0045 |
| 4 | 1 | 0.005 | 4 | 2 | 0.005 | 4 | 3 | 0.005 |
| 5 | 1 | 0.0045 | 5 | 2 | 0.0045 | 5 | 3 | 0.0045 |
| 6 | 1 | 0.0055 | 6 | 2 | 0.005 | 6 | 3 | 0.005 |
| 7 | 1 | 0.0045 | 7 | 2 | 0.0045 | 7 | 3 | 0.005 |
| 8 | 1 | 0.005 | 8 | 2 | 0.005 | 8 | 3 | 0.005 |
| 9 | 1 | 0.0045 | 9 | 2 | 0.0045 | 9 | 3 | 0.0045 |
| 10 | 1 | 0.004 | 10 | 2 | 0.004 | 10 | 3 | 0.0045 |
| 1 | 1 | 0.0045 | 1 | 2 | 0.0045 | 1 | 3 | 0.0045 |
| 2 | 1 | 0.0045 | 2 | 2 | 0.0045 | 2 | 3 | 0.0045 |
| 3 | 1 | 0.0045 | 3 | 2 | 0.0045 | 3 | 3 | 0.004 |
| 4 | 1 | 0.0045 | 4 | 2 | 0.005 | 4 | 3 | 0.005 |
| 5 | 1 | 0.0045 | 5 | 2 | 0.004 | 5 | 3 | 0.004 |
| 6 | 1 | 0.0045 | 6 | 2 | 0.005 | 6 | 3 | 0.005 |
| 7 | 1 | 0.0045 | 7 | 2 | 0.005 | 7 | 3 | 0.005 |
| 8 | 1 | 0.005 | 8 | 2 | 0.005 | 8 | 3 | 0.005 |
| 9 | 1 | 0.005 | 9 | 2 | 0.005 | 9 | 3 | 0.0045 |
| 10 | 1 | 0.004 | 10 | 2 | 0.004 | 10 | 3 | 0.0045 |

Tabla 3.5 Datos para estudio Gage R & R Minitab

- Seleccione en el menú de la barra de herramientas **STAT>QUALITY TOOLS>GAGE STUDY > Gage R&R (Crossed)**
- Seleccione C1 (parte), C2 (operador), C3 (Medición)
- Método de Análisis **X Bar and R**
- En Options Seleccionar: Staudy variation 5.15 Procesa tolerante 0.006.

Los resultados se muestran a continuación:

Gage R&R Study - XBar/R Method

| Source | Var Comp | %Contribution (of Var Comp) |
|-----------------|-----------|--------------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0000001 | 41.00 |
| Repeatability | 0.0000001 | 40.52 |
| Reproducibility | 0.0000000 | 0.48 |
| Part-To-Part | 0.0000001 | 59.00 |
| Total Variation | 0.0000001 | 100.00 |

| Source | Std Dev (SD) | Study Var (5.15 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.000247 | 0.0012750 | 64.03 | 21.25 |
| Repeatability | 0.0002461 | 0.0012675 | 63.65 | 21.12 |
| Reproducibility | 0.0000269 | 0.0001384 | 6.95 | 2.31 |
| Part-To-Part | 0.0002970 | 0.0015295 | 76.81 | 25.49 |
| Total Variation | 0.0003867 | 0.0019913 | 100.00 | 33.19 |

Number of Distinct Categories = 1

Gage R&R for Datos:

Análisis de los resultados:

El error de R & R vs tolerancia es 64.03% y vs variación total del proceso es 21.25% lo que hace que el equipo de medición no sea adecuado para la medición.

Por otro lado el número de categorías es sólo de 1 cuando debe ser al menos 4 indicando que el instrumento discrimina las diversas partes diferentes.

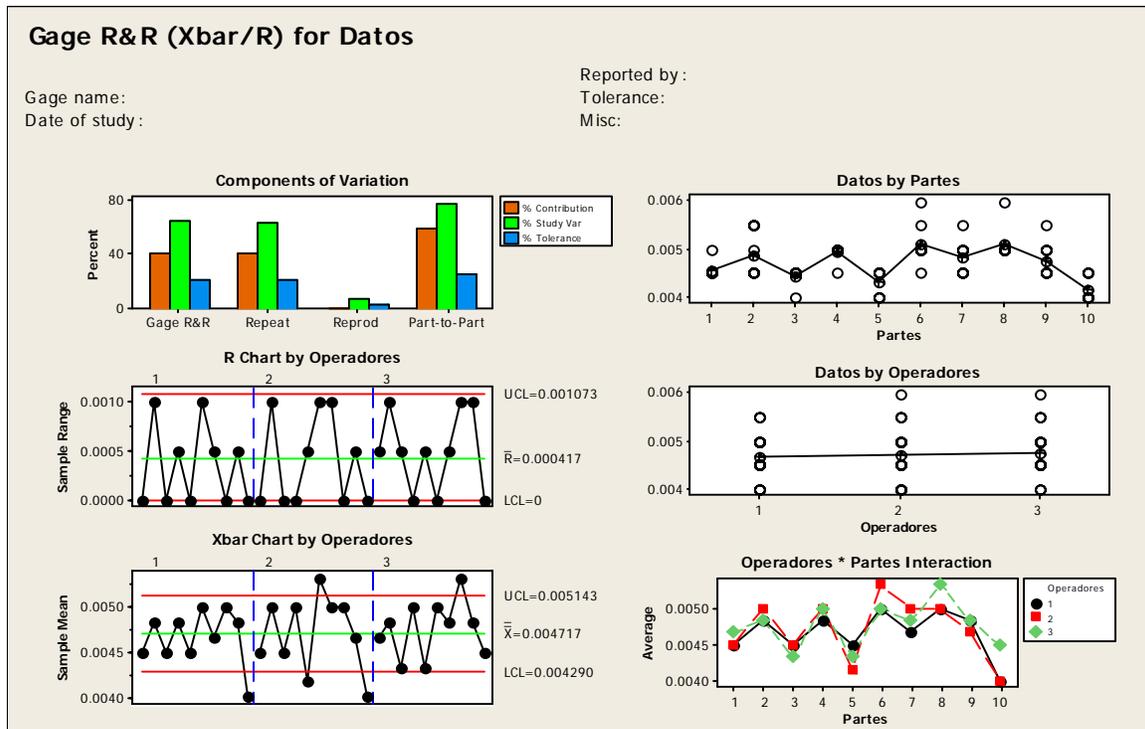


Figura 3.12 Gráfica de Minitab

- La gráfica R se mantiene en control indicando que las mediciones se realizaron en forma adecuada.
- La gráfica X barra sólo presenta 5 de 30 puntos fuera de control, lo cual debería ser al menos el 50%, indicando que el equipo no discrimina las diferentes partes.

Linealidad del instrumento de medición

La Linealidad del Gage indica que tan exacto son las mediciones a través del rango esperado de estas. Se pregunta ¿el instrumento de medición tiene la misma exactitud para todos los tamaños de objetos a medir?

El bias o exactitud del gage examina la diferencia entre la media de los datos observados y un valor de referencia o patrón. Contesta a la pregunta, ¿Qué tan exacto es mi gage comparado con un patrón?

Ejemplo 3.4:

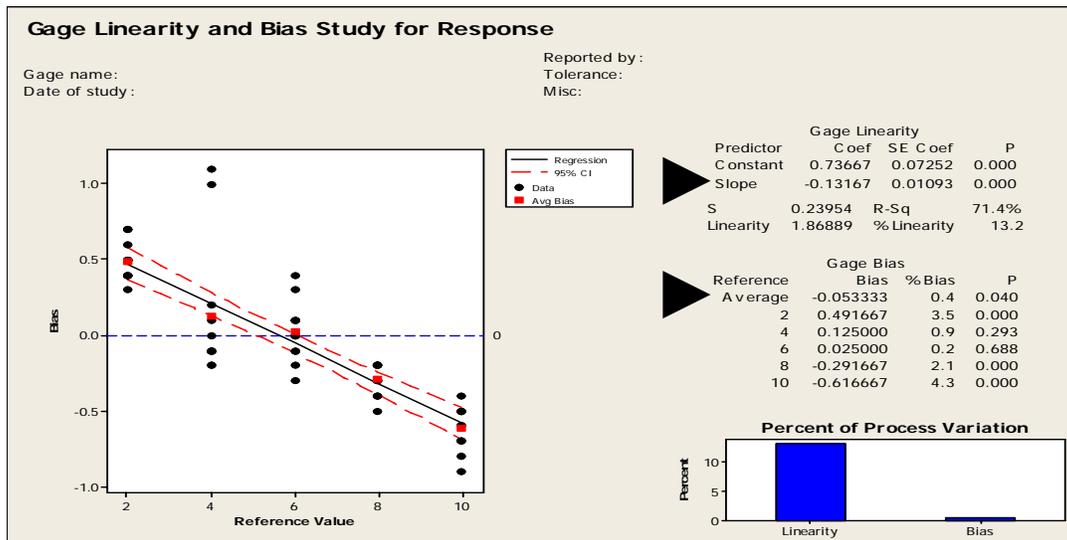
Se seleccionan 5 partes que tienen el rango esperado de las mediciones. Cada parte fue medida por un inspector para determinar su valor de referencia. Un operador mide aleatoriamente cada parte 10 veces.

Se obtiene la variación del proceso (14.1941) del estudio Gage R&R usando el método ANOVA (renglón Total variation de la columna Study Var (6*SD)).

| Part | Master | Response | Part | Master | Response |
|------|--------|----------|------|--------|----------|
| 1 | 2 | 2.7 | 3 | 6 | 6 |
| 1 | 2 | 2.5 | 3 | 6 | 6.1 |
| 1 | 2 | 2.4 | 3 | 6 | 6.4 |
| 1 | 2 | 2.5 | 3 | 6 | 6.3 |
| 1 | 2 | 2.7 | 3 | 6 | 6 |
| 1 | 2 | 2.3 | 3 | 6 | 6.1 |
| 1 | 2 | 2.5 | 4 | 8 | 7.6 |
| 1 | 2 | 2.5 | 4 | 8 | 7.7 |
| 1 | 2 | 2.4 | 4 | 8 | 7.8 |
| 1 | 2 | 2.4 | 4 | 8 | 7.7 |
| 1 | 2 | 2.6 | 4 | 8 | 7.8 |
| 1 | 2 | 2.4 | 4 | 8 | 7.8 |
| 2 | 4 | 5.1 | 4 | 8 | 7.8 |
| 2 | 4 | 3.9 | 4 | 8 | 7.7 |
| 2 | 4 | 4.2 | 4 | 8 | 7.8 |
| 2 | 4 | 5 | 4 | 8 | 7.5 |
| 2 | 4 | 3.8 | 4 | 8 | 7.6 |
| 2 | 4 | 3.9 | 4 | 8 | 7.7 |
| 2 | 4 | 3.9 | 5 | 10 | 9.1 |
| 2 | 4 | 3.9 | 5 | 10 | 9.3 |
| 2 | 4 | 3.9 | 5 | 10 | 9.5 |
| 2 | 4 | 4 | 5 | 10 | 9.3 |
| 2 | 4 | 4.1 | 5 | 10 | 9.4 |
| 2 | 4 | 3.8 | 5 | 10 | 9.5 |
| 3 | 6 | 5.8 | 5 | 10 | 9.5 |
| 3 | 6 | 5.7 | 5 | 10 | 9.5 |
| 3 | 6 | 5.9 | 5 | 10 | 9.6 |
| 3 | 6 | 5.9 | 5 | 10 | 9.2 |
| 3 | 6 | 6 | 5 | 10 | 9.3 |
| 3 | 6 | 6.1 | 5 | 10 | 9.4 |

Con Minitab

- 1 File > Open worksheet > GAGELIN.MTW.
- 2 Seleccionar Stat > Quality Tools > Gage Study > Gage Linearity and Bias Study.
- 3 En **Part numbers**, seleccionar *Part*.
- 4 En **Reference values**, seleccionar *Master*.
- 5 En **Measurement data**, seleccionar *Response*.
- 6 En **Process Variation**, teclear 14.1941. Click **OK**.



Interpretando los resultados

- El porcentaje de linealidad (valor absoluto de la pendiente * 100) es 13.2, que significa que la Linealidad del gage es del 13% de la variación total.
- El porcentaje de sesgo para el promedio de referencia es 0.4, lo que significa que el sesgo del gage es menor que 0.4% de la variación total observada.

3.6 La Distribución Normal

La distribución normal es una de las distribuciones más usadas e importantes. Se ha desarrollado como una herramienta indispensable en cualquier rama de la ciencia, la industria y el comercio. Muchos eventos reales y naturales tienen una distribución de frecuencias cuya forma es muy parecida a la distribución normal.

La distribución normal es llamada también campana de Gauss por su forma acampanada.

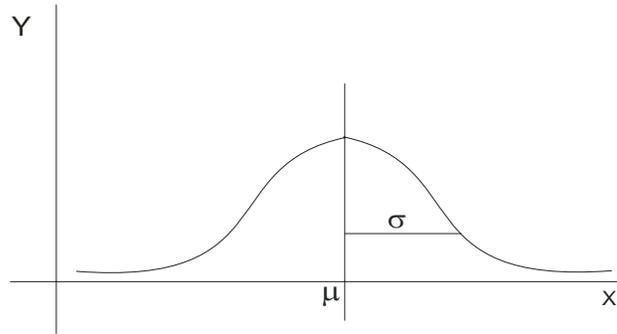


Figura 3.13 Características de una Distribución Normal

Propiedades de la distribución normal

- La distribución normal tiene forma de campana.
- La distribución normal es una distribución de probabilidad que tiene media $\mu = 0$ y desviación estándar $\sigma = 1$.
- El área bajo la curva o la probabilidad desde menos infinito a más infinito vale 1.
- La distribución normal es simétrica
- La escala horizontal de la curva se mide en desviaciones estándar.
- La forma y la posición de una distribución normal dependen de los parámetros μ y σ .

La relación del porcentaje de población y la desviación estándar. En la figura 3.14, observamos que el área bajo la curva para $\pm 1\sigma$ tiene un porcentaje de 68.26%, a $\pm 2\sigma = 95.46\%$ y a $\pm 3\sigma = 99.73\%$.

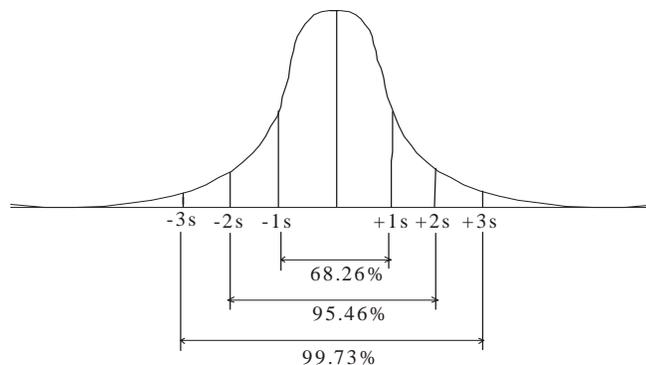


Figura 3.14 Porcentajes del área bajo la curva

La población incluye todos los datos, la muestra es una porción de ésta.

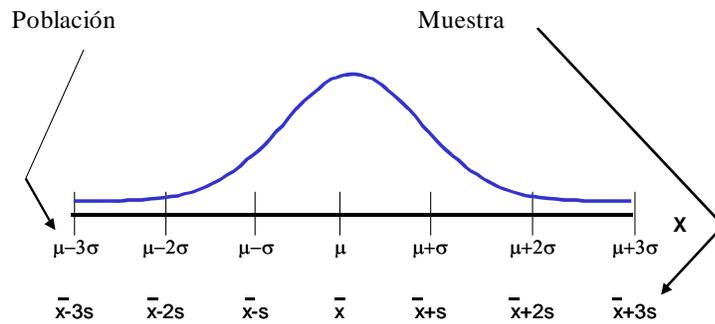


Figura 3.15 Diferencias entre parámetros

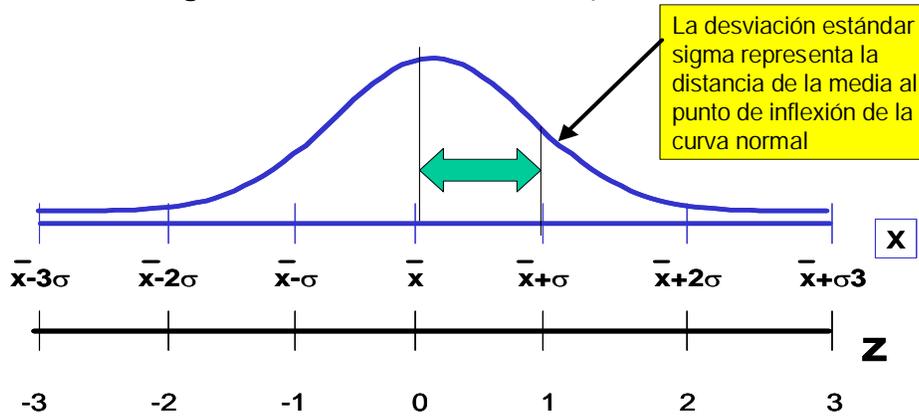


Figura 3.16 Desplazamientos con base en las desviaciones estándar

La distribución normal estándar

El valor de z

Determina el número de desviaciones estándar σ entre algún valor X y la *media de la población* μ . Para calcular el valor de Z usamos la siguiente fórmula.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma}$$

La distribución de probabilidad $f(Z)$ es una distribución normal con media 0 y desviación estándar 1; esto es Z se distribuye normalmente con media cero y desviación estándar = 1 $Z \sim N(0,1)$: La gráfica de densidad de probabilidad se muestra en la figura.

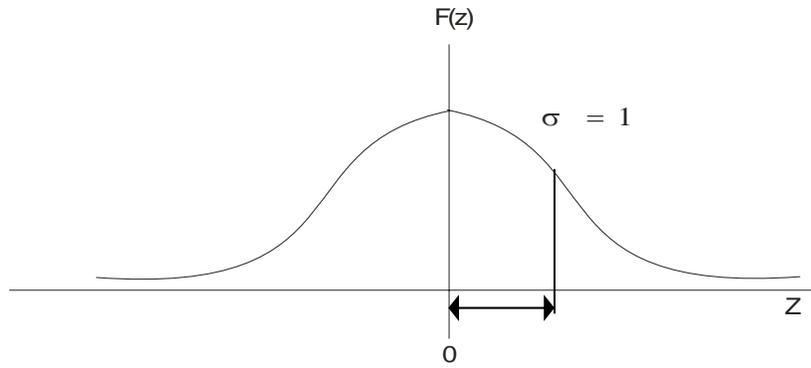


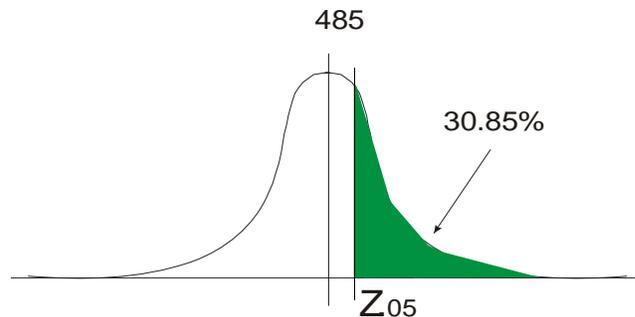
Figura 3.17 Correlación con la distribución Normal

La distribución $f(Z)$ se encuentra tabulada en la tabla de distribución normal estándar. En esta tabla podemos determinar los valores de Z o la probabilidad de determinado valor Z .

Ejemplo 3.5 : El gerente de personal de una compañía requiere que los solicitantes efectúen cierta prueba y alcancen una calificación de 500. Si las calificaciones de la prueba se distribuyen normalmente con media $\mu = 485$ y desviación estándar $\sigma = 30$ ¿Qué porcentaje de los solicitantes pasará la prueba? Calculando el valor de Z obtenemos:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} = \frac{500 - 485}{30} = 0.5$$

Buscamos el valor de Z en las tabla de dist. normal. $Z_{0.5} = 0.69146 = 69.146\%$. siendo la probabilidad de que la calificación sea menor a 500 $P(X < 500)$. Dado que el porcentaje pedido es $P(X \geq 500)$ la solución es $1 -$



$0.69146 = 0.3085$, 30.85% de los participantes pasarán la prueba.

Figura 3.18 Representación de la solución

Ejemplo 3.6:

Encuentre las probabilidades siguientes usando la tabla Z.

a) $P(-1.23 < Z < 0)$

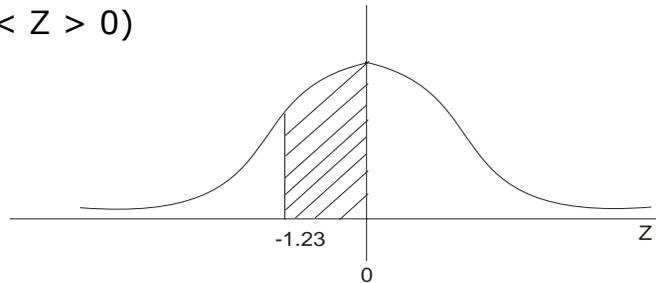


Figura 3.19 Representación de la solución

Solución: Buscamos el valor $Z_{1..23}$ en las tablas siendo este = .89065. restando $.89065 - .05 = .3905$, este valor es la probabilidad de 0 a 1.23 que es exactamente la misma de -1.23 a 0 por simetría. Por lo tanto la probabilidad es .3905

Uso de la distribución normal en Excel

- Para calcular la probabilidad dado un valor Z procedemos de la siguiente manera:

- En la barra de herramientas seleccione el icono de funciones

fx > Estadísticas > Distr. Norm. Estand (-Z) OK

- Seleccione la celda que contiene el valor de Z, que en este caso es $Z = 1.3$, de clic en aceptar y aparecerá la probabilidad buscada $P(z) = 0.903199$

- Para calcular Z dada una probabilidad $f(z)$

En la barra de herramientas seleccione el icono de funciones

fx > Estadísticas > Distr. Norm. Estand. inv(probabilidad) OK

- De clic en aceptar. Procedemos de la misma manera que en el caso anterior, pero en esta ocasión seleccionamos la probabilidad 0.93319

El valor Z = 1.4999

- Cuando no tenemos valores de Z ni probabilidad.

Ejemplo 3.7:

Suponga que una distribución normal tiene una media de 20 y una desviación estándar de 4. calcule la probabilidad $P(X > 24)$.

En la barra de herramientas seleccione el icono de funciones

fx>Estadísticas>Distr.Norm.Estand(4). OK

El sistema muestra la siguiente ventana, en la cual llenamos los siguientes datos:

El resultado de la fórmula = 0.97724. , dado que esta es la probabilidad $P(X \leq 24)$, la probabilidad buscada

$$P(X > 24) = 1 - 0.8413 = 0.1587$$

Para cálculos utilizando el paquete Minitab, usar:

1. Calc >Probability Distributions >Normal
2. Indicar **Cumulative Distribution** o **inverse Cumulative Distribution** (dando valores de Z se obtienen valores de área) o Inverse Cumulative Distribution (dando áreas proporciona los valores de Z).
3. En **Input constant** indicar el valor de Z (cumulative) para obtener el área bajo la curva o proporcionar el área bajo la curva (Inverse cumulative) para obtener el valor de Z. OK
4. Si se especifica una columna Cx para almacenamiento de los resultados, estos no se muestran automáticamente, para verlos
5. es necesario ejecutar la opción **>Manip >Display Data**

3.7 Capacidad de procesos normales

Al planear los aspectos de calidad de la manufactura, es sumamente importante asegurarse de antemano de que el proceso será capaz de mantener las tolerancias. En las décadas recientes ha surgido el

concepto de capacidad del proceso ó habilidad del proceso, que proporciona una predicción cuantitativa de qué tan adecuado es un proceso. La habilidad del proceso es la variación medida, inherente del producto que se obtiene en ese proceso.

Definiciones básicas.

- **Proceso:** Éste se refiere a alguna combinación única de máquinas, herramientas, métodos, materiales y personas involucradas en la producción.
- **Capacidad o habilidad:** Esta palabra se usa en el sentido de aptitud, basada en el desempeño probado, para lograr resultados que se puedan medir.
- **Capacidad del proceso:** Es la aptitud del proceso para producir productos dentro de los límites de especificaciones de calidad.
- **Capacidad medida:** Se refiere al hecho de que la capacidad del proceso se cuantifica a partir de datos que, a su vez, son el resultado de la medición del trabajo realizado por el proceso.
- **Capacidad inherente:** Se refiere a la uniformidad del producto que resulta de un proceso que se encuentra en estado de control estadístico, es decir, en ausencia de causas especiales o atribuibles de variación.
- **Variabilidad natural:** Los productos fabricados nunca son idénticos sino que presentan cierta variabilidad, cuando el proceso está bajo control, solo actúan las causas comunes de variación en las características de calidad.
- **Valor Nominal:** Las características de calidad tienen un valor óptimo que es el que desearíamos que tuvieran todas las partes fabricadas pero que no se obtiene, aunque todo funcione correctamente, debido a la existencia de la variabilidad natural.

Objetivos²⁴

1. Predecir en que grado el proceso cumple especificaciones.
2. Apoyar a diseñadores de producto o proceso en sus modificaciones.
3. Especificar requerimientos de desempeño para el equipo nuevo.
4. Seleccionar proveedores.
5. Reducir la variabilidad en el proceso de manufactura.
6. Planear la secuencia de producción cuando hay un efecto interactivo de los procesos en las tolerancias.

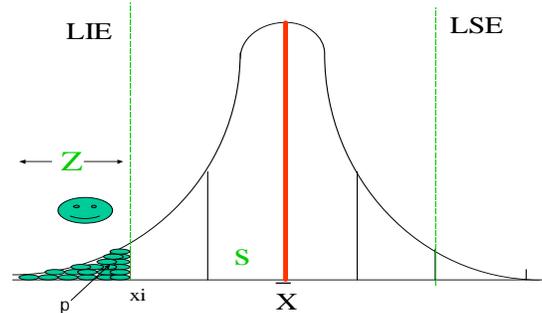


Figura 3.20 Piezas dentro de especificación

p = porcentaje de medidas bajo la curva de probabilidad fuera de especificaciones.

Partes fuera de especificaciones

En el área sombrada observamos medidas fuera de los límites de especificación.

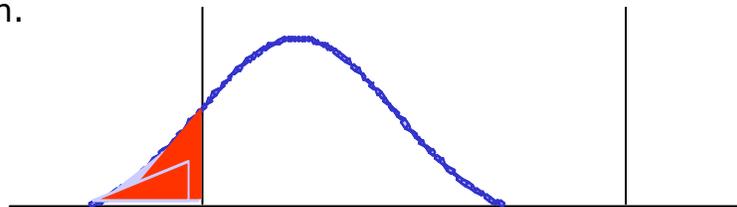


Figura 3.21 Piezas fuera de especificación

Para solucionar este problema, podemos reducir la desviación estándar.



Figura 3.22 Reducción de la Desviación estándar

También podríamos cambiar la media.

²⁴ Douglas C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control, Second Edition, p 307, México, 2005

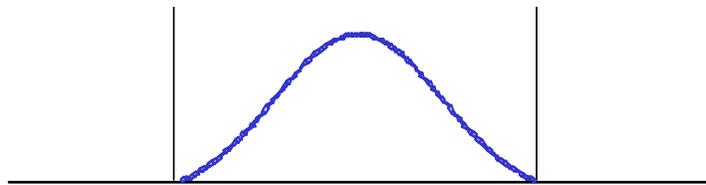


Figura 3.23 Centrando la Media

Lo ideal sería, por supuesto cambiar ambas.

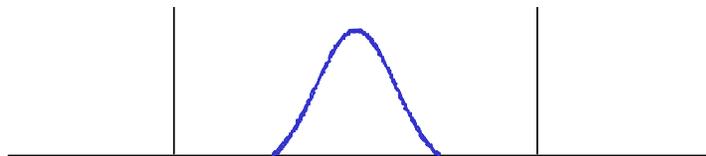


Figura 3.24 Ajustando ambas

Condiciones para realizar un estudio de capacidad del proceso

Para realizar un estudio de capacidad es necesario que se cumplan los siguientes supuestos²⁵:

- El proceso se encuentre bajo control estadístico, es decir sin la influencia de fuerzas externas o cambios repentinos. Si el proceso está fuera de control la media y/o la desviación estándar del proceso no son estables y, en consecuencia, su variabilidad será mayor que la natural y la capacidad potencial estará infravalorada, en este caso no es conveniente hacer un estudio de capacidad.
- Se recolectan suficientes datos durante el estudio de habilidad para minimizar el error de muestreo para los índices de habilidad. Si los datos se componen de menos de 100 valores, entonces deben calcularse los límites de confianza inferiores.
- Los datos se recolectan durante un periodo suficientemente largo para asegurar que las condiciones del proceso presentes durante el estudio sean representativas de las condiciones actuales y futuras.
- El parámetro analizado en el estudio sigue una distribución de probabilidad normal, de otra manera, los porcentajes de los productos asociados con los índices de capacidad son incorrectos.

²⁵ J. M. Juran, Análisis y planeación de la Calidad, Tercera Edición Mc. Graw Hill, p.404, México, 1998

También es importante al realizar un estudio de capacidad, asegurarnos que la **variación en el sistema de medición** no sea mayor al 10%.

Variación a corto plazo y a largo plazo

Existen dos maneras de expresar la variabilidad:

Variación a corto plazo (Z_{st}).- Los datos son recogidos durante un periodo de tiempo suficientemente corto para que sea improbable que haya cambios y otras causas especiales.

Las familias de variación han sido restringidas de tal manera que los datos considerados, sólo son los que se obtuvieron del subgrupo racional. Ayuda a determinar subgrupos racionales importantes.

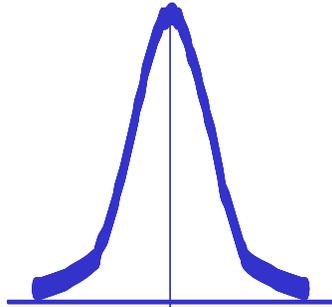


Figura 3.25 Variación a Corto plazo

Variación a Largo Plazo(Z_{lt}).= Los datos se colectan durante un periodo de tiempo suficientemente largo y en condiciones diversas para que sea probable que contenga algunos cambios de proceso y otras causas especiales. Aquí todas las familias de variación exhiben su contribución en la variación del proceso general.

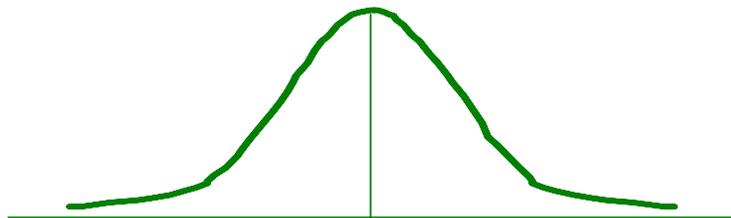


Figura 3.26 Variación a largo plazo

Para el cálculo de Z utilizamos las siguientes formulas:

$$Z_{st} = \frac{(\text{l\u00edmite especif.} - \text{nom.})}{\text{desv.std}_{ST}} \quad (3.1)$$

$$Z_{LT} = \frac{\text{l\u00edmite especif.} - \text{media}}{\text{desv.std}_{LT}} \quad (3.2)$$

d\u00f3nde:

Z_{st} = variaci\u00f3n a corto plazo.

nom = Valor nominal u objetivo

Z_{lt} = variaci\u00f3n a largo plazo.

Z shift.- A largo plazo los procesos tienen un desplazamiento natural de 1.5 desviaciones est\u00e1ndar.

$$Z_{lt} = Z_{st} - 1.5 \text{shift}$$

C\u00e1lculo de la capacidad del proceso:

Para calcular la habilidad o capacidad potencial utilizamos la siguiente f\u00f3rmula:

$$C_p = \frac{(LSE - LIE)}{6S} \quad (3.3)$$

donde:

C_p = capacidad potencial

LSE = l\u00edmite superior de especificaciones

LIE = l\u00edmite inferior de especificaciones

S = desviaci\u00f3n est\u00e1ndar

El \u00edndice C_p debe ser ≥ 1.6 para tener el potencial de cumplir con especificaciones (LIE, LSE)

Para calcular la habilidad o capacidad real utilizamos la siguiente f\u00f3rmula:

$$C_{pk} = \frac{\text{menor} |Z_I, Z_S|}{3} \quad (3.4)$$

Para que el proceso cumpla con las especificaciones el Cpk debe de ser ≥ 1.33

Capacidad del proceso a partir de histogramas

Procedimiento:

1. Seleccionar un proceso específico para realizar el estudio
2. Seleccionar las condiciones de operación del proceso
3. Seleccionar un operador entrenado
4. El sistema de medición debe tener habilidad (error R&R < 10%)
5. Cuidadosamente recolectar la información
6. Construir un histograma de frecuencia con los datos
7. Calcular la media y desviación estándar del proceso
8. Calcular la capacidad del proceso.

Ejemplo 3.8 Capacidad de proceso a partir de histogramas

Observamos que el histograma tiene forma normal.

Calculando la media y la desviación estándar tenemos:

$$\bar{X} = 264.06 \quad \mathbf{S} = \mathbf{32.02}$$

La variabilidad del proceso se encuentra en $6s = 192.12$

Si las especificaciones fueran LIE = 200 y LSE = 330

$$C_p = \frac{(LSE - LIE)}{6S} = \frac{(330 - 200)}{192.2} = .67 < 1, \text{ el proceso no es hábil.}$$

$$Z_i = \frac{(330 - 264.06)}{32.02} = 2.06 \quad Z_s = \frac{(200 - 264.06)}{32.02} = -2$$

Cpk = menor de Z_i y $Z_s = -2 < 1$, por lo tanto proceso no cumple especificaciones.

Capacidad a partir de cartas de control

En casos especiales como estos donde las variaciones presentes son totalmente inesperadas tenemos un proceso **inestable** ó **impredecible**.

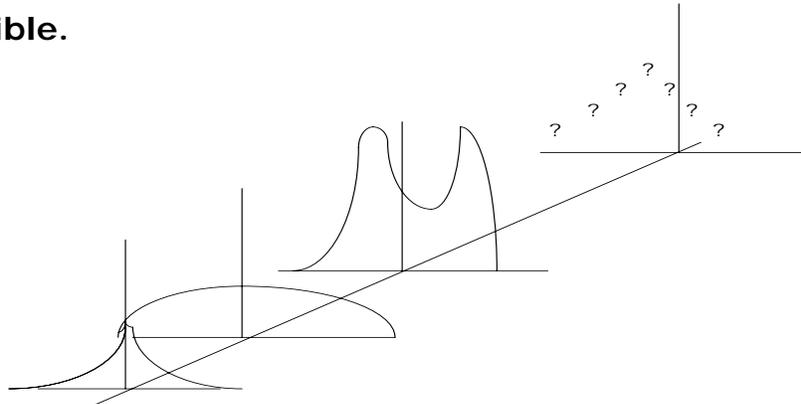


Figura 3.27 Capacidad no predecible por alta variación

Si las variaciones presentes son iguales, se dice que se tiene un proceso **estable**. La distribución será **predecible** en el tiempo.

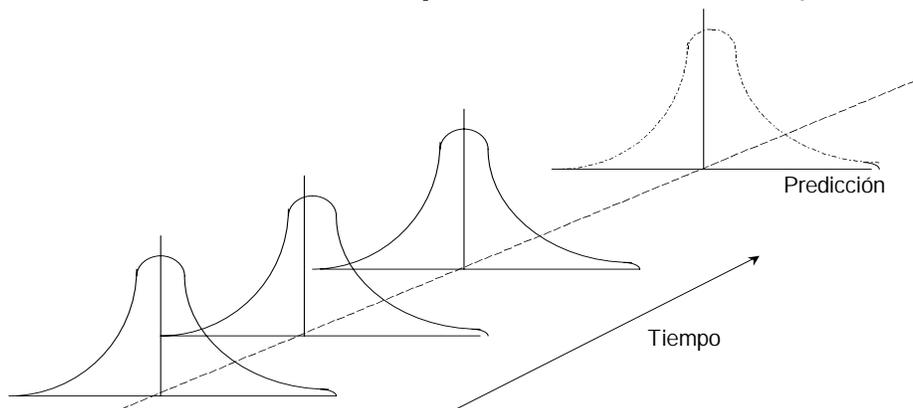


Figura 3.28 Capacidad predecible por baja variación

Cálculo de la desviación estándar del proceso

$$\sigma = \frac{R}{d_2} \quad \text{ó} \quad \sigma = \frac{S}{C_4} \quad (\text{Para cartas de control X-R y X-S respectivamente})$$

Donde,

S = Desviación estándar de la población

d2 = Factor que depende del tamaño del subgrupo en la carta de control

X - R

C4 = Ídem al anterior para una carta X - S

En una carta por individuales, d_2 se toma para $n = 2$ y Rango Medio =
Suma rangos / (n -1)

Ejemplo 3.9 (carta X - R):

De una carta de control X - R (con subgrupo $n = 5$) se obtuvo lo siguiente, después de que el proceso se estabilizó quedando sólo con causas comunes: $\bar{\bar{x}} = 64.06$, $\bar{R} = 77.3$

Por tanto estimando los parámetros del proceso se tiene:

$$\mu = \bar{\bar{x}}(\text{media de medias})$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{77.3}{2.326} = 33.23$$

Si el límite de especificación es: LIE = 200.

El $C_{pk} = \frac{(200 - 264.06)}{3 \times 33.23} = 0.64$ por tanto el proceso no cumple con las especificaciones.

Capacidad de procesos en Minitab

Nos aseguramos que los datos se distribuyan normalmente con la prueba de Ryan como sigue:

- 1. Stat > Basic statistics > Normality Test**
- 2. Variable C1 Seleccionar Ryan Joiner test OK**

El P value debe ser mayor a 0.05 para que los datos se distribuyan normalmente ver Figura 3.29.

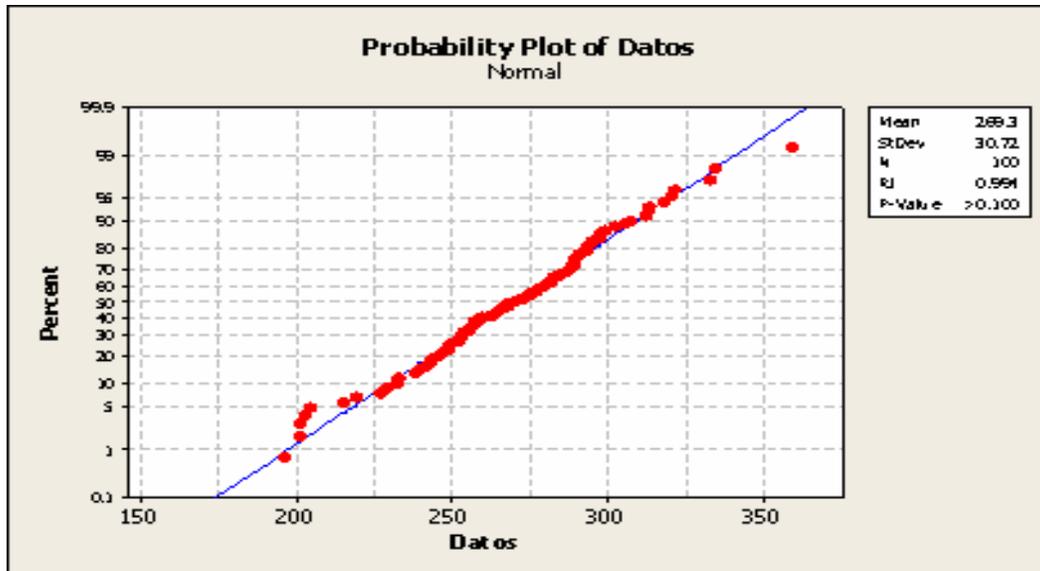


Figura 3.29 Prueba de Normalidad

Otra opción por medio de una gráfica de probabilidad normal, se tiene:

3. Graph > Probability plot > Normal

4. Graph Variable C1

5. Distribution Normal OK

Los puntos deben quedar dentro del intervalo de confianza para indicar que es normal la distribución.

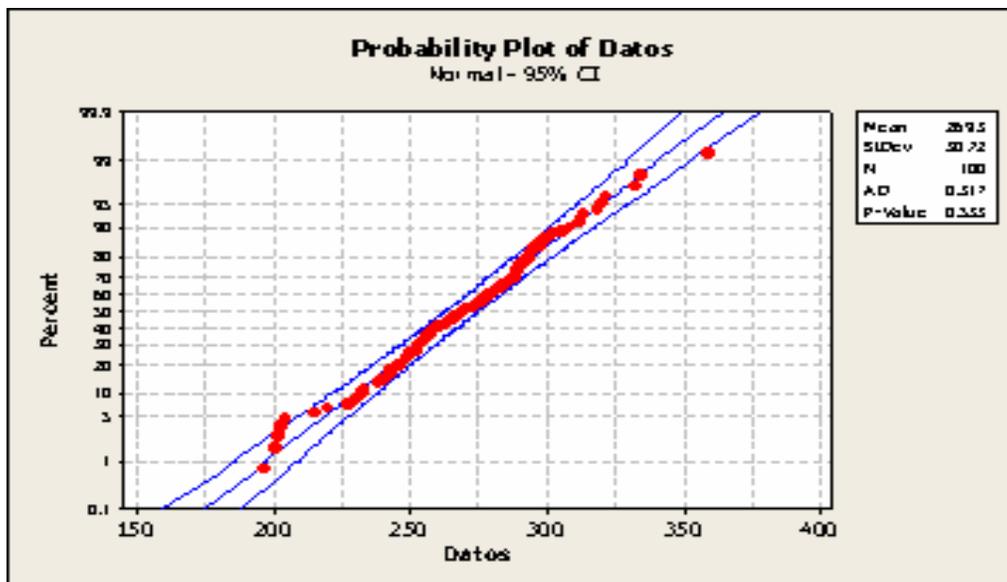


Figura 3.30 Prueba de Normalidad con intervalos de confianza

Determinación de la capacidad del proceso

Una vez comprobada la normalidad de los datos, determinar la capacidad con:

1. Stat > Quality tools > Capability analysis > Normal
2. Single column C1 Subgroup size 1 Lower Spec 200
Upper spec 330
3. Estimate R-bar OK

Los resultados se muestran a continuación en la Figura 3.31:

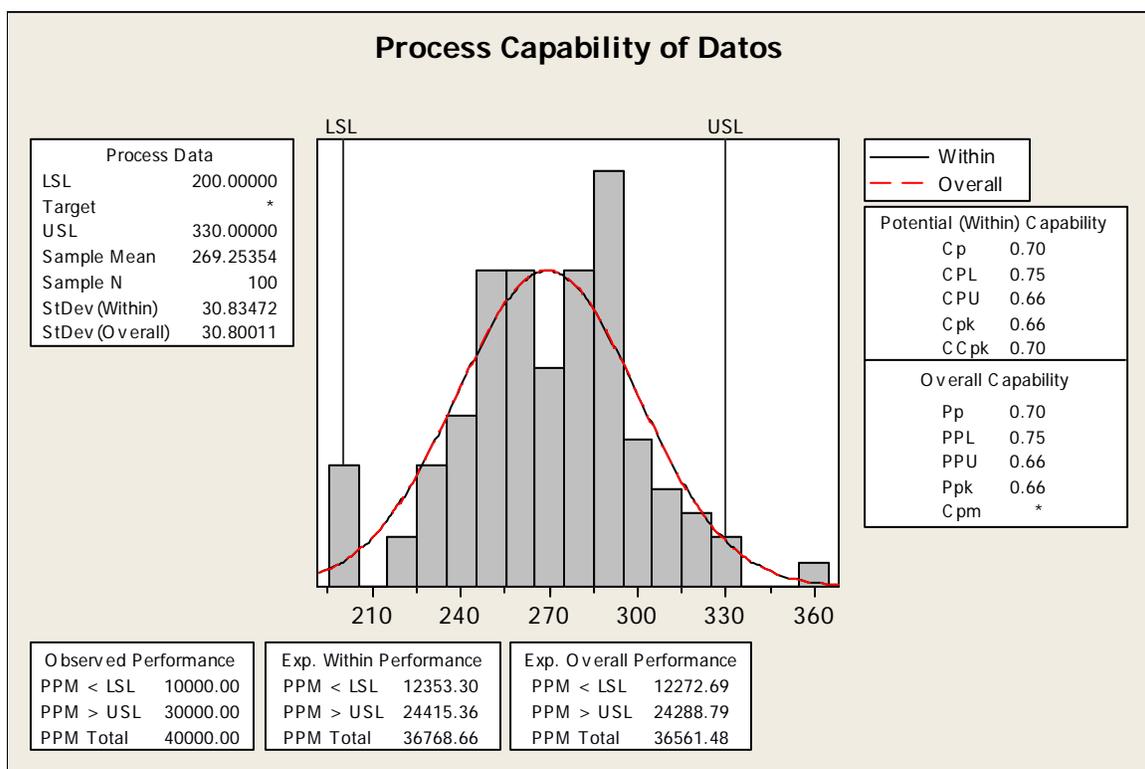


Figura 3.31 Capacidad de Proceso

Interpretación:

La desviación estándar Within se determina en base al Rango medio y d_2 (1.128 para $n = 2$), con esta se determinan los índices de capacidad potencial C_p y C_{pk} , así como el desempeño Within, lo cual es adecuado para un proceso en control o normal.

La desviación estándar Overall se determina con la desviación estándar de todos los datos de la muestra dividido entre el factor $C4 = 4(n-1)/(4n - 3)$, con esta desviación estándar se determinan los índices de desempeño Pp y Ppk así como el desempeño Overall, no importando si el proceso está en control o no, en este último caso los valores no tienen significado práctico.

Opción Six Pack para mostrar toda la información relevante:

Determinar la capacidad con:

4. Stat > Quality tools > Capability Six Pack > Normal
5. Single column C1 Subgroup size 5 Lower Spec 200 Upper spec 330
6. Estimate R-bar OK

Los resultados se muestran en la Figura 3.32:

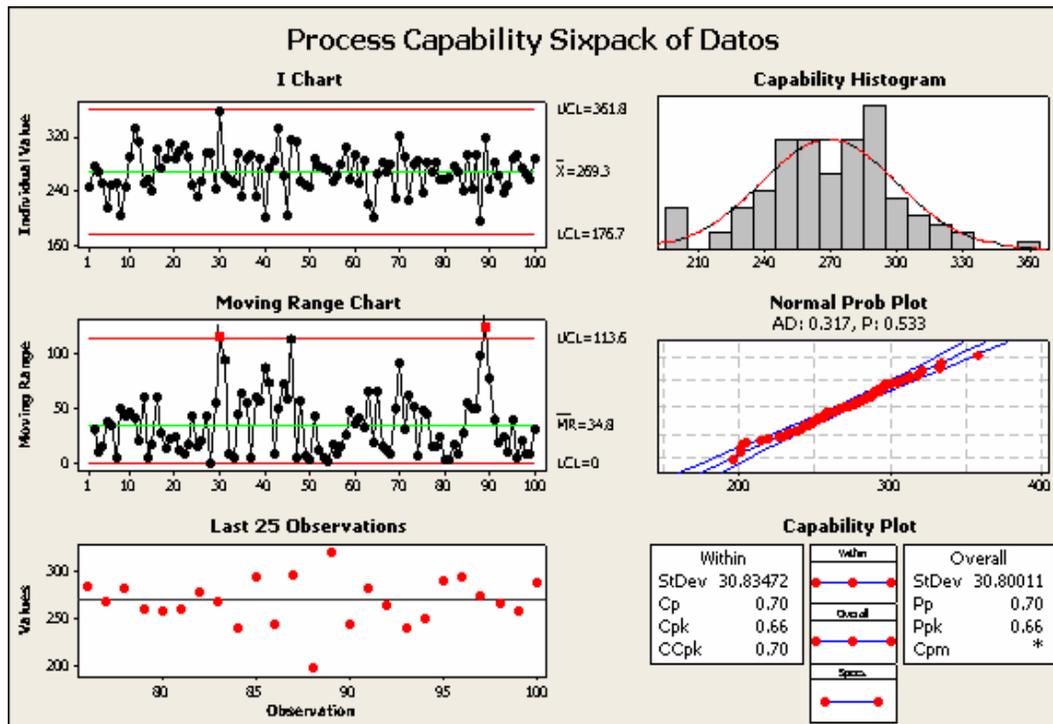


Figura 3.32 Habilidad del Proceso

En este caso de la gráfica de probabilidad normal, los datos siguen una distribución normal.

3.8 Capacidad de procesos no normales.

Cuando los datos provienen de poblaciones no normales una opción para realizar el estudio de capacidad de procesos es mediante la distribución Weibull.

Ejemplo en Minitab 3.10

En una compañía se manufacturan losetas para piso, el problema que se tiene es referente a la deformación en las mismas. Se toman 100 mediciones durante 10 días. El límite superior de especificación (USL) = 3.5 mm. Realice un estudio de capacidad con la ayuda de Minitab e interprete los resultados.

Generar 100 datos aleatorios en Minitab con Factor de forma = 1, Factor de escala = 1 con

7. Calc > Random data > Weibull

**8. Generate 100 Store in columns C1 Shape parameter 1.2
Scale parameter 1 Threshold parameter 0 OK**

Considerando Límites de especificaciones LIE = 0 y LSE = 3.5

Determinar la capacidad con:

9. Stat > Quality tools > Capability análisis > NoNormal

**10. Single column C1 Distribution Weibull Lower Spec 0
Upper spec 3.5**

11. Estimate R-bar OK

Los resultados se muestran en la Figura 3.33:

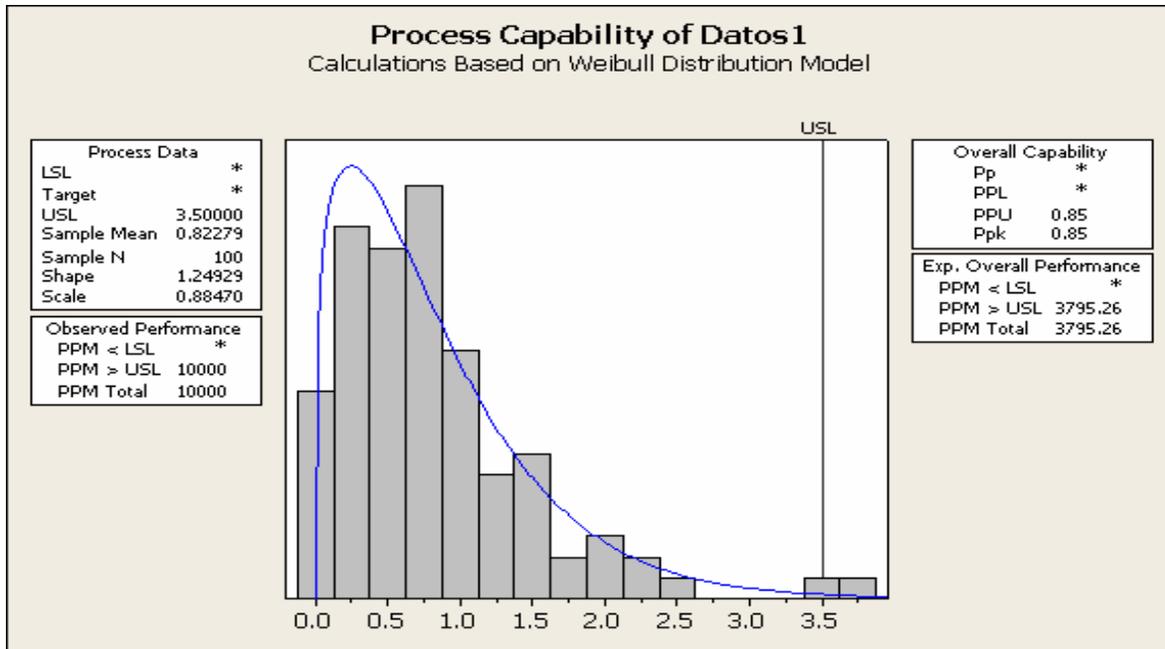


Figura 3.33 Distribución Weibull

El histograma no muestra evidencia de alguna discrepancia seria entre el modelo y los datos, ya que la curva muestra buen ajuste. Sin embargo observamos que algunos datos caen fuera del límite superior de especificación. Lo cual quiere decir que en algunos casos la deformación será mayor a 3.5 mm.

El índice Ppk y Ppu²⁶ = 0.85 lo cual nos dice que el proceso no es capaz ya que $0.85 < 1.33$

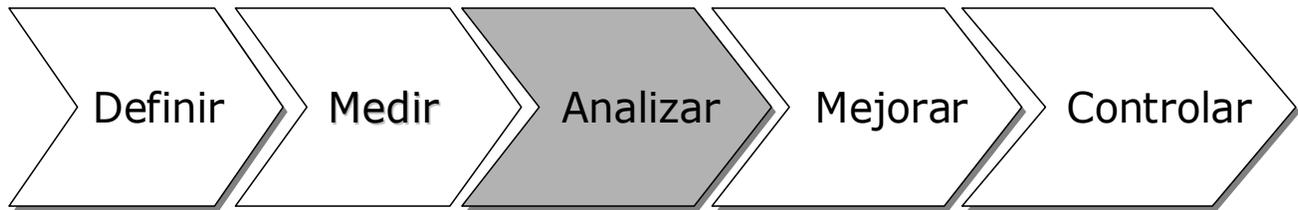
En la misma figura se puede observar que las PPM > USL son, 3795 lo cual significa que aproximadamente 3,795 PPM de nuestro producto estará fuera de especificación.

²⁶ Los índices Pp y Ppk son similares a los índices Cp y Cpk , se refieren a la capacidad del proceso a largo plazo.

Conclusiones

En este capítulo se han descrito las diferentes etapas de la fase de medición, se habló además, de la estadística básica aplicada a la fase de medición, se explicó del Análisis del Sistema de Medición que abarca el Gage R & R, así como la prueba de linealidad del instrumento de medición, se mostraron las características de la curva de distribución normal y por último, la forma del cálculo de procesos con comportamiento normal y aquellos que no son normales.

CAPÍTULO 4 FASE DE ANÁLISIS



4.1 Introducción

En esta fase se efectúa el análisis de los datos obtenidos en la etapa de Medición, con el propósito de conocer las relaciones causales o causas raíz del problema. La información de este análisis nos proporcionará evidencias de las fuentes de variación y desempeño insatisfactorio, el cual es de gran utilidad para la mejora del proceso.

Los objetivos de esta fase son:

- Determinar el nivel de desempeño del proceso actual.
- Identificar cuáles son las fuentes de variación. Por ejemplo mediante el análisis Multi-Vari podemos determinar las fuentes que presentan mayor variación, a través de la descomposición de los componentes de variabilidad del proceso. las cuáles pueden ser, por ejemplo: de lote a lote, dentro del lote, de turno a turno, entre turnos, dentro del turno, de máquina a máquina, dentro de la máquina, de operador a operador, dentro del operador, entre operadores, etc.
- Una vez identificadas las causas potenciales por medio de una lluvia de ideas y un diagrama de causa efecto, se realiza un proceso de validación estadística de las mismas apoyándose en Análisis de regresión, Pruebas de Hipótesis y Análisis de varianza.

Las herramientas incluidas en esta fase se muestran en la tabla 4.1:

| Herramienta | ¿Para qué es utilizada? |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capacidad del proceso. | Determinar cual es el desempeño del proceso para cumplir con los límites de especificaciones. |
| Mediciones para seis sigma | Mide la capacidad del proceso en términos cuantificables, revisándolo para su mejora a través del tiempo. |
| AMEF (<i>FMEA</i>) | Identificar las maneras en las cuales un proceso puede fallar para alcanzar los requerimientos críticos del cliente. Estimar el riesgo de las causas específicas en relación con estas fallas. |
| Intervalos de confianza y Pruebas de hipótesis | Herramienta utilizada para ser inferencias de la población a partir de una muestra. |
| Tablas de contingencia | Comparación de valores esperados vs observados. |
| Análisis Multivari | El objetivo general de las cartas Multi-Vari es, descubrir los componentes de variación en el proceso y cuantificar las diferentes fuentes de variabilidad. |
| Análisis de Varianza (ANOVA) | Metodología para analizar la variación entre muestras y al interior de las mismas con varianzas. Nos sirve para comparar dos o más medias poblacionales. |
| Análisis de Regresión | Sirve para predecir el valor de una |

| | |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | variable a partir de una o más variables. Es usada para conocer las relaciones que existen entre las variables dependientes e independientes. |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tabla 4.1 Herramientas de análisis

4.2 Etapas de la fase de análisis

La fase de análisis consta de las siguientes etapas:

4.2.1 Determinar la capacidad del proceso

La capacidad del proceso mide la habilidad del proceso para cumplir con los requerimientos. Compara la variación del proceso contra la variación permitida por el cliente.

Utilizando la herramienta "mediciones para Seis Sigma" se calcula:

DPU: es la relación de la cantidad de defectos, entre el número de unidades producidas.

DPO: es similar al DPU excepto porque considera el numero total de oportunidades que existen para que un defecto ocurra.

DPMO (PPM) = es el producto de DPO X 1,000,000.

Sigma a corto plazo (σ_T): es el nivel de desviaciones estándar (sigma) en el cual se encuentra nuestro proceso.

Sigma a Largo plazo (σ_{LT}): Es el sigma a corto plazo - 1.5, por el desplazamiento que tiene la media a lo largo del tiempo, si no se toma antes una medida preventiva.

4.2.2 Definir el objetivo de desempeño

En esta etapa se define la meta que perseguimos, es decir el *nivel de sigma* esperado. Una opción es realizar un Benchmarking, este es un

mecanismo para identificar quien tiene el mejor desempeño, ya sea dentro o fuera de la organización y comparamos nuestros valores contra ese parámetro de referencia y determinar la "brecha" existente.

4.2.3 Identificar las fuentes de variación

Cuando un proceso esta fuera de las especificaciones, hay evidencia de que existe variación. Para comprobarlo usamos alguna de las herramientas de análisis, según sea el caso, por ejemplo, el análisis Multi-Vari es una herramienta estadística que nos permite determinar cuales fuentes presentan mayor variación, a través de la descomposición de los componentes de variabilidad del proceso. Una vez determinadas las causas de variación, nos enfocaremos en los "pocos vitales X" que están afectando la variable de respuesta "Y". Esto se puede priorizar usando el "diagrama de Pareto".

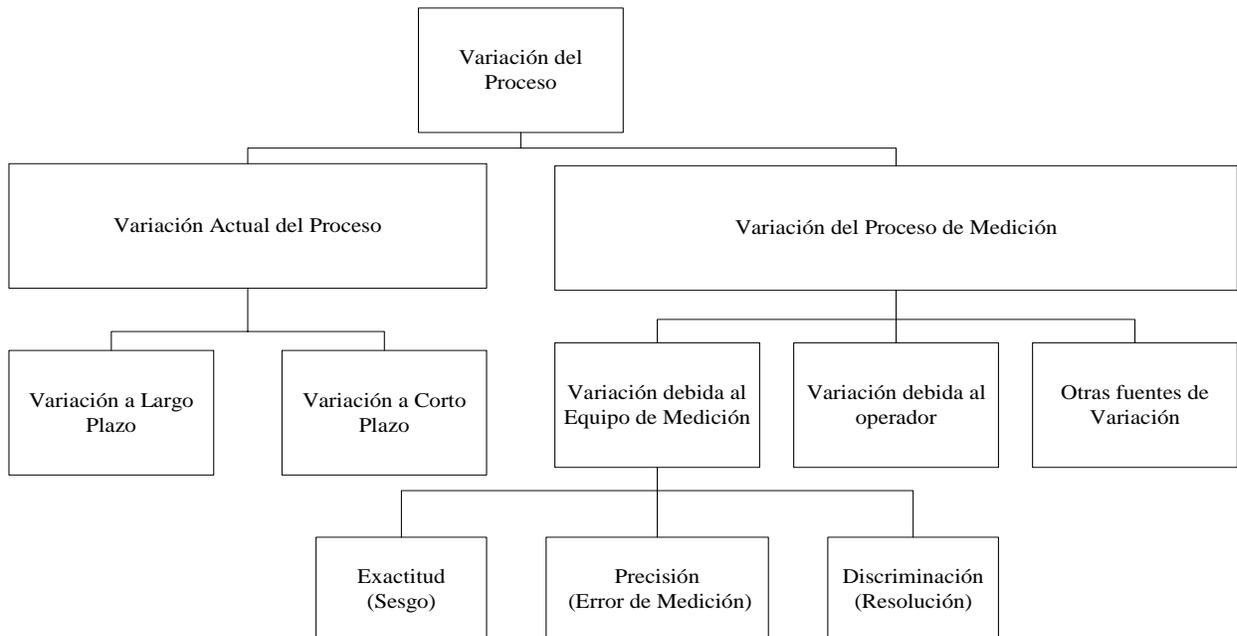


Figura 4-1 Posibles fuentes de variación del proceso.

Para una validación estadística de causas se utilizan diversas herramientas estadísticas como las que se explican a continuación.

4.3 Regresión lineal

La Regresión lineal es la predicción del valor de una variable a partir de una o más variables. La variable predecida es la variable dependiente (Y) y la variable independiente (x) variable de predicción.

En muchos problemas hay dos o más variables relacionadas, y es necesario explorar la naturaleza de esta relación. El análisis de regresión puede emplearse para construir un modelo que exprese el rendimiento como una función de la temperatura. Este modelo puede usarse para predecir el rendimiento a un nivel determinado de temperatura.

Supuestos para el modelo de regresión lineal

1. Cada valor de x , la variable aleatoria ε se distribuye normalmente.
2. Para cada valor de x , la media o valor esperado de ε es 0; esto es,
 $E(\varepsilon) = \mu_{\varepsilon} = 0$.
3. Para cada valor de x , la varianza de ε es la constante σ^2 (llamada varianza del error).
4. Los valores del término de error ε son independientes.
5. Para un valor fijo de x , la distribución muestral de Y es normal, porque sus valores dependen de los de ε .
6. Para un valor fijo x , es posible predecir el valor de Y .
7. Para un valor fijo x , es posible estimar el valor promedio de Y .

Ejemplo 1:

La revista *Motor Trend*²⁷ presenta a menudo, datos del rendimiento de automóviles, comparando el tamaño del motor en pulgadas cúbicas de desplazamiento (pcd) y las millas por galón (mpg) estimadas para ocho modelos de automóviles subcompactos modelo 1984.

²⁷ Motor Trend es marca registrada

| coches compactos | tamaño del motor (pcd) x | millas/galón (mpg), y |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Chevrolet Cavalier | 121 | 30 |
| Datsun Nissan Stanza | 120 | 31 |
| Dodge Omni | 97 | 34 |
| Ford Escort | 98 | 27 |
| Mazda 626 | 122 | 29 |
| Plymouth Horizon | 97 | 34 |
| Renault Alliance/Encore | 85 | 38 |
| Toyota Corolla | 122 | 32 |

Tabla 4.2 Relación entre el rendimiento y el desplazamiento cúbico de un motor

Graficando los datos en un "diagrama de dispersión" podemos observar la colección de los ocho pares de datos (x, y) como muestra de una población de pares, donde las medidas pulgadas cúbicas de desplazamiento (pcd) "x" pueden tomar cualquier valor en el rango de valores que se extiende de 85 a 122. Para cada pcd posible hay muchos millajes asociados con ella. Por ejemplo para un tamaño del motor de 98 hay un gran número de millajes asociados, uno por cada coche cuyo tamaño sea 98 pcd. Asumamos que existe una relación lineal para la población de pares de datos de pcd y mpg. (Se entiende por relación lineal cuando la variable y tiene una tendencia a crecer o decrecer, cuando la variable x aumenta y el valor r tiende a ± 1).

Cálculo por medio de Minitab

Las instrucciones para Minitab son:

> Stat > Regression > Regression

Seleccionar Response = Columna de las Y's

Seleccionar Predictors = Columnas de las Xs

OK

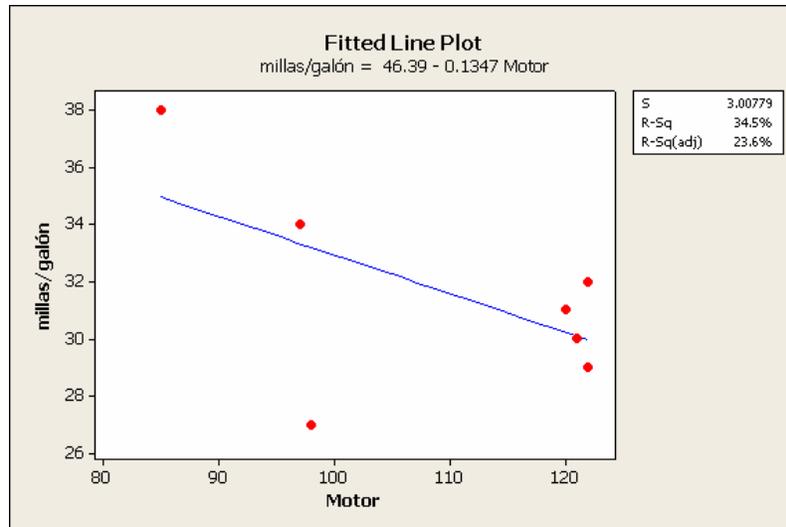


Figura 4.2 Regresión Lineal

Usamos el **modelo probabilístico** para explicar el comportamiento de los millajes para las ocho medidas de tamaño de motor, este se llama **modelo de regresión lineal**²⁸, y expresa la relación lineal entre tamaño de motor (x) y millas por galón (y).

Modelo de regresión lineal

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (4.1)$$

Donde:

y = variable dependiente

β_0 = ordenada al origen

β_1 = pendiente

x = variable independiente

ε = Error aleatorio

La expresión $\beta_0 + \beta_1 x$ se denomina **componente determinística** del modelo de regresión lineal. La muestra de pares de datos se usará para estimar los parámetros β_0 y β_1 de la componente determinística.

²⁸ Portus, Lincoyán. Curso Práctico de Estadística. México, p 25, México, Editorial Mc Graw Hill. 1988

4.4 Cartas Multi Vari

Técnica de pre-experimentación diseñada para aislar y cuantificar los mayores componentes de variabilidad en procesos de producción. El análisis Multi-Vari permite determinar las fuentes que presentan mayor variación, a través de la descomposición de los componentes de variabilidad del proceso, fueron desarrolladas por Dorian Shainin²⁹, encaminadas a la mejora del proceso.

El objetivo general de las cartas Multi-Vari es, descubrir los componentes de variación en el proceso, por ejemplo: de lote a lote, dentro del lote, de turno a turno, entre turnos, dentro del turno, de máquina a máquina, dentro de la máquina, etc.

Las cartas Multi-Vari identifican tres principales familias de variación que pueden influenciar en la variabilidad del proceso, éstas son: ***variación posicional, cíclica y temporal.***

1. Variación posicional. Se refiere a variaciones dentro de una misma pieza, variaciones producidas de un troquel a otro, dentro de un lote de piezas, de una máquina a otra, de un operador a otro, o de una plata a otra.
2. Variación cíclica. Es la variación entre unidades de un mismo proceso, o variación entre grupos de unidades (lotes).
3. Variación temporal. Variación de diferencia de tiempo (por ejemplo: de hora a hora, de día a día, de semana a semana, etc.), variación de una corrida de producción a otra, o variación de turno a turno.

²⁹ Dorian Shainin (1914 – 2000). Precursor de herramientas como Lot-plot, Multi-Vari, Pre-control, B vs C, (prueba no paramétrica de significancia estadística basada en la técnica de John Tukey), paired comparisons, y otras.

Una vez identificados las fuentes de variación, el análisis Multi-Vari esta diseñado para identificar la variable independiente de mayor influencia dentro de las familias de variación descritas anteriormente.

Pasos para elaborar una carta Multi-Vari

1. Selección del proceso. Cualquier proceso que se presente fuera de las especificaciones permitidas es candidato a ser seleccionado para posteriormente ser analizado por medio de cartas Multi-Vari.
2. Plan de muestreo y toma de mediciones. El objetivo es tomar mediciones que otorguen información con respecto a las principales familias de variación que pueden influenciar en la variabilidad del proceso. Es decir, para el caso de variación posicional, tomar mediciones en una máquina y en otra, éstas mediciones deben ser tomadas de manera que resulten en un muestreo aleatorio. El muestreo aleatorio puede ser llevado a cabo con tablas de números aleatorios, dichas tablas contienen una serie de columnas y renglones de números, por ejemplo, el último dígito de un número nos puede dar el intervalo de minutos que se debe esperar para tomar la siguiente medición.
3. Toma de mediciones para variación simultánea. Es recomendable también realizar una toma de mediciones que cubra más de una familia de variabilidad, por ejemplo es posible incluir la variación temporal o la variación cíclica a una carta Multi-Vari que este enfocada en la variación posicional.
4. Determinar los limites de variación. Obtener el máximo y el mínimo del total de las mediciones tomadas anteriormente. Así como el máximo y el mínimo para cada familia de variabilidad seleccionada.

5. Graficar los rangos. Las cartas Multi-Vari están formadas por cuatro ejes dispuestos de manera rectangular.

- a. **Ejes.** Los ejes verticales (izq. y der.) grafican la escala de la medidas tomadas, use como guía los límites de variación obtenidos en el paso 4. El eje horizontal inferior es usado para identificar las unidades muestreadas, la posición, etc. El eje horizontal superior es usado para agrupar por lotes, para agrupar por turno, por máquina, etc.
- b. **Cajas.** La representación es similar a una gráfica de "Box and Whiskers", con la diferencia que el eje horizontal superior define los límites horizontales de las cajas. Los límites verticales de las cajas están definidos por la medición máxima y el mínima de la familia de variabilidad seleccionada.
- c. **Mediciones.** Las mediciones se ordenan clasificando por la familia de variabilidad representada en el eje horizontal superior. Posteriormente, son agrupadas por la familia de variabilidad del eje horizontal inferior. Finalmente son representadas en la gráfica y unidas por una línea horizontal.
- d. **Medias.** La media de cada clasificación de la familia de variabilidad se representada en el eje horizontal superior. La media de cada caja se grafica en el centro de cada caja. Las medias son unidas con una línea sólida ver figura

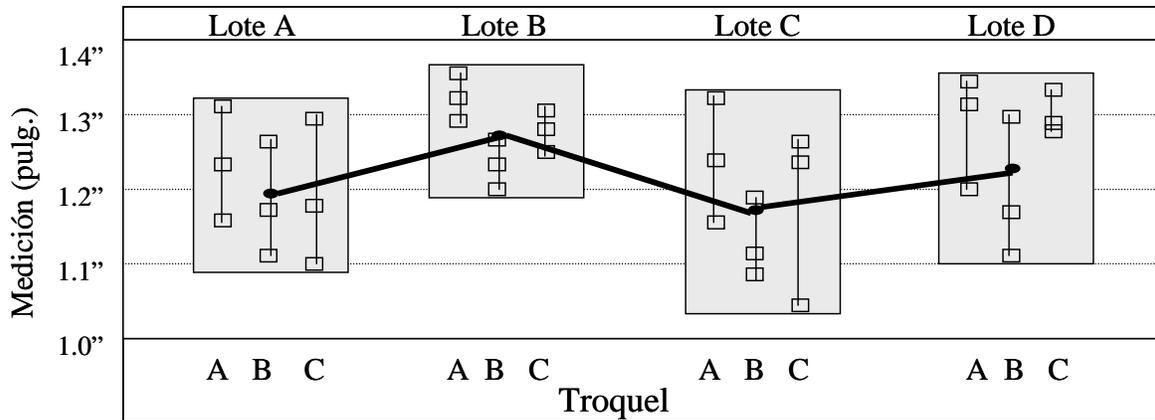


Figura 4.3 Gráfica Multi Vari

Ejemplo de cartas Multi-Vari

Se detectó que el proceso de producción de rondanas de plástico se encuentra fuera de especificación. El diámetro exterior es de 1.50" + 0.01". Se realiza un proceso de pre-experimentación a través de cartas Multi-Vari para identificar la fuente de variabilidad. Se planifica un muestreo aleatorio de cinco diferentes lotes de material a ser procesadas en dos diferentes inyectoras de plástico. Se toman cinco muestras para cada una y para cada lote. Sumando 50 observaciones.

La figura 4.4, muestra la carta Multi-Vari obtenida. El software estadístico usado para obtener esta carta es Minitab.

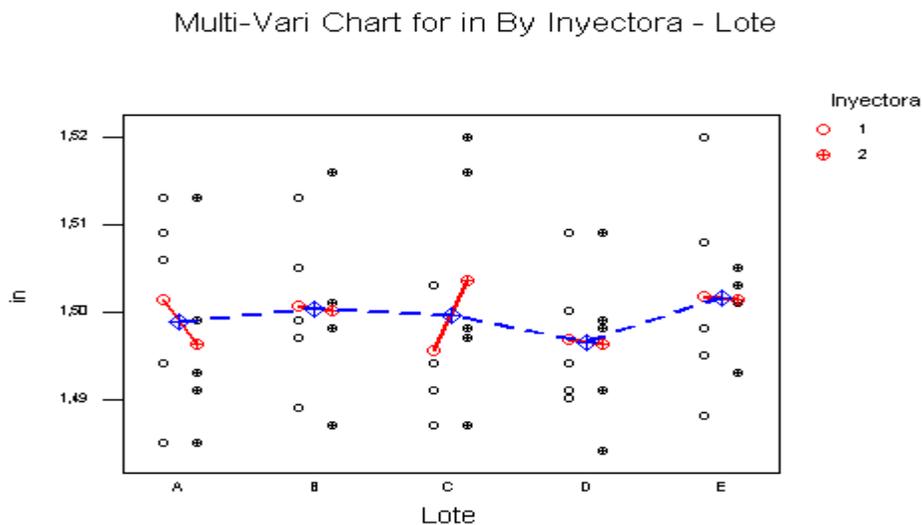


Figura 4.4 Gráfica Multi Vari en Minitab

Una carta Multi-Vari adicional correspondería a los ejes horizontales invertidos, esto es, ordenados por lote y luego por inyectora.

4.5 Pruebas de hipótesis para una población³⁰

Se trata de probar una afirmación sobre parámetros de la población (media μ ; varianza σ^2 o proporción π) con base en datos de estadísticos de una muestra (\bar{X} , s^2 o p respectivamente); probar las afirmaciones en los parámetros se usan los estadísticos:

En una población:

| | | |
|---------------------------|-------------------|------------------------|
| La media poblacional | $\mu = 12$; | estadístico Z_c |
| La varianza poblacional | $\sigma^2 = 12$; | estadístico χ_c^2 |
| La proporción poblacional | $\pi = 0.3$ | estadístico Z_c |

En dos poblaciones:

Las medias poblacionales son iguales $\mu_1 = \mu_2$ o $\mu_1 - \mu_2 = 0$;
estadístico Z_c o T_c

Las varianzas poblacionales son iguales $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ o $\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = 0$;
estadístico F_c

Las proporciones poblacionales son iguales $\pi_1 = \pi_2$ o $\pi_1 - \pi_2 = 0$;
estadístico Z_c

- Hipótesis nula H_0 , complemento de la Hipótesis alterna H_a :
 - o Es la hipótesis o afirmación a ser probada
 - o Puede ser por ejemplo $\mu =, \leq$ o \geq a 5
 - o Sólo puede ser rechazada o no rechazada
- Hipótesis alterna H_a , complemento de la hipótesis nula:
 - o Es la hipótesis que se acepta como verdadera cuando se rechaza H_0 , es su complemento

³⁰ Lind, Douglas, Mason, Robert. Estadística para la Administración y Economía. México. Editorial Mac Graw Hill. 2004

- Si el signo de la hipótesis alterna es \neq entonces se trata de una prueba de dos colas; si es $>$ de cola derecha y si es $<$ de cola izquierda.
- Puede ser por ejemplo $\mu \neq 5$ para prueba de dos colas
- $\mu < 5$ para prueba de cola izquierda
- $\mu > 5$ para prueba de cola derecha

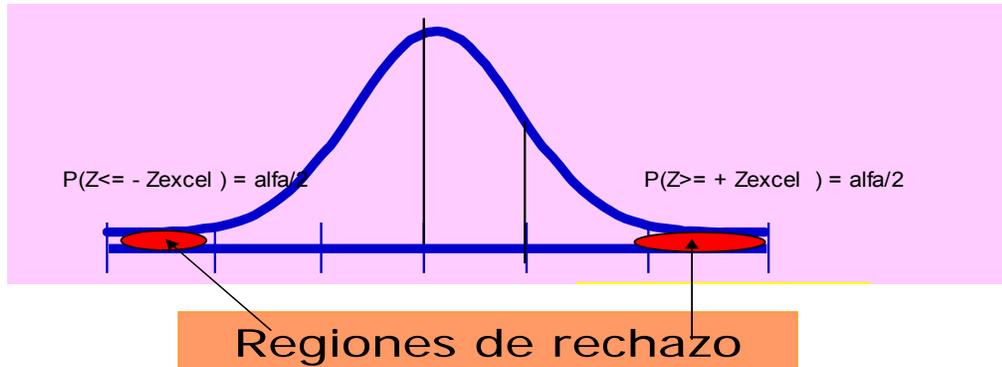


Figura 4.5 Representación de la Prueba de Hipótesis

- Se plantea la H_a si en el problema se muestra la afirmación de ser menor o mayor a un valor establecido histórico.
- Se plantea la H_0 si en el problema se muestra la afirmación igual (es o históricamente ha sido); mayor o igual (cuando menos) o menor o igual (a lo más) a un valor establecido histórico.

No importa cual se plantee primero, siempre la conclusión se hace contra la H_0 (se rechaza o no se rechaza)

- El intervalo de confianza es el intervalo donde se estima que se encuentre el parámetro de la población (media μ ; varianza σ^2 o proporción π) para un cierto nivel de confianza o de significancia.

Estadístico de prueba

- Para probar la hipótesis nula se calcula un estadístico de prueba con la información de la muestra el cual se compara

a un valor crítico apropiado. De esta forma se toma una decisión sobre rechazar o no rechazar la H_0

- **Error tipo I** (alfa = nivel de significancia, es común = 0.05). **Alfa (α) = 1- Nivel de confianza**
 - o Se comete al rechazar la H_0 cuando en realidad es verdadera. También se denomina riesgo del productor.
- **Error tipo II beta (β)**
 - o Se comete cuando no se rechaza la hipótesis nula siendo en realidad falsa. Es el riesgo del consumidor.

Pruebas de Hipótesis de dos colas:

Si la $H_0: \mu =$ que un valor poblacional, entonces el riesgo alfa se reparte en ambos extremos de la distribución. Por ejemplo si $H_a: \mu \neq 10$ se tiene:

$$H_0: a = b$$

$$H_a: a \neq b$$

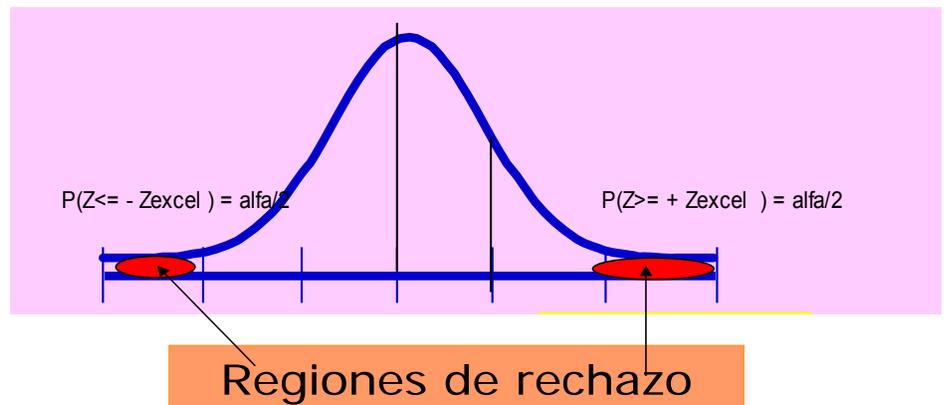


Figura 4.6 Prueba de Hipótesis de dos colas

Pruebas de Hipótesis de cola derecha:

Si la $H_0: \mu \leq$, que un valor poblacional, entonces el riesgo alfa es en el extremo derecho de la distribución. Por ejemplo si $H_0: \mu \leq 10$ y $H_a: \mu > 10$ se tiene una prueba de cola derecha:

$$H_0: a \leq b$$

$$H_a: a > b$$

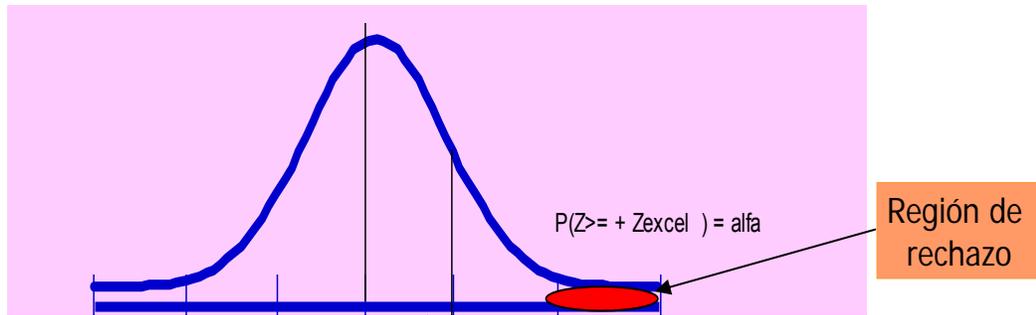


Figura 4.7 Prueba de Hipótesis de cola derecha

Pruebas de Hipótesis cola izquierda:

Si la Ho: $\mu \geq$ que un valor poblacional, entonces el riesgo alfa se coloca en el extremo izquierdo de la distribución. Por ejemplo si Ho $\mu \geq 10$ y Ha: $\mu < 10$ se tiene una prueba de cola izquierda:

H₀: $a \geq b$

H_a: $a < b$

Región de rechazo

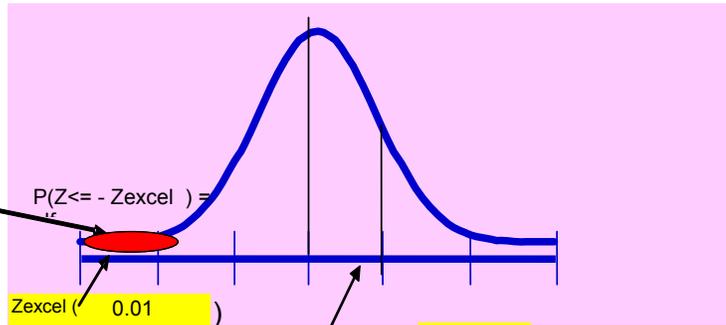


Figura 4.8 Prueba Zexcel (0.01)

Pasos para probar una Prueba de Hipótesis

a) Probar la hipótesis de igualdad de una media μ para $n > 30$

1) Establecer las hipótesis e identificar el nivel de significancia alfa o 1- Nivel de confianza (NC)

H₀: $\mu = \mu_0$

H_a: $\mu \neq \mu_0$

2) Calcular el estadístico de prueba Zc o Tc con formula

$$Z_c = \frac{\bar{X} - \mu_{HIPOTESIS}}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (4.2)$$

3) Determine el estadístico de tablas Z_t o T_c de Excel para una alfa

4) Establecer la región de rechazo con Z_t y ver si cae ahí Z_c

Las regiones de rechazo prueba de 2 colas: $- Z_{\alpha/2}$ y $+ Z_{\alpha/2}$

5) Determinar el Intervalo de confianza para la media y ver si incluye a la media de la hipótesis, si no rechazar H_o

IC para $\mu = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ o si no se conoce Sigma IC para $\mu = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$

6) Determinar el valor P correspondiente a Z_c y comparar contra Alfa/2, si es menor rechazar H_o

P value en Excel =DISTR.NORM.ESTAND(Z_c)

Prueba de hipótesis en Minitab:

>Stat >Basic statistics > 1-Sample Z

Utilizar Sample in columns o Summarized data

Sample size 49 Mean 11.5 Standar deviation 1.1 Test Mean 12

Graphs – Seleccionar / Individual value plot

Confidence level 90% Alternative not equal

OK

Resultados:

One-Sample Z

Test of mu = 12 vs not = 12

The assumed standard deviation = 1.1

| N | Mean | SE Mean | 90% CI | Z | P |
|----|---------|---------|--------------------|-------|-------|
| 49 | 11.5000 | 0.1571 | (11.2415, 11.7585) | -3.18 | 0.001 |

Criterios de rechazo de H_o :

Si Z_c cae en la zona de rechazo

El valor de la Hipótesis no se encuentra en el Intervalo de confianza

El valor P es menor que el valor de alfa (prueba de una cola) o de alfa/2 (dos colas).

a) Estadístico t_c para muestras pequeñas ($n < 30$) y la σ es desconocida:

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu_{HIPOTESIS}}{s/\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

Estadístico de tablas T_α o $T_{\alpha/2}$ en Excel =DISTR.T.INV(2*alfa o alfa, grados de libertad n-1)

Intervalo de confianza para estimar μ con muestras pequeñas ($n < 30$; grados de libertad (gl.) = $n - 1$):

$$IC \text{ para } \mu = \bar{X} \pm t_{\alpha/2, gl} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

El valor p de probabilidad correspondiente al estadístico T_c se determina como sigue:

P value en Excel =DISTR.T(T_c , grados de libertad, 1 o 2 colas)

Prueba de hipótesis en Minitab:

>Stat >Basic statistics > 1-Sample t

Utilizar Sample in columns o Summarized data

Sample size 10 Mean 11277 Standar deviation 3772

Test Mean 12000

Graphs – Seleccionar Individual value plot

Confidence level 95% Alternative not equal

OK

Resultados:

One-Sample T

Test of $\mu = 12000$ vs not = 12000

| N | Mean | St Dev | SE Mean | 95% CI | T | P |
|----|---------|--------|---------|-------------------|-------|-------|
| 10 | 11277.0 | 3772.0 | 1192.8 | (8578.7, 13975.3) | -0.61 | 0.559 |

Criterios de rechazo de Ho:

Si Tc cae en la zona de rechazo

El valor de la Hipótesis no se encuentra en el Intervalo de confianza

El valor P es menor que el valor de alfa (prueba de una cola) o de alfa/2 (dos colas).

c) Estadístico Zc para proporciones y muestras grandes ($n \geq 30$):

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\pi_{HIPOTESIS}(1 - \pi_{HIPOTESIS})}{n}}$$
$$ZC = \frac{p - \pi_{HIPOTESIS}}{\sigma_p} \quad (4.5)$$

Estadístico de tablas Zalfa o Zalfa/2 en Excel

=DISTR.NORM.ESTAND.INV(alfa o alfa/2)

Intervalo de confianza para estimar π proporción poblacional:

$$S_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (4.6)$$

$$IC \text{ para } \pi = p \pm Z_{\alpha/2} S_p$$

El valor p de probabilidad correspondiente al estadístico Zc se determina como sigue:

P value en Excel =DISTR.NORM.ESTAND(Zc)

Prueba de hipótesis en Minitab

>Stat >Basic statistics > 1- Proportion

Summarized data

Number of trial 500 Number of events 225

Graphs – Seleccionar $\circ!$ Individual value plot

Confidence level 98% Test proportion 0.40

Alternative Less than

$\circ!$ Use test and interval based on normal distribution

OK

Resultados:

Test and CI for One Proportion

Test of $p = 0.4$ vs $p < 0.4$

| Sample | X | N | Sample p | Bound | Z-Value | P-Value |
|--------|-----|-----|----------|----------|---------|---------|
| 1 | 225 | 500 | 0.450000 | 0.495693 | 2.28 | 0.989 |

Criterios de rechazo de H_0 :

Si Z_c cae en la zona de rechazo

El valor de la Hipótesis no se encuentra en el Intervalo de confianza

El valor P es menor que el valor de alfa (prueba de una cola) o de alfa/2 (dos colas).

d) Estadístico t_c para muestras pequeñas ($n < 30$) y la σ es desconocida:

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu_{HIPOTESIS}}{s/\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

Estadístico de tablas Talfa o Talfa/2 en Excel =DISTR.T.INV(2*alfa o alfa, grados de libertad n-1)

Intervalo de confianza para estimar μ con muestras pequeñas ($n < 30$; grados de libertad (gl.) = $n - 1$):

$$IC \text{ para } \mu = \bar{X} \pm t_{\alpha/2, gl} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

El valor p de probabilidad del estadístico T_c se determina como sigue;

P value en Excel =DISTR.T(T_c , grados de libertad, 1 o 2 colas)

Prueba de hipótesis en Minitab:

>Stat >Basic statistics > 1-Sample t

- Utilizar Sample in columns o Summarized data

Sample size 10 Mean 11277 Standar deviation 3772

Test Mean 12000

-Graphs – Seleccionar \circ ! Individual value plot

-Confidence level 95% Alternative not equal \rightarrow OK

Resultados:

One-Sample T

Test of mu = 12000 vs not = 12000

| N | Mean | StDev | SE Mean | 95% CI | T | P |
|----|---------|--------|---------|-------------------|-------|-------|
| 10 | 11277.0 | 3772.0 | 1192.8 | (8578.7, 13975.3) | -0.61 | 0.559 |

Criterios de rechazo de Ho:

Si T_c cae en la zona de rechazo

El valor de la Hipótesis no se encuentra en el Intervalo de confianza

El valor P es menor que el valor de alfa (prueba de una cola) o de alfa/2 (dos colas).

e) Estadístico Z_c para proporciones y muestras grandes ($n \geq 30$):

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\pi_{HIPOTESIS}(1 - \pi_{HIPOTESIS})}{n}} \tag{4.9}$$
$$Z_c = \frac{p - \pi_{HIPOTESIS}}{\sigma_p}$$

Estadístico de tablas Zalfa o Zalfa/2 en Excel

=DISTR.NORM.ESTAND.INV(alfa o alfa/2)

Intervalo de confianza para estimar π proporción poblacional:

$$S_p = \sqrt{\frac{p(1 - p)}{n}} \tag{4.10}$$

$$IC \text{ para } \pi = p \pm Z_{\alpha/2} S_p$$

El valor p de probabilidad correspondiente al estadístico Z_c se determina como sigue:

P value en Excel =DISTR.NORM.ESTAND(Z_c)

Prueba de hipótesis en Minitab

>Stat >Basic statistics > 1- Proportion

Summarized data

Number of trial 500 Number of events 225

Graphs – Seleccionar $\circ!$ Individual value plot

Confidence level 98% Test proportion 0.40

Alternative Less than

$\circ!$ Use test and interval based on normal distribution \rightarrow OK

Resultados:

Test and CI for One Proportion

Test of $p = 0.4$ vs $p < 0.4$

| Sample | X | N | Sample p | Bound | Z-Value | P-Value |
|--------|-----|-----|----------|----------|---------|---------|
| 1 | 225 | 500 | 0.450000 | 0.495693 | 2.28 | 0.989 |

Criterios de rechazo de H_0 :

Si Z_c cae en la zona de rechazo

El valor de la Hipótesis no se encuentra en el Intervalo de confianza

El valor P es menor que el valor de alfa (prueba de una cola) o de alfa/2 (dos colas).

f) Tamaño de muestra para estimar μ en función del error $(\bar{X} - \mu)$:

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2}{(\bar{X} - \mu)^2} \quad (4.11)$$

g) Tamaño de muestra para estimar π en función del error $(p - \pi)$, en el peor caso $\pi = 0.5$:

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 (\pi)(1 - \pi)}{(p - \pi)^2} \quad (4.12)$$

4.6 Pruebas de hipótesis para dos poblaciones

Pruebas de igualdad de dos varianzas

Presentaremos ahora pruebas para comparar dos varianzas. Supóngase que son dos las poblaciones de interés, por ejemplo X_1 y X_2 , donde $\mu_1, \sigma_1^2, \mu_2, \sigma_2^2$, se desconocen. Deseamos probar hipótesis relativas a la igualdad de las dos varianzas, $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Considérese que se disponen dos muestras aleatorias de tamaño n_1 de la población 1 y de tamaño n_2 de la población 2, y sean S_1^2 y S_2^2 las varianzas de muestra. Para probar la alternativa de dos lados

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Utilizamos el hecho de que la estadística

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4.13)$$

Se distribuye como F, con n_1-1 y n_2-1 grados de libertad.

Rechazaríamos H_0 si:

$$F_0 > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$$

o si

$$F_0 < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$$

Donde $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ y $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ son los puntos porcentuales $\alpha/2$ superior e inferior de la distribución F con n_1-1 y n_2-2 grados de libertad. La tabla F proporciona sólo los puntos de la cola superior de F, por lo que para determinar $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ debemos emplear

$$F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = \frac{1}{F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}} \quad (4.14)$$

La misma estadística de prueba puede utilizarse para probar hipótesis alternativas de un lado. La hipótesis alternativa de un lado es:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

Si $F_0 > F_{\alpha, n_1-1, n_2-1}$, rechazaríamos $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

Ejemplo: Los siguientes son tiempos de quemado (en minutos) de señales luminosas de dos tipos diferentes.

| Tipo 1 | Tipo 2 |
|--------|--------|
| 63 | 64 |
| 81 | 72 |
| 57 | 83 |
| 66 | 59 |
| 82 | 65 |
| 82 | 56 |
| 68 | 63 |
| 59 | 74 |
| 75 | 82 |
| 73 | 82 |

Tabla 4.3 Igualdad de Varianzas

Pruebe la hipótesis de dos varianzas sean iguales. Use $\alpha = 0.05$

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$$\bar{X}_1 = 70.6$$

$$\bar{X}_2 = 70$$

$$S_1^2 = 88.71$$

$$S_2^2 = 100.44$$

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{88.71}{100.44} = 0.877$$

$$F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = F_{0.025, 9, 9} = 4.03$$

$$F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = 0.248$$

0.877 no es mayor que 4.03, por lo que no se rechaza la hipótesis nula

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2.$$

Con alfa = 0.05

Prueba de dos poblaciones cuando las varianzas son iguales

Sean X_1 y X_2 dos poblaciones normales independientes con medias desconocidas μ_1 y μ_2 , y varianzas conocidas pero iguales $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$.

Deseamos probar:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Sean X_1, X_2, S_1^2, S_2^2 , las medias y las varianzas de las muestras, respectivamente. Puesto que tanto S_1^2 como S_2^2 estiman la varianza común σ^2 , podemos combinarlas para producir una sola estimación, mediante la siguiente fórmula:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4.15)$$

Para probar $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ calcúlese la estadística de prueba

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.16)$$

Si $t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$ o si $t_0 < -t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$, rechazamos $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

Las alternativas de un lado se tratan de modo similar. Para probar:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

Calcúlese la estadística de prueba t_0 y rechácese $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ si:

$$t_0 > t_{\alpha, n_1+n_2-2}$$

Para la otra alternativa de un lado,

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2$$

Calcúlese la estadística de prueba y rechácese $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ si:

$$t_0 < -t_{\alpha, n_1+n_2-2}$$

Ejemplo: Se está investigando la resistencia de dos alambres, con la siguiente información de muestra.

| Alambre | Resistencia (ohms) | | | | | |
|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.140 | 0.141 | 0.139 | 0.140 | 0.138 | 0.144 |
| 2 | 0.135 | 0.138 | 0.140 | 0.139 | - | - |

Tabla 4.4 Resistencia de dos alambres

Suponiendo que las dos varianzas son iguales, ¿qué conclusiones puede extraerse respecto a la resistencia media de los alambres?

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Calculando la media y la desviación estándar de la muestra:

$$\bar{x}_1 = .140$$

$$\bar{x}_2 = .138$$

$$S_1 = .0021$$

$$S_2 = .0022$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} = 0.0021$$

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1.72$$

Se busca en la tabla de distribución t el valor $t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} = t_{0.025, 8} = 2.306$ o se determina con Excel.

Utilizando el criterio de rechazo $t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$, 1.72 no es mayor que 2.306, por lo tanto no rechazamos H_0 .

4.7 Análisis de varianza de una vía (ANOVA)

El análisis de la varianza de un criterio (ANOVA) es una metodología para analizar la variación entre muestras y la variación al interior de las mismas mediante la determinación de varianzas. Es llamado de un criterio porque analiza un variable independiente o Factor por ejemplo: Velocidad. Como tal, es un método estadístico útil para comparar dos o más medias poblacionales. El ANOVA de una vía nos permite poner a prueba hipótesis tales como:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : Al menos dos medias poblacionales son diferentes.

Los supuestos en que se basa la prueba t de dos muestras que utiliza muestras independientes son:

1. Ambas poblaciones son normales.
2. Las varianzas poblacionales son iguales, esto es, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

Los supuestos para el ANOVA de una vía son:

1. Todas las poblaciones k son normales.
2. $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_k^2 (= \sigma^2)$

El Procedimiento es el siguiente³¹:

1. Determinar si las muestras provienen de poblaciones normales.
2. Proponer las hipótesis.
3. Encontrar las medias poblacionales y las varianzas.
4. Encontrar la estimación de la varianza al interior de las muestras s_w^2 y sus grados de libertad asociados gl_w .
5. Calcular la gran media para la muestra de las medias muestrales.

³¹ C. Weimer Richard. Estadística, p 126. México. Editorial CECSA. 2000

6. Determinar la estimación de la varianza entre muestras s_b^2 y sus grados de libertad asociados.
7. Hallar el valor del estadístico de la prueba F.
8. Calcular el valor crítico para F basado en gl_b y gl_w .
9. Decidir si se rechaza H_0 .

Por ejemplo:

Cuatro catalizadores que pueden afectar la concentración de un componente en una mezcla líquida de tres componentes están siendo investigados. Se obtienen las siguientes concentraciones:

| Catalizador | | | |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| A | B | C | D |
| 58.2 | 56.3 | 50.1 | 52.9 |
| 57.2 | 54.5 | 54.2 | 49.9 |
| 58.4 | 57 | 55.4 | 50 |
| 55.8 | 55.3 | | 51.7 |
| 54.9 | | | |

Tabla 4.5 Catalizadores

Utilizando el paquete Minitab se tiene:

Stat > ANOVA > One Way (Unstacked)

Response in separate columns A, B, C

Seleccionar Store Residuals y Store Fits Confidence level 95%

Graphs: Seleccionar Normal plot of residuals

Comparisons: Seleccionar Tukey's Family error rate → OK

Se obtuvieron los resultados siguientes:

Los residuos se distribuyen normalmente, validando el modelo ANOVA.

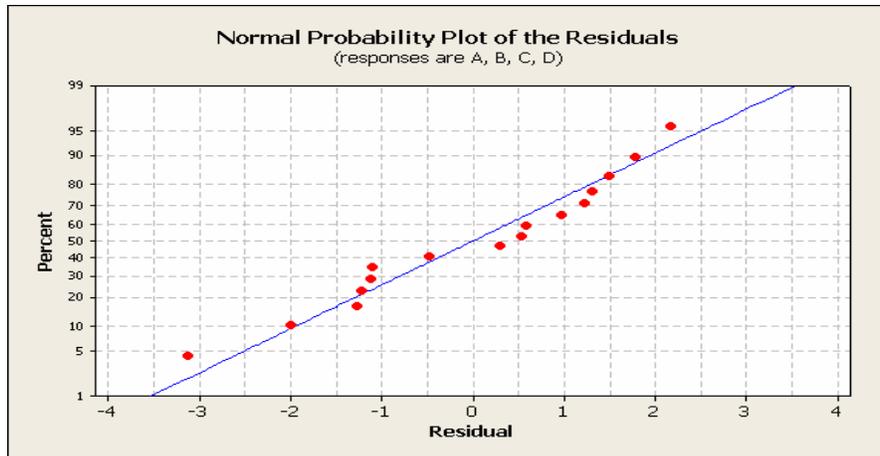


Figura 4.9 Curva de Probabilidad Normal

De la tabla de ANOVA se observa que el valor P es menor a alfa de 0.05, por lo que al menos dos medias son diferentes:

One-way ANOVA: A, B, C, D

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|--------|----|--------|-------|------|-------|
| Factor | 3 | 85.68 | 28.56 | 9.92 | 0.001 |
| Error | 12 | 34.56 | 2.88 | | |
| Total | 15 | 120.24 | | | |

S = 1.697 R-Sq = 71.26% R-Sq(adj) = 64.07%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

| Level | N | Mean | StDev | CI |
|-------|---|--------|-------|----------------|
| A | 5 | 56.900 | 1.520 | (54.86, 58.94) |
| B | 4 | 55.775 | 1.100 | (54.57, 56.98) |
| C | 3 | 53.233 | 2.779 | (47.67, 58.80) |
| D | 4 | 51.125 | 1.443 | (48.24, 54.01) |

Pooled StDev = 1.697

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

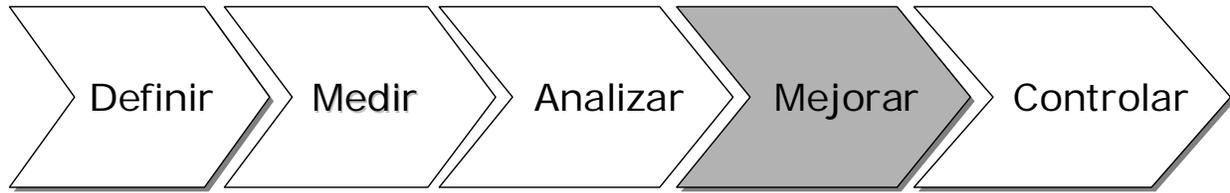
All Pairwise Comparisons

Individual confidence level = 98.83%

A subtracted from:

| | Lower | Center | Upper | CI |
|---|--------|--------|--------|----------------|
| B | -4.506 | -1.125 | 2.256 | (-3.63, 0.01) |
| C | -7.347 | -3.667 | 0.014 | (-5.50, -1.82) |
| D | -9.156 | -5.775 | -2.394 | (-7.17, -4.38) |

CAPÍTULO 5. FASE DE MEJORA



5.1 Introducción

En la fase de Análisis se identificaron las causas de variación. En esta fase se utilizará el diseño de experimentos (DOE), para seleccionar las causas que más afectan nuestro CTQ e investigar estas causas para conocer el comportamiento del proceso. El método de DOE consiste en realizar cambios en los niveles de operación de los factores (X's) para obtener los mejores resultados en la respuesta "Y". Esta información es de gran ayuda para la optimización y mejora de procesos.

Objetivos:

- Conocer el uso de las herramientas de mejora.
- Hacer el diseño de experimentos para la optimización de procesos.
- Obtener las mejoras del proceso en el proyecto.

Las principales herramientas usadas en esta fase se presentan en la Tabla 5.1 siguiente:

| Herramienta | Para que es usada. |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diseño de experimentos factoriales 2^k | Los experimentos factoriales son utilizados cuando se involucran varios factores de interés en un experimento. En cada replica se utilizan cada uno de los factores que se están investigando. |
| Diseño central compuesto 2^k | Se realizan replicas en ciertos puntos del experimento factorial 2^k , para tener una protección contra la curvatura que pudiera estar presente. |
| Ing. de Calidad de Taguchi | Es utilizado cuando el número de factores es demasiado grande ya que el número de combinaciones e interacciones aumenta, y en |

| | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | ocasiones sería casi imposible realizar un diseño aunque se utilice un diseño fraccional; en este caso es más sencillo realizar la metodología que propone Taguchi. |
| RSM | La metodología de superficie de respuesta o RSM es una colección de técnicas Matemáticas y Estadísticas, utilizadas para modelar y analizar problemas en los cuales la <i>Respuesta</i> de interés es influenciada por varias variables, siendo el objetivo optimizar dicha Respuesta. |

Tabla 5.1 Herramientas

5.2 Etapas de la fase de Mejora

Las etapas de la fase mejora son las siguientes:

5.2.1 Mostrar las causas potenciales y caracterización de X's:

En la fase de análisis encontramos los pocos vitales X's, en esta fase vamos a determinar aquellos que realmente afectan nuestro proceso. Esto se lleva a cabo a través de datos históricos, conocimiento y discusiones. En base a lo anterior también deseamos las variables que no son utilizadas. Una opción para realizar esta actividad es mediante el uso del **diagrama de Ishikawa**. Los pocos vitales son elementos críticos o factores, nombrados en tipo, clase, o en cantidad.

Los cambios en los parámetros de operación referentes a las X's pueden ser puestos en niveles múltiples, para estudiar como afectan la respuesta en el proceso "Y"

El Diseño de Experimentos³² es un método para probar la significancia, con que afectan cada uno de los factores a la variable de respuesta. Y para determinar la interacción entre dichos factores.

Consideraciones:

³² Montgomery, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos, pp 170-276 México, Editorial Limusa, 2005

- El Diseño de Experimentos sirve para identificar los pocos vitales de los CTQ´s
- En la optimización es utilizada para determinar los niveles más apropiados de los pocos vitales.
- Sirve para comparar el resultado experimental contra el proceso actual

5.2.2 Descubrir las relaciones entre variables y proponer una solución:

Una vez determinados los factores con mayor significancia, o sea aquellos que afectan más al proceso, estamos interesados en proponer los niveles óptimos para cada factor.

Se generamos la función de transferencia, mediante análisis de regresión, simple o múltiple. Al realizarlo tendremos una solución que nos permitirá alcanzar el objetivo que es la optimización del proceso.

Para conducir un diseño de experimentos debemos tomar en cuenta los puntos siguientes:

- Contar con el presupuesto para la experimentación.
- Disponibilidad de personal.
- Disponibilidad del tiempo para las pruebas.
- Otros recursos

5.3 Diseños de experimentos factoriales

5.3.1 ¿Qué es el Diseño de Experimentos (DOE)?

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

Un proceso de manufactura es una combinación de personas, métodos y máquinas que transforman materias primas en productos terminados. Los productos resultantes tienen una o más características de calidad observables o respuestas (Críticas para la calidad si el cliente reclama por su no cumplimiento – CTQ's). Algunas de las variables del proceso X_1, X_2, \dots, X_p son controlables, mientras que otras Z_1, Z_2, \dots, Z_q no son controlables (a pesar de que pueden ser controladas durante el desarrollo de las pruebas), y se denominan factores de **ruido**. Los objetivos del diseño de experimentos pueden incluir:

1. Encontrar cuáles factores influyen más a la variable, "**Y**".
2. Determinar en donde ajustar las variables de influencia **x's**, de tal forma que **y** se acerque al requerimiento nominal.
3. Determinar donde ajustar las variables de influencia **x's** de tal forma que la variabilidad en **y** sea pequeña.
4. Determinar donde ajustar las variables de influencia **x's** de tal forma que los efectos de las variables **z** desean minimizados.

Por lo anterior, los métodos de diseño de experimentos pueden utilizarse ya sea para el desarrollo o la mejora de los procesos, para mejorar el desempeño o para obtener un proceso que sea *robusto* o insensible a fuentes externas de variabilidad.

El control estadístico de procesos (CEP) y el diseño de experimentos están muy relacionados. Si un proceso está en control estadístico pero no tiene la suficiente capacidad, para reducir su variabilidad será necesario optimizarlo a través del diseño de experimentos. El CEP es un método estadístico *pasivo*, donde se observa el proceso y se espera que ocurra una señal que nos oriente hacia un cambio útil, sin embargo, si el proceso está en control, la observación pasiva no producirá mucha información útil. Por otra parte, el diseño de experimentos es un método

estadístico *activo*, donde, se realizan una serie de pruebas en el proceso haciendo cambios en las entradas y observando los cambios correspondientes en las salidas, esto genera información que puede guiar hacia la mejora del proceso.

Diseño de experimentos es útil también para estabilizar un proceso. Asumiendo que la carta de control muestre un proceso fuera de control, y que el proceso tenga muchas variables de entrada controlables, puede ser difícil llevar el proceso a controlar. El Diseño de experimentos pueden ser usados para identificar las variables de proceso que tienen más influencia, siendo esta herramienta de gran ayuda para los proceso de Manufactura, además, tiene una aplicación extensa en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de estas técnicas durante el desarrollo de los procesos pudiendo resultar en:

1. Rendimiento mejorado.
2. Variabilidad reducida y comportamiento cercano al valor nominal.
3. Tiempo de desarrollo reducido.
4. Costos totales reducidos.

Los métodos de diseño de experimentos pueden también jugar un papel mayor en las actividades de ingeniería de desarrollo de nuevos productos o mejora de los productos actuales. Algunas aplicaciones del diseño de experimentos incluyen:

1. Evaluación y comparación de configuraciones básicas de diseño.
2. Evaluación de alternativas de material.
3. Determinación de parámetros clave de diseño con impacto en el desempeño.

El uso del diseño de experimentos en estas áreas puede resultar en una fabricación mejorada del producto, mejor desempeño y confiabilidad en

el campo, bajos costos del producto, y tiempos de desarrollo del producto más cortos.

5.3.2 Guía para realizar Diseños de Experimentos

En el diseño de experimentos, es necesario que todos los involucrados en el experimento tengan una idea clara del objetivo del experimento, de los factores a ser estudiados, como se realizará el experimento y una idea cualitativa de cómo se analizarán los datos. Pasos a seguir:

1. Reconocimiento y establecimiento del problema.
2. Selección de factores y niveles.
3. Selección de la variable de respuesta.
4. Selección del diseño experimental.
5. Realización del experimento.
6. Análisis de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

5.3.3 Aplicación del DOE. Ejemplo 5.1

A continuación se presenta un ejemplo que ilustra la aplicación del diseño de experimentos para mejorar la calidad de procesos y por ende mejorar los productos.

Caracterizando un proceso

Para explicar este proceso usaremos un ejemplo de soldadura de circuitos integrados.

Con la aplicación del control estadístico de proceso, se ha reducido el número de soldaduras falsas en un panel de circuito impreso hasta un 1% para retrabajo, esto aún es demasiado, sin embargo el proceso está en control estadístico.

La máquina de soldar y el flujo de soldadura tienen varias variables que se pueden controlar, que incluyen:

1. Temperatura de soldado.
2. Temperatura de precalentamiento.
3. Velocidad del transportador.
4. Tipo de Fundente.
5. Gravedad específica del fundente.
6. Altura de la ola de soldadura.
7. Ángulo del transportador.

Además de los factores controlables, se tienen otros factores que no son controlables fácilmente durante la manufactura, a pesar de que pueden controlarse a nivel de prueba, y son los siguientes:

1. Espesor del circuito impreso.
2. Tipos de componentes usados en los paneles.
3. Distribución de los componentes en los paneles.
4. Operador.
5. Tasa de producción.

Bajo esta situación, *caracterizar* el proceso significa encontrar los factores (controlables y no controlables) que generan la ocurrencia de defectos de soldaduras falsas en los circuitos impresos. Para lo cuál es necesario realizar un diseño de experimentos que nos permita estimar la magnitud y dirección de los efectos de los factores. Es decir, cuánto cambia la variable respuesta (defectos por unidad) al cambiar cada factor, o cuánto cambia al cambiar todos los factores a la vez, algunas veces estos experimentos se denominan *experimentos de separación de variables*.

La información de los experimentos se usa para identificar los factores críticos del proceso y determinar la dirección de ajuste de estos factores críticos para reducir el número de defectos por unidad. El diseño de experimentos también se usa para obtener información sobre los factores que deben ser controlados más de cerca con cartas de control (CEP), durante la fabricación para prevenir un comportamiento errático del proceso. Con el tiempo si el proceso se mejora lo suficiente, es posible controlar el proceso a través de sus variables críticas de entrada en vez de usar cartas de control para controlar las salidas o el producto terminado.

5.4 El diseño factorial 2^k

Un diseño muy común es el que considera varios factores (K) en dos niveles ("alto" y "bajo"), el diseño más simple es el diseño 2^k

El diseño 2^2

Este el diseño más simple, usa dos factores A y B, cada uno en dos niveles. Requiere la realización de 4 experimentos que pueden replicarse **n** veces, tomando las sumas de los resultados de las réplicas se tiene:

- (1) A = -, B = -
- (a) A = +, B = -
- (b) A = -, B = +
- (ab) A = +, B = +

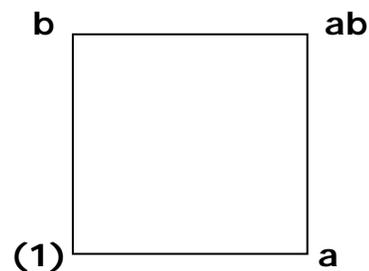


Figura 5.1 Diseño 2^2

Los efectos de interés en el diseño son los efectos principales de A y B y los efectos de la interacción AB, se denominan **contrastos** calculados como sigue:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} (a + ab - b - (1)) \\
 B &= \frac{b + ab}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} (b + ab - a - (1)) \\
 AB &= \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{1}{2n} (ab + (1) + -a - b)
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Las cantidades entre paréntesis se denominan **contrastes**, aquí los coeficientes siempre son +1 o -1. También se pueden determinar usando una tabla de signos como sigue:

| | | Efectos factoriales | | | | |
|---------|-----|---------------------|---|---|----|-----------------|
| Corrida | | I | A | B | AB | |
| 1 | (1) | + | - | - | + | ANOVA |
| 2 | a | + | + | - | - | Fo = SST/SSE |
| 3 | b | + | - | + | - | gl SST = 4n - 1 |
| 4 | ab | + | + | + | + | gl SSE = 4(n-1) |

Tabla 5.2 Signos para los efectos en el diseño 2²

Para obtener la suma de cuadrados de A, B, y AB se usa:

$$SS = \frac{(\text{contraste})^2}{n \sum (\text{coeficientes.de.contrastes})^2}
 \tag{5.2}$$

Por tanto la suma de cuadrados para A, B y AB es:

$$\left. \begin{aligned}
 SSA &= \frac{1}{4n} (a + ab - b - (1))^2 \\
 SSB &= \frac{1}{4n} (b + ab - a - (1))^2 \\
 SSAB &= \frac{1}{4n} (ab + (1) + -a - b)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Ejemplo 5.2: Se trata de reducir la variabilidad en las orillas del corte de placas de circuito impreso. Se hicieron varios experimentos considerando dos factores A y B. Se probaron cuatro circuitos impresos en cada una de las cuatro corridas de experimentos o réplicas, con los valores siguientes:

| Corrida | Efectos factoriales | | | | Total | | |
|---------|---------------------|---|-----------|------|-------|------|-------|
| | A | B | Vibración | | | | |
| 1 | - | - | 18.2 | 18.9 | 12.9 | 14.4 | 64.4 |
| 2 | + | - | 27.2 | 24.0 | 22.4 | 22.5 | 96.1 |
| 3 | - | + | 15.9 | 14.5 | 15.1 | 14.2 | 59.7 |
| 4 | + | + | 41.0 | 43.9 | 36.3 | 39.9 | 161.7 |

Tabla 5.3 Datos del experimento

Calculando los efectos estimados de cada factor se tiene:

$$A = (96.1 + 161.1 - 59.7 - 64.4) / 2(4) = 16.64$$

$$B = (59.7 + 161.1 - 59.7 - 64.4) / 2(4) = 7.54$$

$$AB = (161.1 + 64.4 - 96.1 - 59.7) / 2(4) = 8.71$$

Como efecto de los factores, si se cambia A de su nivel bajo a su nivel alto, aumenta la respuesta en 16.64 unidades. Calculando las sumas de cuadrados, se obtiene la siguiente tabla ANOVA:

| Fuente de de variación | Suma de cuadrados | Grados libertad | Cuadrado medio | Fo |
|------------------------|-------------------|-----------------|----------------|--------|
| A | 1107.326 | 1 | 1107.226 | 185.25 |
| B | 227.256 | 1 | 227.256 | 38.03 |
| AB | 303.631 | 1 | 303.631 | 50.80 |
| Error | 71.723 | 12 | 5.977 | |
| Total | 1709.836 | 15 | | |

Tabla 5.4 Análisis de varianza del experimento

Se observa que ambos factores son significativos y la interacción.

Análisis Residual

Para obtener los residuos se utiliza la ecuación de regresión siguiente, donde los factores A y B se representan por X_1 y X_2 y la interacción AB por X_1X_2 . Los niveles alto y bajo de cada factor se asignan a los valores +1 y -1 respectivamente, el modelo de ajuste es:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1x_2 + \varepsilon = 23.83 + \left(\frac{16.64}{2}\right)x_1 + \left(\frac{7.54}{2}\right)x_2 + \left(\frac{8.71}{2}\right)x_1x_2 \quad (5.4)$$

El valor de la intersección β_0 se calcula como el promedio de las 16 observaciones y cada coeficiente de regresión es la mitad del efecto estimado del factor correspondiente, dado que los coeficientes de regresión miden el efecto de una unidad de cambio en X_i sobre la media de Y , y el estimado del efecto se basa en dos unidades de cambio de ($X_1 = -1$ a $X_2 = 1$).

Dado que la interacción es significativa, para obtener la menor respuesta de vibración, se analizan las respuestas en todas las combinaciones de A y B como se muestra en la figura 5.2:

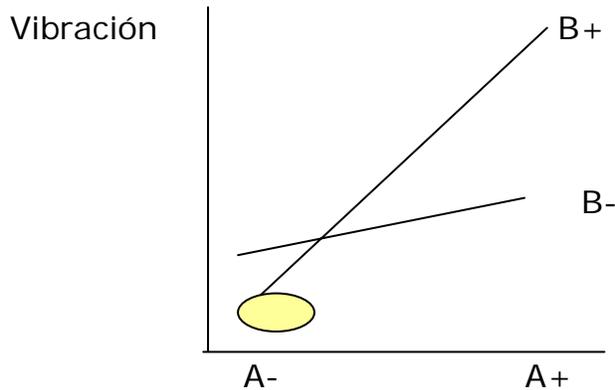


Fig. 5.2 Gráfica de interacción de A y B

Como se puede observar los mejores resultados se obtienen poniendo en niveles bajos al factor A y en nivel alto al factor B.

El modelo de la ecuación (5.4) permite predecir valores del nivel de vibración en cualquier punto de la región de experimentación, incluyendo los cuatro puntos del diseño, por ejemplo si ($X_1 = -1$ y $X_2 = -1$), el nivel de vibración de predicción es 16.1

Los residuos pueden calcularse como la diferencia entre los valores reales observados y los estimados por la ecuación. En relación con la respuesta, los primeros cuatro residuos son:

$$\begin{aligned} e_1 &= 18.2 - 16.1 = 2.1 & e_3 &= 12.9 - 16.1 = -3.2 \\ e_2 &= 18.9 - 16.1 = 2.8 & e_4 &= 14.4 - 16.1 = -1.7 \end{aligned}$$

Los residuos restantes para las otras tres corridas pueden calcularse en forma similar. Posteriormente se grafican para su análisis de normalidad, la cual mostró ser satisfactoria.

Ejemplo 5.3 en Minitab:

Un constructor está interesado en los efectos de dos métodos de mezclado diferentes realizados a dos temperaturas sobre la resistencia

del concreto. Realiza un diseño experimental y obtiene los resultados mostrados en la tabla 5.5 siguiente:

| Temp.. | Método | | | |
|--------|--------|------|-----|------|
| °C | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 40 | 672 | 704 | 800 | 832 |
| 40 | 736 | 896 | 768 | 800 |
| 40 | 640 | 832 | 928 | 864 |
| 60 | 1184 | 1248 | 992 | 1088 |
| 60 | 1216 | 1216 | 928 | 1056 |
| 60 | 1120 | 1152 | 960 | 1120 |

Tabla 5.5 Diseño Experimental

Crear el diseño en Minitab con:

Stat > DOE > Factorial > Create factorial design

Seleccionar 2 level factorial (default generators) Number of factors 2

En Designs No. of replicates 6

En Factors A = Temp Low = 40 High = 60 Factor B = Método Low = 1

High = 2

En Options quitar selección de Randomize runs

OK

Una vez generado el diseño de dos factores introducir la siguiente columna de datos:



| Temp | Método | Resistencia |
|------|--------|-------------|
| 40 | 1 | 672 |
| 60 | 1 | 1184 |
| 40 | 2 | 800 |
| 60 | 2 | 992 |
| 40 | 1 | 736 |
| 60 | 1 | 1216 |
| 40 | 2 | 768 |

| | | |
|----|---|------|
| 60 | 2 | 928 |
| 40 | 1 | 640 |
| 60 | 1 | 1120 |
| 40 | 2 | 928 |
| 60 | 2 | 960 |
| 40 | 1 | 704 |
| 60 | 1 | 1248 |
| 40 | 2 | 832 |
| 60 | 2 | 1088 |
| 40 | 1 | 896 |
| 60 | 1 | 1216 |
| 40 | 2 | 800 |
| 60 | 2 | 1056 |
| 40 | 1 | 832 |
| 60 | 1 | 1152 |
| 40 | 2 | 864 |
| 60 | 2 | 1120 |

Tabla 5.6 Diseño Experimental ordenado

Analizar el diseño con:

Stat > DOE > Factorial > Analyze factorial design

En responses indicar Columna de Resistencia

En Terms y Results pasar todos los factores a Selected terms con >>

En Graphs seleccionar para Effects Plots Pareto y Normal con alfa de 0.05

En Graphs seleccionar para los residuos Standardized y Normal Plot

En Store seleccionar Fits y Residuals OK

Con un alfa (α) = 0.05:

Prueba de Normalidad de residuos

- a) Los residuos se distribuyen normalmente y el diseño es válido y adecuado para la caracterización de este problema.

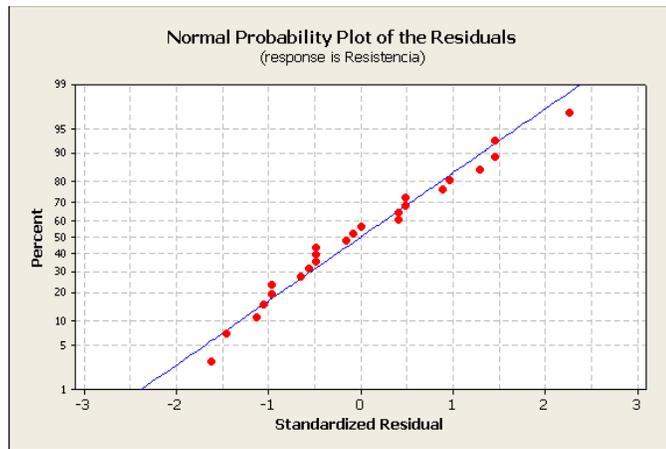


Fig. 5.3 Curva de Normalidad de Residuos

b) De la Tabla de efectos (ANOVA), se observan las interacciones que puedan tener un efecto significativo en la resistencia

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|-------------|---------|--------|---------|-------|-------|
| Constant | 948.00 | 14.76 | 64.21 | 0.000 | |
| Temp | 317.33 | 158.67 | 14.76 | 10.75 | 0.000 |
| Método | -40.00 | -20.00 | 14.76 | -1.35 | 0.191 |
| Temp*Método | -125.33 | -62.67 | 14.76 | -4.24 | 0.000 |

S = 72.3252 R-Sq = 87.13% R-Sq(adj) = 85.20%

La temperatura y su interacción con el método tienen gran efecto en Y.

c) En base al Pareto de los efectos, se comprueba que los factores significativos son la temperatura y su interacción con el método.

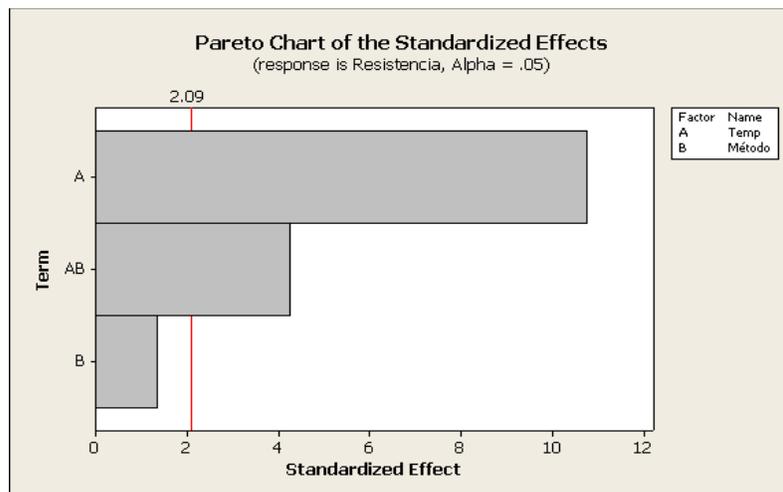


Figura 5.4 Pareto de efectos

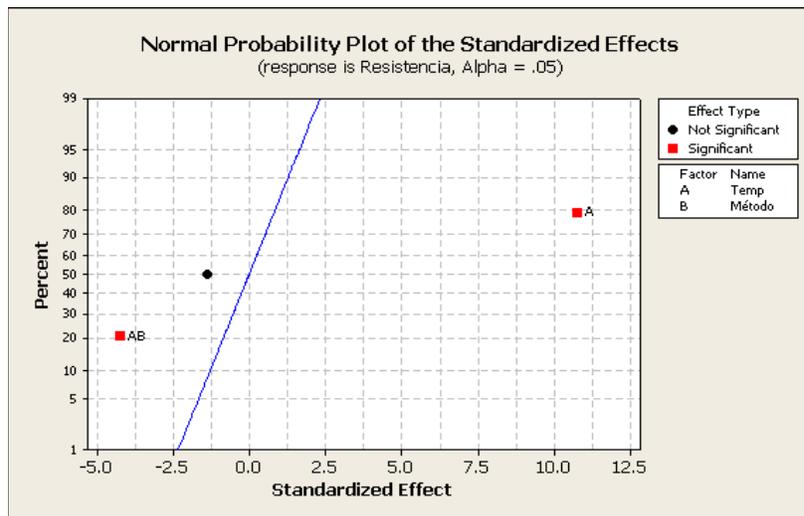


Figura 5.5 Curva de Normalidad de efectos estandarizados

d) De la tabla de coeficiente se obtiene la ecuación del modelo que representa este proceso.

| Term | Coef |
|-------------|----------|
| Constant | -725.333 |
| Temp | 34.6667 |
| Método | 586.667 |
| Temp*Método | -12.5333 |

$$Y_{est} = -725.33 + 34.6667 \text{ Temp} - 12.5333 \text{ Temp} * \text{Método}$$

e) Obtener gráficas factoriales con:

Stat > DOE > Factorial > Factorial Plots

En Main effects Setup indicar en Responses columna de Resistencia y seleccionar factores con >>

En Interaction effects Setup indicar en Responses columna de Resistencia y seleccionar factores con >>

En Cube Plot indicar en Responses columna de Resistencia y seleccionar factores con >>

OK

Uso de la Metodología Seis Sigma para mejorar el consumo de combustible en un vehiculo

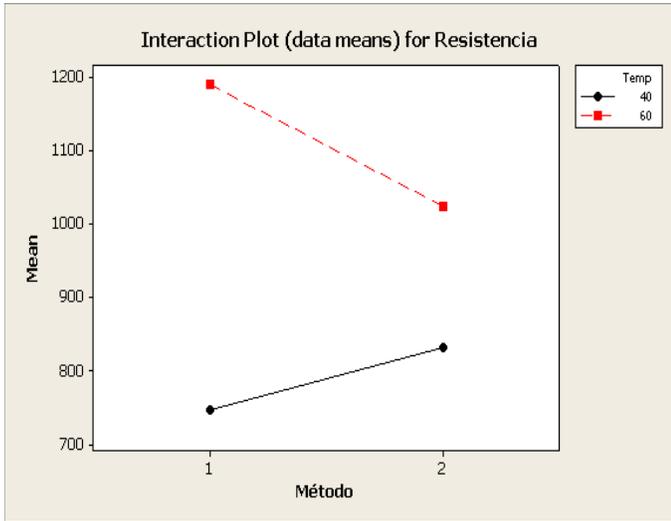


Figura 5.6 Interacción

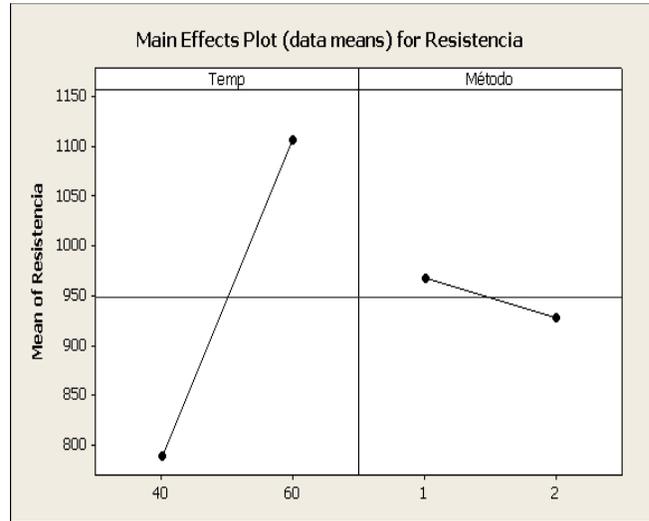


Figura 5.7 Efectos principales

Los niveles en que deben fijarse los factores para maximizar la resistencia son de la gráfica de interacción, Temp = 60°C y Método 1.

f) Obtener las gráficas de contornos y de superficie de respuesta con:

Stat > DOE > Factorial > Contour Plot

En Setup de Contour y Response Surface Plot solo entrar y salir OK

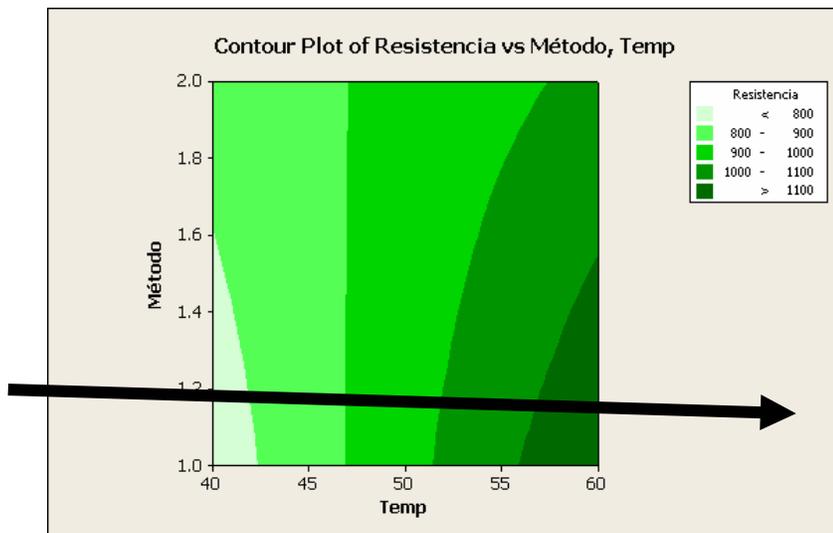


Figura 5.8 Grafica de Contorno

De acuerdo a la gráfica de contornos, conviene seguir experimentando aumentando gradualmente la temperatura hasta llegar al punto óptimo en una trayectoria de ascenso rápido.

Una vez establecidos los mejores niveles de operación del proceso por medio del Diseño de Experimentos, ahora se trata de mantener la solución por medio de la fase de Control.

Superficies de Respuesta

La técnica de superficies de respuesta se utiliza principalmente en las industrias de proceso y químicas, donde después de realizar un diseño de experimentos para identificar las variables relevantes, se hace un estudio posterior en los rangos relevantes de las variables con objeto de optimizar el proceso. Para la optimización, si las variables de control son dos o tres cuantitativas, se puede optimizar el proceso.

Suponiendo que se tiene un sistema con una variable de respuesta y que depende del nivel de varias variables de entrada: $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k$. Se asume que los niveles de las ξ 's pueden ser controladas con un error despreciable. El experimento se realiza con las variables de diseño x_1, x_2, \dots, x_k , las cuales son simples transformaciones de las ξ 's. Cada tratamiento puede ser representado por un punto con coordenadas $(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{ik})$ en un espacio factorial de k – dimensiones, en cada punto es observado un valor de y_i . Donde:

$$x_i = \frac{\xi_{ik} - \bar{\xi}_i}{\xi_{ik} - \xi_{ik-1}}; \quad \text{el denominador es la diferencia entre niveles de } \xi \text{'s.} \quad (5.1)$$

En general la respuesta es una función de las variables de entrada:

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n) \quad (5.2)$$

Esta función es desconocida y a veces complicada.

El procedimiento básico de superficies de respuesta consiste en aproximar la función $f(\xi)$ con un polinomio de bajo orden y usar datos de una muestra para aproximar por el método de mínimos cuadrados, los coeficientes del polinomio.

Supuestos básicos³³

1. Hay una estructura $y = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n)$, y es complicada.
2. Las variables ξ_i son cuantitativas y continuas.
3. La función verdadera $f(\xi)$ puede ser ajustada en la región de interés por un polinomio de bajo orden.
4. Variables de diseño $(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{ik})$ se controlan y se miden sin error.

La meta del análisis de superficies de respuesta es:

1. Encontrar una función de ajuste adecuada con el propósito de predecir respuesta futura.
2. Hallar los niveles de las variables de entrada para los cuales, en cierto sentido, la respuesta es optimizada.

Se toma un modelo de *primer orden* cuando el experimentador está interesado en analizar f en una región angosta de x_1, x_2, \dots, x_k , con poca curvatura presente. En términos de las variables se tiene:

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (5.3)$$

La ecuación de estimación para este modelo de primer orden es:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (5.4)$$

³³ Reyes, Primitivo, Curso de Superficies de Respuesta, pp 2-7, México, <http://www.icicm.com/>

Donde b_0, b_1 , son estimadores muestrales de β_0, β_1

Escribiendo la ecuación en forma matricial se tiene:

$$\mathbf{y} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{x}' \mathbf{b} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$$

De otra forma, el experimentador podría usar la función de aproximación de *segundo orden*, tomando los términos de primero y segundo orden de la expansión, se tiene el polinomio cuadrático:

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i < j} \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j \quad (5.6)$$

β_0, β_1, x_1 son del modelo de primer orden

β_{ii} = coeficiente cuadrático de la variable i

β_{ij} = coeficiente de interacción de las variables i, j .

La ecuación de estimación para este modelo, en forma matricial se puede escribir como:

$\mathbf{y} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{x}' \mathbf{b} + \mathbf{x}' \mathbf{B} \mathbf{x}$, donde la matriz \mathbf{B} , es:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11}, b_{12} / 2, \dots, \dots, b_{1k} / 2 \\ \dots, b_{22}, \dots, \dots, b_{2k} / 2 \\ \dots, \dots, \dots, b_{(k-1),k} / 2 \\ \dots, \dots, \dots, \dots, b_{kk} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Ejemplo 5.4

Un químico realiza un experimento para observar el efecto de la temperatura T_p y el tiempo de reacción T_m , sobre el rendimiento de un proceso usado para producir antibióticos. El experimento es como sigue:

| <u>Tratamiento</u> | <u>T_p</u> | <u>T_m</u> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 20 | 20 |
| 2 | 20 | 50 |
| 3 | 20 | 80 |
| 4 | 50 | 20 |
| 5 | 50 | 50 |
| 6 | 50 | 80 |
| 7 | 80 | 20 |
| 8 | 80 | 50 |
| 9 | 80 | 80 |

Transformando los datos para las variables de diseño x_{1i} , x_{2i} con:

$x_{ij} = (\xi_{ij} - 50) / 30$ se tiene la siguiente tabla:

| <u>Tratamiento</u> | <u>x_1</u> | <u>x_2</u> | <i>Bloques</i> | | | <u>Totales</u> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-----------|------------|----------------|
| | | | <u>I</u> | <u>II</u> | <u>III</u> | |
| 1 | -1 | -1 | 13.66 | 13.16 | 15.05 | 41.87 |
| 2 | -1 | 0 | 12.23 | 13.84 | 11.85 | 36.92 |
| 3 | -1 | 1 | 7.97 | 10.19 | 8.38 | 26.54 |
| 4 | 0 | -1 | 16.98 | 13.42 | 14.29 | 44.69 |
| 5 | 0 | 0 | 13.8 | 15.55 | 13.92 | 43.27 |
| 6 | 0 | 1 | 12.86 | 18.27 | 15.00 | 46.13 |
| 7 | 1 | -1 | 10.00 | 10.01 | 11.10 | 31.11 |
| 8 | 1 | 0 | 10.88 | 12.18 | 11.13 | 34.19 |
| 9 | 1 | 1 | 13.28 | 10.06 | 11.96 | 35.30 |
| <u>Totales</u> | | | 111.96 | 115.78 | 112.68 | 340.02 |

Haciendo un análisis de varianza preliminar con los datos anteriores para el diseño en bloques aleatorios se tiene:

La suma de cuadrados total es:

$$SS_T = \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^3 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{9 \times 3}$$

$$SST = 13.66^2 + 13.16^2 + \dots + 10.06^2 + 11.96^2 - (340.06)^2 / 27$$

$$SST = 154.1606 \quad \text{con } N - 1 \text{ grados de libertad } gl = 26$$

La suma de cuadrados para los 9 tratamientos es:

$$SS_{trat} = \sum_{i=1}^9 \frac{y_{i.}^2}{3} - \frac{y_{..}^2}{9 \times 3}$$

$$SSt = [41.87^2 + 36.92^2 + \dots + 34.19^2 + 35.30^2] / 3 - (340.06)^2 / 27$$

$$SSt = 118.3145 \quad \text{con } i - 1 \text{ grados de libertad } gl = 8$$

La suma de cuadrados de los 3 bloques es:

$$SS_{bloque} = \sum_{j=1}^3 \frac{y_{.j}^2}{9} - \frac{y_{..}^2}{9 \times 3}$$

$$SSb = [111.16^2 + 115.78^2 + 112.68^2] / 9 - (340.06)^2 / 27$$

$$SSb = 0.907 \quad \text{con } j - 1 \text{ grados de libertad } gl = 2$$

Para el error se tiene:

$$SSe = SST - SSt - SSb = 154.1606 - 118.3145 - 0.9704$$

$$SSe = 34.8757$$

Para la formación de la tabla ANOVA se calculan las sumas promedio cuadradas MS y el estadístico F como:

$$MSt = SSt / gl_t$$

$$MSb = SSb / gl_b$$

$$F = (MSt \text{ o } MSb) / MSe$$

Por tanto se tiene:

TABLA ANOVA

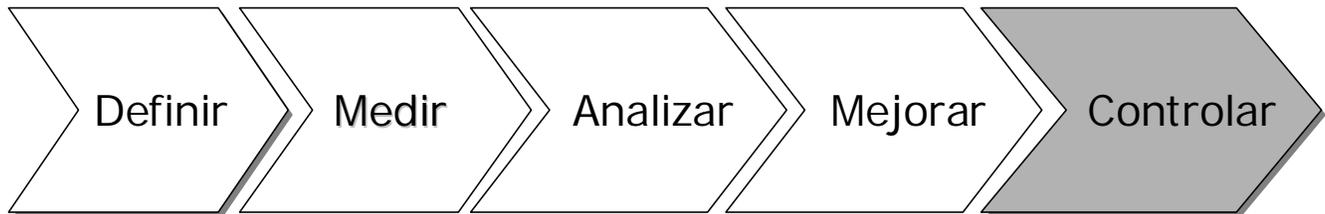
| Fuente de variación | Suma de cuadrados | grados de libertad | Cuadrados medios | estadístico F |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|---------------|
| Total | 154.1606 | 26 | | |
| Bloque | 0.9704 | 2 | 0.4852 | |
| Tratamiento | 118.3145 | 8 | 14.7893 | 6.78** |
| Error | 34.8757 | 16 | 2.1797 | . |

** significativo al nivel de 1% con F de tablas = 3.9, $p = 0.000$

Conclusiones

Hasta aquí hemos revisado las diferentes etapas de la Fase de Mejora el Diseño de experimentos Factoriales, el Diseño Factorial 2^k , la prueba de Normalidad de Residuos, los efectos de los factores principales, así como, sus interacciones, las Gráficas de Contorno y por último lo referente a las superficies de respuesta.

CAPÍTULO 6 FASE DE CONTROL



6.1 Introducción

Una vez implementadas las mejoras en nuestro proceso, el último paso es asegurar que las implementaciones se mantengan y estén siendo actualizadas a través del tiempo.

Los proyectos *Six-Sigma* se van actualizando constantemente. En la siguiente figura 6.1³⁵ se observa que la técnica es cíclica, también se puede regresar de una fase a otra, en caso de no haber obtenido la información necesaria, pero lo que no está permitido es saltar fases.

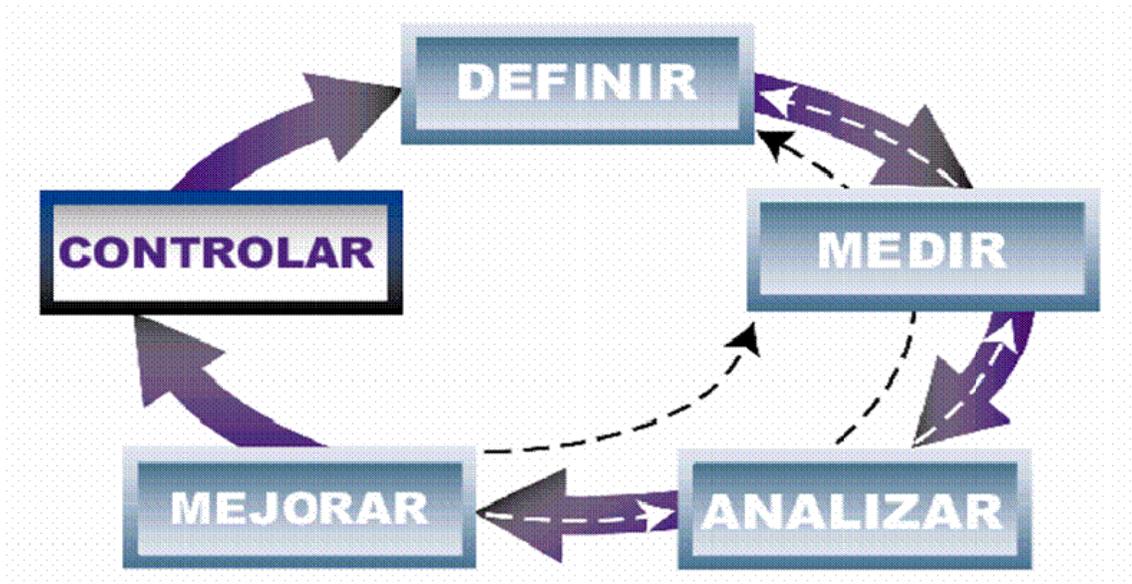


Figura 6.1 Seis Sigma es una Técnica Cíclica

³⁵ Salinas, Emilio, Diseño de Experimentos, Apuntes Seis Sigma, p 34, México, Tlmatini-UIA, 2006.

INTERRELACION DE DMAIC CON EL SISTEMA DE CALIDAD



Figura 6.2 Interrelación con el Sistema de Calidad

Objetivos:

- Uso de las herramientas de control.
- Verificar que las implementaciones se sigan y estén bajo control.
- Identificar las actividades o procesos que están fuera de control para corregirlos inmediatamente.
- Las mejoras se implementan consistentemente para tener control.

Las herramientas a utilizar se muestran en la tabla 6.1:

| Herramienta | ¿Para que es utilizada? |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Precontrol | Técnica usada para detectar fallas en el proceso, que resultarán en producción de piezas fuera de especificación. Se usa para determinar los valores de las variables del proceso durante el período de arranque de la producción. |
| Cartas de Control | Es una herramienta muy importante para analizar la variación en la mayoría de los procesos. Enfocan la atención hacia las causas especiales de variación y reflejan la magnitud de la variación debido a las causas comunes. |

| | |
|-----------|------------------------------------------|
| Poka-Yoke | Sistemas utilizados a prueba de errores. |
|-----------|------------------------------------------|

Tabla 6.1 Herramientas de la Fase de Control

6.2 Etapas de la fase de control

Las etapas de esta fase son las siguientes:

6.2.1 Validar el sistema de medición.

La Fase de Medición se validó el sistema de medición para la Y, aquí se utiliza la misma técnica, pero para validar a las X's del proceso.

6.2.2 Determinar la capacidad del proceso.

Ya implantadas las mejoras se vuelve a calcular el nivel de sigma del proceso, para saber en que nivel nos encontramos actualmente.

6.2.3 Implementar el sistema de control.

Los procesos tienden a degradarse con el tiempo, por lo que es muy importante el implementar un plan de control para cada X's, para esto es necesario tener procesos y procedimientos documentados y entrenar al personal que llevará a cabo esta actividad. En la figura 6.3, se observan los elementos para un adecuado plan de control:



Figura 6.3 Elementos del Plan de Control

- **Riesgo de la administración:** Es similar a un FMEA³⁶, los cálculos son de la siguiente manera:

³⁶ Brassard, Michael, Six Sigma Memory Jogger II, USA. Editorial Goal/QPC. 2002

Puntuación del riesgo de la admón. = Impacto X probabilidad

Proporciona las siguientes ventajas:

- Identificación del riesgo.
- Cuantificación de los riesgos
- Establece un plan de disminución de riesgos
- Monitorear los progresos del plan

➤ **A prueba de errores**

Técnica que evita errores en el proceso, y hace que sea imposible que se cometan.

➤ **Control estadístico del proceso:** Monitoreo de características críticas mediante el uso de gráficas de control.

➤ **Un plan de control:** Plan para el control de características críticas.

| PLAN DE CONTROL <i>(Información general de la organización)</i> | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Proces | Variable | Especificaciones | Controles | Muestreo (Tamaño/ Fecuencia) | Plan de reacción con producto fuera de especificación y/o parámetros de proceso |
| | | | | | |

Figura 6.4 Plan de control característico

6.3 Cartas de Control

Las cartas de control son la herramienta más poderosa para monitorear y analizar la variación en la mayoría de los procesos.

Las cartas de control enfocan la atención hacia las causas especiales de variación cuando estas aparecen y reflejan la magnitud de la variación debida a las causas comunes, manteniendo las soluciones

Las **causas comunes o aleatorias** se deben a la variación natural del proceso.

Las **causas especiales o asignables** son por ejemplo: un mal ajuste de máquina, errores del operador, defectos en materias primas.

Un proceso está bajo *Control Estadístico* cuando presenta causas comunes únicamente, con un proceso estable y predecible.

Cuando existen causas especiales, el proceso está fuera de Control Estadístico.

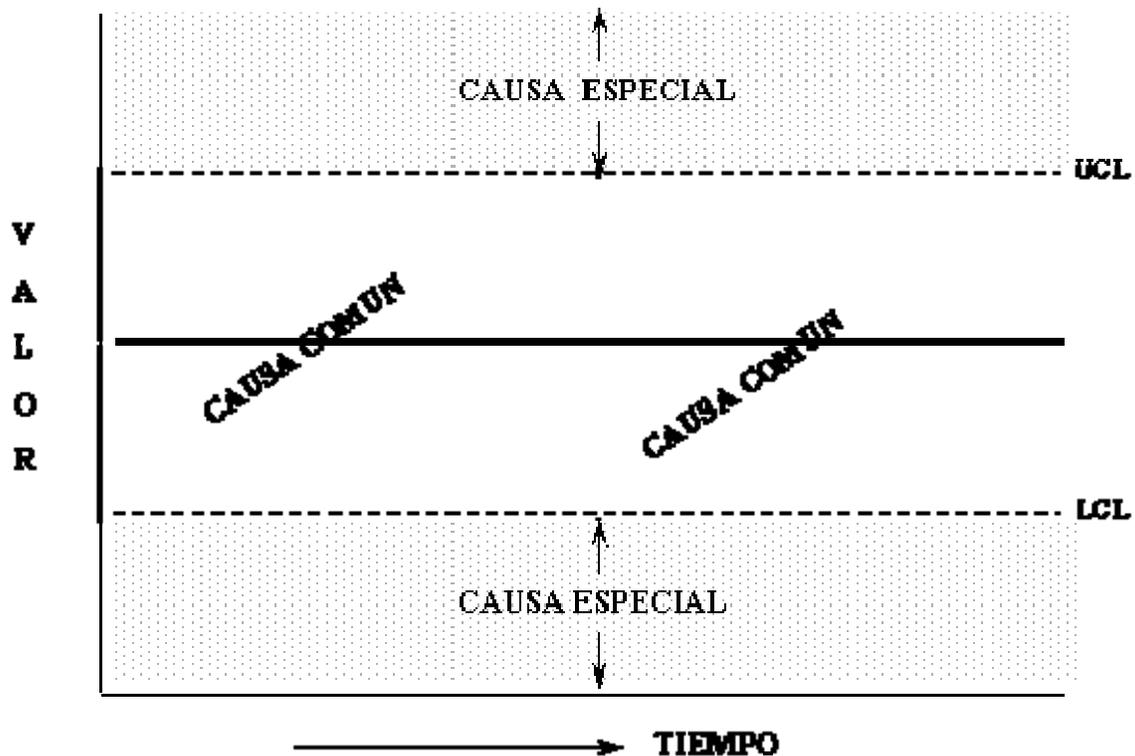


Figura 6.5 Carta de control

Ventajas:

- Herramienta simple y efectiva para lograr un control estadístico.
- El operario manejará las cartas en su propia área de trabajo, por lo cual puede dar una respuesta confiable de lo acontecido en ellas.

- Cuando un proceso está en control estadístico puede predecirse su desempeño respecto a las especificaciones. Por lo tanto el proveedor como el cliente pueden contar con niveles consistentes de calidad.
- Una vez que un proceso se encuentra en control estadístico, su comportamiento puede ser mejorado reduciendo su variación.

Cartas de control por *variables* y por *atributos*.-

Control de Calidad mediante el término **variable** designa a cualquier característica de calidad como “medible” tal como el tiempo, el peso, la temperatura, etc. Mientras que se denomina **atributo** a las características de calidad que no se miden y que presentan diferentes tales como conforme y disconforme o defectuoso y no defectuoso.

Dependiendo del tipo de característica de calidad a controlar así será la carta de control correspondiente, por tanto, se clasifican en Cartas de Control por Variables y Cartas de Control por Atributos, ver tabla 6.2.

| | Cartas de Control por variables | Cartas de control por atributos |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventajas significativas | Conducen a un mejor procedimiento de control. | Son útiles y aplicables a cualquier proceso |
| | Proporcionan una explicación grande de la variación disponible de datos. | Los datos están a menudo disponibles. Son rápidos y simples de obtener. Son fáciles de interpretar. |
| | | Son típicamente usados en los informes a la Gerencia. |
| Desventajas significativas | No se entienden a menos que se de capacitación; puede causar confusión entre los limites de especificación y los límites de tolerancia. | No proporciona información detallada del control de características individuales. |
| | | No reconoce distintos grados de defectos en las características de producto. |

Tabla 6.2 Comparación entre Atributos y Variables

Campos de aplicación de las cartas

Variables

| Carta | Descripción | Campo de aplicación |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{X} - R$ | Medias y Rangos | Control de características individuales. |
| $\bar{X} - S$ | Medias y desviación estándar. | Control de características individuales. |
| I-MR | Individuales | Control de un proceso con datos que no pueden ser muestreados en lotes o grupos. |

Tabla 6.3 Tipos de Cartas por Variables

Atributos

| Carta | Descripción | Campo de aplicación |
|-------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| P | Proporciones o fracción defectiva | Control de la fracción global de defectuosos de un proceso. |
| NP | Número de defectuosos | Control del número de piezas defectuosas |
| C | Defectos por unidad | Control de número global de defectos por unidad |
| U | Promedio de defectos por unidad | Control del promedio de defectos por unidad. |

Tabla 6.4 Tipos de Cartas por Atributos

Elaboración de las Cartas de control $\bar{X} - R$ (variables)

Paso 1: Colectar los datos.

Los datos son el resultado de la medición de las características del producto, los cuales deben de ser registrados y agrupados como sigue:

- Se toma una muestra(subgrupo) de 2 a 10 piezas consecutivas y se anotan los resultados de la medición(se recomienda tomar 5). También pueden ser tomadas en intervalos de tiempo de ½ - 2 hrs., para detectar si el proceso puede mostrar inconsistencia en breves periodos de tiempo.
- Se realizan las muestras de 20 a 25 subgrupos.

Paso 2: Calcular el promedio \bar{X} y R para cada subgrupo

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 \dots X_N}{N} \quad (6.1)$$

$$\bar{R} = X_{mayor} - X_{menor} \quad (6.2)$$

Paso 3: Calcule el rango promedio (\bar{R}) y el promedio del proceso (\bar{X}).

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots R_K}{K} \quad (6.3)$$

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots \bar{X}_K}{K} \quad (6.4)$$

Donde K es el número de subgrupos, R_1, R_2 es el rango de cada subgrupo; $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots$ son el promedio de cada subgrupo.

Paso 4: Calcule los limites de control

Los límites de control son calculados para determinar la localización de cada subgrupo, están basados en el tamaño de los subgrupos y se calculan de la siguiente forma:

$$LSC_R = D_4 \bar{R} \quad (6.5)$$

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2 \bar{R} \quad (6.6)$$

$$LIC_R = D_3 \bar{R} \quad (6.7)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2 \bar{R} \quad (6.8)$$

Donde D_3, D_4 y A_2 son constantes que varían por el tamaño de muestra. A continuación se presentan los valores de dichas constantes para tamaños de muestra de 2 a 10.

| N | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D_4 | 3.27 | 2.57 | 2.28 | 2.11 | 2.00 | 1.92 | 1.86 | 1.82 | 1.78 |
| D_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.08 | 0.14 | 0.18 | 0.22 |
| A_2 | 1.88 | 1.02 | 0.73 | 0.58 | 0.48 | 0.42 | 0.37 | 0.34 | 0.31 |

Tabla 6.5 Valores de las constantes D

Paso 5: Seleccione la escala para las gráficas de control

Para la gráfica \bar{X} la amplitud de valores de la escala debe ser al menos del tamaño de los límites de tolerancia especificados o dos veces el rango promedio (\bar{R}).

Para la gráfica R la graficarse debe extenderse desde un valor cero hasta un valor superior equivalente a $1\frac{1}{2}$ - 2 veces el rango.

Paso 6: Trace la carta de control

Los límites de Control se dibujan con una línea discontinua y los promedios con una línea continua para ambas cartas.

Marcar los puntos en ambas gráficas y unirlos para visualizar de mejor manera el comportamiento del proceso.

Paso 7: Analizar la gráfica de control

Ejemplo 6.1

Se toman las medidas de los diámetros de una pieza cilíndrica, el tamaño de muestra de cada subgrupo es de cinco, y se toman 25 subgrupos a intervalos de 1 hr.

Realice la carta de control $\bar{X} - R$

| muestra \ subgrupo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.65 | 0.75 | 0.75 | 0.60 | 0.70 | 0.60 | 0.15 | 0.60 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 0.85 | 0.70 |
| 2 | 0.70 | 0.85 | 0.80 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.80 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.70 |
| 3 | 0.65 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.85 | 0.60 | 0.90 | 0.85 | 0.75 |
| 4 | 0.65 | 0.85 | 0.70 | 0.75 | 0.85 | 0.85 | 0.75 | 0.75 | 0.85 | 0.80 | 0.50 | 0.65 | 0.75 |
| 5 | 0.85 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.70 | 0.70 |

| muestra \ subgrupo | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.65 | 0.90 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.65 | 0.60 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.65 | 0.65 |
| 2 | 0.70 | 0.80 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.80 | 0.65 | 0.60 | 0.70 |
| 3 | 0.85 | 0.80 | 0.75 | 0.85 | 0.60 | 0.85 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.70 |
| 4 | 0.75 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 0.65 | 0.65 | 0.60 | 0.60 |
| 5 | 0.60 | 0.85 | 0.65 | 0.80 | 0.60 | 0.70 | 0.65 | 0.80 | 0.75 | 0.65 | 0.70 | 0.65 |

Tabla 6.6 Datos para la Carta \bar{X}

Calculando el rango y el promedio para cada subgrupo obtenemos:

| muestra \ subgrupo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.65 | 0.75 | 0.75 | 0.60 | 0.70 | 0.60 | 0.15 | 0.60 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 0.85 | 0.70 |
| 2 | 0.70 | 0.85 | 0.80 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.80 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.70 |
| 3 | 0.65 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.85 | 0.60 | 0.90 | 0.85 | 0.75 |
| 4 | 0.65 | 0.85 | 0.70 | 0.75 | 0.85 | 0.85 | 0.75 | 0.75 | 0.85 | 0.80 | 0.50 | 0.65 | 0.75 |
| 5 | 0.85 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.75 | 0.75 | 0.65 | 0.80 | 0.70 | 0.70 |
| Promedio | 0.70 | 0.77 | 0.76 | 0.68 | 0.75 | 0.73 | 0.61 | 0.72 | 0.78 | 0.67 | 0.75 | 0.76 | 0.72 |
| Rango | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.65 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.20 | 0.05 |

| muestra \ subgrupo | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.65 | 0.90 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.65 | 0.60 | 0.50 | 0.60 | 0.80 | 0.65 | 0.65 |
| 2 | 0.70 | 0.80 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.80 | 0.65 | 0.60 | 0.70 |
| 3 | 0.85 | 0.80 | 0.75 | 0.85 | 0.60 | 0.85 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.75 | 0.65 | 0.70 |
| 4 | 0.75 | 0.75 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 0.65 | 0.65 | 0.60 | 0.60 |
| 5 | 0.60 | 0.85 | 0.65 | 0.80 | 0.60 | 0.70 | 0.65 | 0.80 | 0.75 | 0.65 | 0.70 | 0.65 |
| Promedio | 0.71 | 0.82 | 0.75 | 0.76 | 0.67 | 0.70 | 0.62 | 0.66 | 0.69 | 0.70 | 0.64 | 0.66 |
| Rango | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.10 |

Tabla 6.7 Datos para la Carta R

Calcular el Rango promedio, promedio del proceso y límites de control:

$$\bar{R} = 0.198$$

$$\bar{X} = 0.71$$

$$\bar{X} LSC_R = D_4 \bar{R} = 2.11 * 0.198 = 0.41$$

$$LIC_R = D_3 \bar{R} = 0$$

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2 \bar{R} = 0.71 + (0.58)(0.198) = 0.82$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2 \bar{R} = 0.71 - (0.58)(0.198) = 0.59$$

La carta se puede obtener con Minitab con:

Stat > Control Charts > Variable charts for subgroups

Xbar-R Seleccionar Observations for a Subgroup are in a row of columns

Indicar las 5 columnas de datos OK

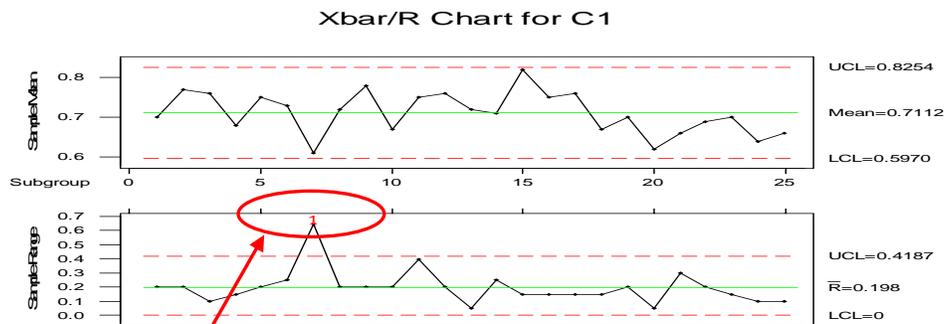


Figura 6.6 Carta X - R

La gráfica de control R muestra un punto fuera de los límites de control.

El proceso esta fuera de control es decir, inestable; aquí se investigarán las causas para tomar acciones correctivas y eliminar el problema.

Interpretación del control del proceso.

Al analizar una gráfica de control se identifica el tipo de variación del proceso, causas comunes o causas especiales. Juran³⁷ sugiere un conjunto de reglas de decisión para detectar patrones no aleatorios en las cartas de control.

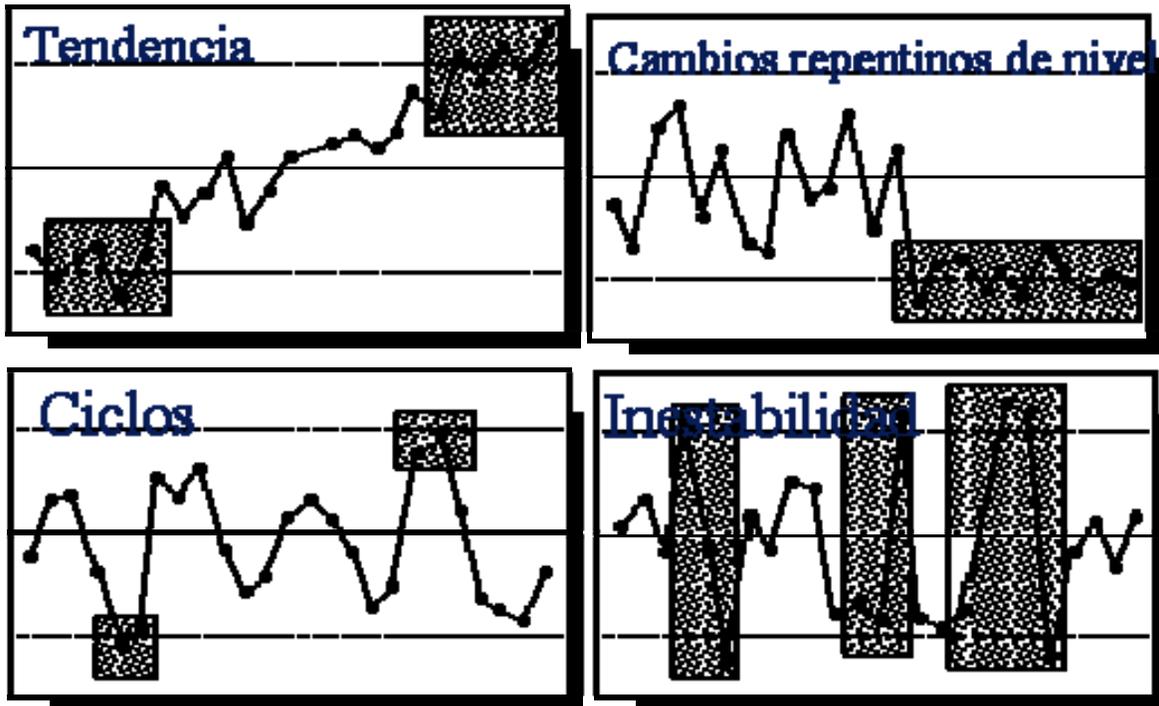


Figura 6.7 Causas especiales de Variación

Carta de Individuales y rango móvil (Datos variables I-MR).

- Se llama "I" o " X_i ". Esta Carta monitorea la tendencia de un proceso con datos variables que no pueden ser muestreados en subgrupos.
- La capacidad de corto plazo se basa en subgrupos de una unidad.
- Esta gráfica es usada cuando las mediciones son muy costosas (Por ejemplo Pruebas destructivas), o cuando la característica a medir en cualquier punto en el tiempo es relativamente.

¹⁶ Juran J. M., Gryna, F. M., Análisis y planeación de la calidad, Tercera Edición, Mc Graw Hill.

- La línea central se basa en el promedio de los datos, y los límites de control se basan en la desviación estándar (+/- 3 sigmas)

Terminología

k = número de piezas

n = 2 para calcular los rangos

\bar{X} = promedio de los datos

R = rango de un subgrupo de dos piezas consecutivas

\bar{R} = promedio de los (n - 1) rangos

$$LSC_x = \bar{X} + E_2\bar{R} \quad (6.9) \quad LSC_R = D_4\bar{R} \quad (6.10)$$

$$LIC_x = \bar{X} - E_2\bar{R} \quad (6.11) \quad LSC_R = D_4\bar{R} \quad (6.12)$$

Donde D_4 , D_3 y E_2 son constantes que varían según el tamaño de muestra para rangos móviles como se muestra en la tabla siguiente:

| n | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D_4 | 3.27 | 2.57 | 2.28 | 2.11 | 2.00 | 1.92 | 1.86 | 1.82 | 1.78 |
| D_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.08 | 0.14 | 0.18 | 0.22 |
| E_2 | 2.66 | 1.77 | 1.46 | 1.29 | 1.18 | 1.11 | 1.05 | 1.01 | 0.98 |

Tabla 6.8 Constantes D

Ejemplo 6.2 : La longitud de un tramo de tubo se registra para cada producto. Realice la gráfica de control individual.

| Parte | Longitud |
|-------|----------|
| 1 | 12.02 |
| 2 | 11.85 |
| 3 | 11.98 |
| 4 | 11.72 |
| 5 | 11.88 |
| 6 | 12.07 |
| 7 | 12.03 |
| 8 | 12.13 |
| 9 | 12.16 |
| 10 | 12.16 |
| 11 | 12.16 |
| 12 | 12.21 |
| 13 | 12.19 |
| 14 | 11.93 |
| 15 | 11.89 |

Tabla 6.9 Datos por individuales

Se calcula el rango móvil de la siguiente manera: diferencia entre 1ª y 2ª lectura, 2ª y 3ª y así hasta n-1.

| Parte | Longitud | Rangos |
|-------|----------|--------|
| 1 | 12.02 | 0.17 |
| 2 | 11.85 | 0.13 |
| 3 | 11.98 | 0.26 |
| 4 | 11.72 | 0.16 |
| 5 | 11.88 | 0.19 |
| 6 | 12.07 | 0.04 |
| 7 | 12.03 | 0.10 |
| 8 | 12.13 | 0.03 |
| 9 | 12.16 | 0.00 |
| 10 | 12.16 | 0.00 |
| 11 | 12.16 | 0.05 |
| 12 | 12.21 | 0.02 |
| 13 | 12.19 | 0.26 |
| 14 | 11.93 | 0.04 |
| 15 | 11.89 | |
| | 12.03 | 0.10 |

$\bar{X} = 12.03$
 $\bar{R} = 0.10$

Tabla 6.10 Obtención de los rangos móviles

$LSC_x = \bar{X} + E_2\bar{R} = 12.03 + (2.66)(.10) = 12.29$

$LIC_x = \bar{X} - E_2\bar{R} = 12.03 - (2.66)(.10) = 11.76$

$LSC_R = D_4\bar{R} = 3.27(.10) = .327$

$LIC_R = D_3\bar{R} = 0$

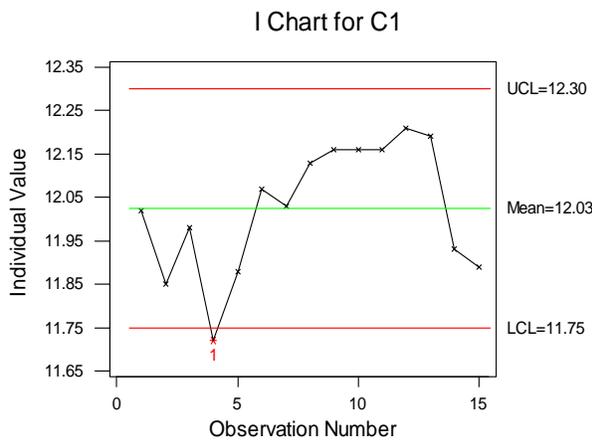


Figura 6.8 Carta por Individuales

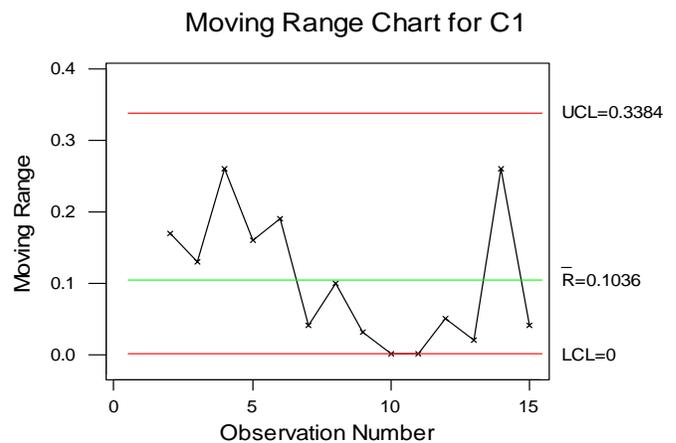


Figura 6.9 Carta de Rangos móviles

Interpretación del proceso:

- Ver en la Carta de rangos los puntos fuera de los límites de control como la presencia de causas especiales. Note que los rangos sucesivos están relacionados, ya que tienen un punto en común y debido a esto se tiene que tener cuidado al interpretar tendencias.
- Las Cartas de lecturas individuales pueden ser analizadas para puntos fuera de los límites de control, dispersión de puntos dentro de los límites de control y para tendencias o patrones. Cabe hacer notar que si la distribución de proceso no es simétrica, las reglas mostradas anteriormente para gráficas \bar{X} podrán dar señales de causas especiales sin que éstas existan.

Cartas de control por atributos

Cualquier característica de calidad que se clasifique como: "cumple o no cumple", "funciona o no funciona", "pasa o no pasa", etc., a los efectos de control del proceso, será considerado como un atributo.

Los criterios de aceptación al utilizar gráficas de control por atributos deben estar claramente definidos y el procedimiento para decidir si esos criterios se están alcanzando es producir resultados consistentes a través del tiempo. Este procedimiento consiste en definir operacionalmente lo que se desea medir. Una definición operacional consiste en:

- 1°. Un criterio que se aplica a un objeto o a un grupo
- 2°. Una prueba del objeto o del grupo y
- 3°. Una decisión, sí o no: El objeto o el grupo alcanza o no el criterio.

Gráfica P para Fracción de Unidades Defectuosas (atributos)

La gráfica p mide la fracción defectuosa o las piezas defectuosas del proceso. Se puede referir a muestras de 75 piezas, tomada dos veces

por día; 100% de la producción durante una hora, etc. Se basa en la evaluación de una o varias características. Se necesita que se registre cada componente o producto como aceptado o defectuoso.

Pasos para la elaboración de la gráfica:

Paso 1.- Frecuencia y tamaño de la muestra:

Frecuencia con la cual los datos serán tomados (horarios, diarios, semanales). Los intervalos cortos entre tomas permitirán una rápida retroalimentación al proceso. Los tamaños grandes permiten evaluar procesos estables del desarrollo del proceso y son más sensibles a pequeños cambios en el promedio del mismo. Se aconseja tomar tamaños de muestra iguales aunque no necesariamente se tiene que dar esta situación, el tamaño de muestra debería de ser mayor a 30.

Paso 2.- Calculo de la fracción defectuosa (p) del subgrupo:

Registre la siguiente información para cada subgrupo:

El número de partes inspeccionadas – n

El número de partes defectuosas – np

Calcule la fracción defectuosa (p) mediante:
$$p = \frac{np}{n} \quad (6.13)$$

Paso 3. – Calculo de fracción defectuosa promedio y sus límites.

La fracción defectuosa promedio para los k subgrupos se calcula con la siguiente fórmula:

$$\bar{p} = \frac{np_1 + np_2 + \dots + np_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k} \quad (6.14)$$

$$LSC_p = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (6.15) \quad LIC_p = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (6.16)$$

Donde \bar{n} es el tamaño de muestra promedio.

NOTA: Cuando \bar{p} y/o \bar{n} es pequeño, el límite de control inferior puede resultar negativo, en estos casos el valor del límite será = 0

Paso 4.- Trace la Carta y analice los resultados.

Ejemplo 6.3:

Un fabricante de latas de aluminio registra el número de partes defectuosas, tomando muestras cada hora de $n = 50$, con 30 subgrupos. Realizar la gráfica de control para la siguiente serie de datos obtenida durante el muestreo.

| Muestra | Latas defectuosas np | Muestra | Latas defectuosas np |
|---------|-------------------------|---------|-------------------------|
| 1 | 12 | 16 | 8 |
| 2 | 15 | 17 | 10 |
| 3 | 8 | 18 | 5 |
| 4 | 10 | 19 | 13 |
| 5 | 4 | 20 | 11 |
| 6 | 7 | 21 | 20 |
| 7 | 16 | 22 | 18 |
| 8 | 9 | 23 | 24 |
| 9 | 14 | 24 | 15 |
| 10 | 10 | 25 | 9 |
| 11 | 5 | 26 | 12 |
| 12 | 6 | 27 | 7 |
| 13 | 17 | 28 | 13 |
| 14 | 12 | 29 | 9 |
| 15 | 22 | 30 | 6 |

Tabla 6.11 Datos para cartas "p"

Calcule la fracción defectuosa para cada muestra:

| Muestra | Latas defectuosas np | Fracción defectuosa p | Muestra | Latas defectuosas np | Fracción defectuosa p |
|---------|-------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 12 | 0.24 | 16 | 8 | 0.16 |
| 2 | 15 | 0.30 | 17 | 10 | 0.20 |
| 3 | 8 | 0.16 | 18 | 5 | 0.10 |
| 4 | 10 | 0.20 | 19 | 13 | 0.26 |
| 5 | 4 | 0.08 | 20 | 11 | 0.22 |
| 6 | 7 | 0.14 | 21 | 20 | 0.40 |
| 7 | 16 | 0.32 | 22 | 18 | 0.36 |
| 8 | 9 | 0.18 | 23 | 24 | 0.48 |
| 9 | 14 | 0.28 | 24 | 15 | 0.30 |
| 10 | 10 | 0.20 | 25 | 9 | 0.18 |
| 11 | 5 | 0.10 | 26 | 12 | 0.24 |
| 12 | 6 | 0.12 | 27 | 7 | 0.14 |
| 13 | 17 | 0.34 | 28 | 13 | 0.26 |
| 14 | 12 | 0.24 | 29 | 9 | 0.18 |
| 15 | 22 | 0.44 | 30 | 6 | 0.12 |

Tabla 6.12 Cálculo de la Fracción Defectuosa

$$\bar{p} = 0.2313$$

$$LSC_p = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = 0.2313 + 3\sqrt{\frac{.23*.77}{50}} = 0.4102$$

$$LIC_p = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = 0.2313 - 3\sqrt{\frac{.23*.77}{50}} = 0.05243$$

Trazando la Carta p:

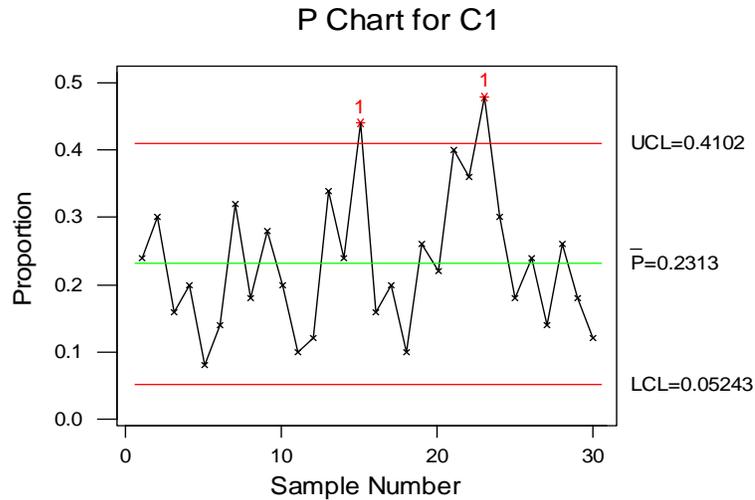


Figura 6.10 Carta "p"

6.4 Dispositivos a Prueba de Error o Poka Yoke

Un sistema Poka-Yoke³⁸ posee dos funciones: puede realizar el 100 % de inspecciones y si ocurre alguna anomalía, puede realizar inmediatamente una acción de aviso.

Los sistemas Poka-Yoke son métodos para reducir defectos, estos varían dependiendo de los sistemas de inspección los cuales pueden ser: inspecciones en la fuente, auto chequeos, o chequeos sucesivos.

Tipos de sistemas Poka-Yoke:

A continuación se describen algunos sistemas Poka-Yoke:

³⁸ Shigeo Shingo, Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System, Productivity Press 1986

6.4.1 Métodos de Control – Tipo A

Cuando ocurre alguna anomalía los métodos de control, funcionan de tal manera que se apagan las máquinas o se bloquea algún mecanismo para detener la operación, previniendo la ocurrencia de defectos subsecuentes.

Los sistemas de control se caracterizan por tener una eficacia máxima para obtener cero defectos. Estos sistemas no solamente consisten en apagar las máquinas o bloquear algún mecanismo sino que existe la posibilidad de que estos sistemas separen alguna pieza defectuosa al momento de ser detectada.

6.4.2 Métodos de Alarma – Tipo B

Estos métodos llaman la atención de los trabajadores activando alguna alarma o luz cuando ocurre alguna anomalía. El riesgo de estos métodos es que a veces los trabajadores no detecten la luz o el sonido de las alarmas. Para minimizar estos riesgos se puede utilizar luz intermitente que sea más fácil de detectar y sonidos con timbres particulares en diferentes escalas.

Los métodos de alarma pueden ser utilizados cuando el impacto de una anomalía no es demasiado crítica en el proceso o cuando los métodos de control resultan económica y técnicamente poco viables.

6.4.3 Mecanismos a Prueba de Error

Métodos de Contacto

Son métodos en los que por medio de mecanismos sensibles, se detectan anomalías en la dimensión o la forma del producto. Por ejemplo en un sistema de frenos se ensambla una pieza que puede ser

izquierda o derecha, al momento del ensamble se puede cometer el error de colocar una parte derecha cuando se debería de colocar una izquierda, para evitar este defecto se instala un tope que impide que se coloque por ejemplo una parte derecha.

Métodos de valor fijo:

Con estos métodos, las anomalías son detectadas verificando el número específico de movimientos en los casos en que las operaciones se repiten un número determinado de veces.

Como ejemplo tenemos el caso en el cual se aplica un recubrimiento adhesivo a una barra metálica, aplicando tiras de 8cm alrededor de la barra. Se tienen que aplicar 50 tiras, pero el problema que se tiene es que en ocasiones se corre el riesgo de aplicar menos de 50 unidades o más. Para solucionar este problema se implementa un sistema Poka-Yoke de la siguiente manera.

Se cortan y se cuentan previamente las tiras en grupos de 10 unidades, las cintas son adheridas a la barra, si al final de la operación sobran cintas el operador se da cuenta e inmediatamente corrige el trabajo.

Métodos de movimientos de paso

Son métodos en los cuales las anomalías se detectan al verificar los errores en movimientos estándar, cuando las operaciones tienen que ser realizadas con movimientos predeterminados. Estos sistemas son extremadamente efectivos y tienen un amplio rango de aplicación.

En un proceso de etiquetado los operadores algunas veces fallan al aplicar las etiquetas, este defecto puede ser evitado antes de la inspección mediante un dispositivo que consta de un tubo fotoeléctrico

que detecta la falta de una etiqueta, parando inmediatamente la línea, para corregir el defecto.

Conclusiones

En este capítulo se expusieron las etapas de la Fase de Control, las Cartas de Control tanto por Variables como por Atributos por último se explico lo referente a los Dispositivos a prueba de Error, mejor conocidos cono Poka Yoke.

Hasta aquí se han revisado los aspectos más relevantes de la Metodología Seis Sigma y sus diferentes fases: Definir, Medir, Analizar, Mejorar (Improbé por su traducción al inglés) y Control, así como las herramientas estadísticas que maneja describiendo con mayor detalle aquellas que se consideraron más relevantes.

Pasaremos ahora a nuestro caso real de aplicación de la Metodología Seis Sigma en la solución de un caso real.

CAPÍTULO 7. Caso práctico de aplicación de la Metodología Seis Sigma en la Mejora del Desempeño en el Consumo de Combustible de un Vehículo

7.1 Antecedentes

El caso de aplicación de la Metodología Seis Sigma se realizó en una de las principales empresas automotrices del mundo y por obvias razones también una de las principales de nuestro país. Sus características y nombre comercial, no podrán ser mencionados en este trabajo, debido a que se incurriría en situaciones de índole legal (patentes, marcas registradas, etc.), que no pueden ser sufragadas por el sustentante.

Para este trabajo se solicitó la anuencia de un Master Black Belt³⁹ de dicha compañía, el cual dio su aval para poder escoger un proyecto de esta empresa y ser presentado como proyecto de trabajo terminal.

Esta ensambladora, comercializa los siguientes productos:

- a) Autos sub-compactos
- b) Autos compactos
- c) Autos familiares
- d) Autos deportivos
- e) Autos de lujo y súper lujo
- f) Camiones Pick Up

El presente caso de estudio se enfocará en el segmento de Autos de lujo, dentro de los cuales se encuentran aquellos que ocupan motores V-8, con capacidad volumétrica de 4.2 Litros.

³⁹ Master Black Belt: es un nombre registrado por Motorola Inc. en U. S. A.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CONSUMO DE GASOLINA EN UN AUTOMÓVIL.⁴⁰

El lector debe estar familiarizado con las películas de los años sesenta y setenta, donde el actor corría en un automóvil con enormes alerones posteriores que daban la idea de la belleza en los autos. Pues no!, a sólo veinte años ya no encajan en nuestra idea de superhéroes, ni sus mastodontes automotrices.

Ahora, el diseño de los autos obedece a las necesidades de la tecnología. La tecnología ha creado materiales que mejoran el automóvil: plásticos, aleaciones ligeras, motores y gasolinas más eficientes, etc. Pero es el sentido común es el que impone las nuevas reglas de diseño que nos lleva a considerar el medio ambiente. Por lo cual la carrocería se ha vuelto "redondeada" o en términos técnicos, que se haya vuelto más aerodinámica para oponer menor resistencia al aire, ahorrar combustible y contaminar menos. Note en la figura 1 la evolución de la carrocería desde los veintes a la fecha. La crisis petrolera de 1980 elevó el precio del crudo y marcó el inicio de iniciativas enfocadas a hacer más eficiente la gasolina y a generar la busca de fuentes de energía alterna. El medio ambiente y la atmósfera imponen ahora las reglas del juego en el diseño de coches. Los caprichos artísticos y las tecnologías *per se* son menos importantes que la relación automotor-medio ambiente. La tecnología automotriz progresa vigilada por una creciente conciencia ecológica en forma de leyes y reglamentaciones cada vez más estrictas.

⁴⁰ Optimización de la línea del vehículo para mejorar las condiciones de rendimiento
<http://motor.terra.es/motor/articulo/html/mot25961.htm> 23 Abril 2007, 18:45 hrs.

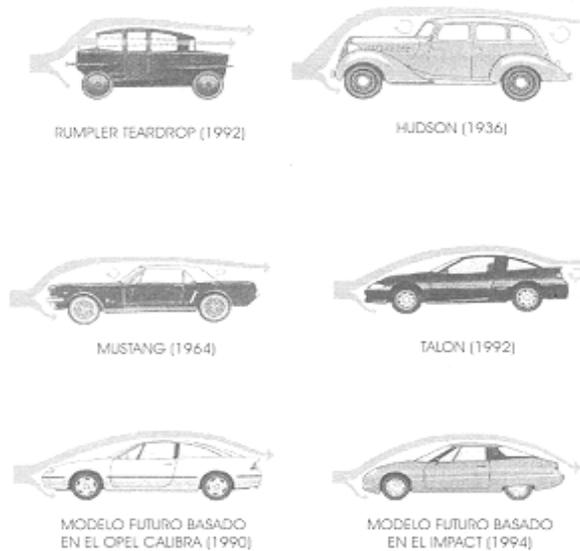


Figura 7.1 Conversión de la carrocería de los autos a través del tiempo

En la actualidad son comunes los prototipos de autos con tecnologías diferentes al tipo de hidrocarburos anteriores: la carrocería va forrada por costosas celdas solares, lo impulsan pesadas baterías o celdas de combustible o una combinación de algunas o todas. Seamos realistas, aunque no está lejos el día en que las energías alternativas reemplacen el motor de combustión interna, los motores a gasolina y diesel dominarán los caminos por varios decenios. El precio del petróleo es menor que otro tipo de energía y existe una enorme infraestructura económica: refinerías, gasolineras, industria automovilística, etc., miles de empleos dependen de ella directa o indirectamente y es imprudente un cambio drástico.

El cambio que experimentará el automóvil en el futuro cercano, indica que lo más viable es incrementar su eficiencia, que rinda más con menos gasolina. Como el automóvil está constituido por cientos de partes, cada una con su función definida, primero localicemos las deficiencias energéticas que aporta cada una. Por ejemplo, el consumo de combustible es mayor en lugares donde el tránsito es pesado. El

término "carga de uso final" define cualquier aspecto de la operación del vehículo que consuma la energía provista por el motor; pueden ser pérdidas en forma de energía calorífica en el frenado, la fricción de las llantas, la fricción y la resistencia aerodinámicas y accesorios como el aire acondicionado. Tomando en cuenta la termodinámica de la combustión y la fricción, sólo un sexto de la energía de la gasolina se emplea en las "cargas de uso final", los sistemas de transmisión actuales son eficientes en sólo 17 por ciento.

En la figura 7.2 se ilustra el incremento en el consumo de energía, en términos de litros de gasolina, en los más importantes componentes del auto: la energía usada en neumáticos, resistencia aerodinámica, frenado y accesorios. Los requerimientos energéticos se multiplican por 1.11 para sobreponerse a la fricción de la transmisión, y después por un factor igual a 2.2 para vencer la fricción del motor. Finalmente, las pérdidas durante la combustión (recuérdese que la energía de la combustión se pierde en forma de calor) incrementan la demanda energética 2.5 veces más. Así, el uso de nuevos materiales, diseños y tecnologías que minimicen las pérdidas en las etapas iniciales incrementará la eficiencia total.

Irónicamente, una de las mayores cargas que soporta el vehículo es su propio peso. Un vehículo liviano requiere menos energía y puede emplear un sistema de transmisión pequeño. Aunque este análisis lleva a reducir el tamaño del coche, nos referimos más bien al empleo de materiales más resistentes y ligeros, sin sacrificar tamaño ni capacidad de carga.

Los diseños más redondeados de la carrocería han reducido la resistencia aerodinámica en 25%, como se ve en la figura 1.

Un refinamiento de más trascendencia en el motor es la inyección de combustible efectuada en los cilindros del motor. La manipulación cuidadosa del flujo de la mezcla comburente y los gases de la combustión a través de los cilindros puede aumentar considerablemente la eficiencia mecánica. En los motores comunes, el cuándo y hasta dónde se abren las válvulas depende de la posición del pistón, pero no de la velocidad del motor o de la carga. Las nuevas capacidades de medición y controles electrónicos y métodos de manufactura muy precisos hacen posible el control variable de las válvulas. Esta técnica mejora considerablemente los flujos de entrada y salida en el cilindro en una gama amplia de condiciones. La mayor apertura de las válvulas incrementa la potencia, permitiendo la reducción en el desplazamiento de los pistones. Antes, su alto costo limitaba la instalación de mecanismos de control variable de válvulas. Ahora el diseño avanzado y las técnicas de ensamble permiten su amplia aplicación. Desde finales de los años ochenta, los fabricantes japoneses han aumentado la incorporación del control variable de válvulas en Japón y en EUA.

Sea pesado o ligero el vehículo, las ineficiencias del sistema de transmisión causan daño en la economía del combustible. Para mejorar el sistema de transmisión hay que reducir la fricción del motor, que consume 50% del combustible. Dentro del motor, el movimiento ascendente y descendente de los pistones a través de los cilindros provoca fricción. El volumen combinado de los pistones se llama desplazamiento del motor. Un motor grande proporcionará mayor potencia, pero pagará el precio de mayor fricción. La fricción por rozamiento se da en las auto partes: válvulas, pistones y árbol de levas, entre otros. Hay pérdidas por fricción en el abanico del radiador y la bomba de agua. También hay fricción de bombeo cuando la

mezcla de aire y combustible se introduce en los cilindros y es expelida como gases de combustión. Sitio particular de fricción de bombeo es la válvula de admisión que controla la entrada de aire al motor. Sólo los refinamientos en diseño, manufactura, materiales y lubricación, minimizarán la fricción⁴¹.

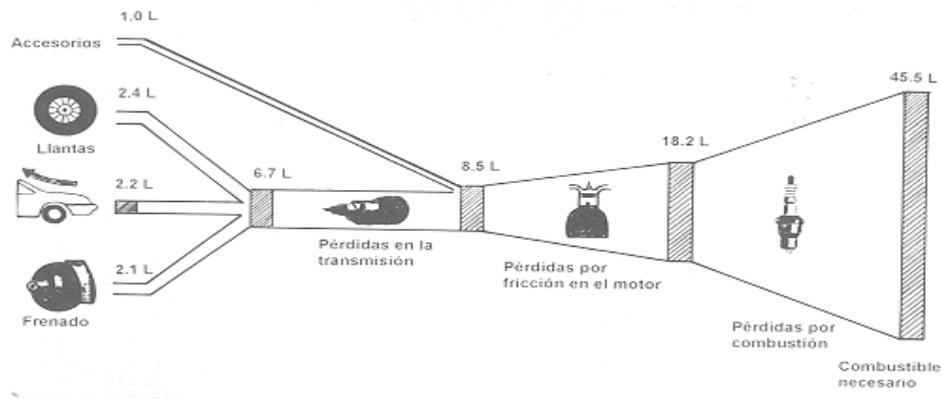


Figura 7.2 Requerimientos energéticos de los componentes de un auto

Otro refinamiento de la tecnología del motor es la sustitución del motor de cuatro tiempos por el de dos tiempos.

La compañía japonesa Kyocera ha dirigido sus esfuerzos a crear un prototipo de motor fabricado de material cerámico de alta tecnología, que sustituiría al hecho de hierro forjado. Sería más ligero y con menos pérdida calorífica. El aumento en temperatura de la combustión hará el proceso más eficiente, pero generará más óxidos de nitrógeno. Se requerirá de un convertidor catalítico más eficiente.

Datos históricos sobre el tema

Las primeras gasolinas se elaboraron a fines del siglo XIX, como resultado de la destilación atmosférica del petróleo crudo. Su rango de

⁴¹ Octanaje y su relación con el rendimiento de combustible
<http://www.automotriz.net/cgi-bin/antiframe.pl?ref=http://www.automotriz.net/tecnic/octanaje-gasolina.html> 23 Abril 2007. 18:40 hrs.

destilación (temperaturas a las cuales se evapora), era de 50-200°C, con una calidad octánica suficiente para impulsar a los motores de la época, de un sólo cilindro y sistemas rudimentarios de encendido y carburación. El incipiente desarrollo, tanto de los motores como de las gasolinas, condicionaba el escaso rendimiento energético. El resultado: alto consumo de gasolina para obtener sólo una baja potencia específica. En la segunda década del siglo XX, e impulsados por las necesidades de movilización de tropas y pertrechos en la Primera Guerra Mundial, se requirió un cambio cualitativo al ser muy apreciada la relación potencia / peso de los motores de combustión interna. Sin embargo, las gasolinas sólo podían mejorar su calidad octánica si se partía de petróleos crudos con mayor proporción de aromáticos. Casi al mismo tiempo, en 1920, se definió la forma en que detonan los distintos tipos de combustibles (hidrocarburos aromáticos, parafínicos, isoparafínicos, nafténicos y olefínicos). Un método que permitió estudiar varios aditivos antidetonantes, destacándose el tetraetilo de plomo. Su inclusión en las gasolinas de aquella época permitió aumentar considerablemente la calidad octánica.

Mayor Potencia Disponible⁴²

Las gasolinas con plomo comenzaron a distribuirse en EE.UU. y Gran Bretaña entre 1925 y 1928. A principios de 1930, la incorporación de las primeras plantas de craqueo térmico impulsó la calidad de las gasolinas, aumentando la cantidad de gasolina a disposición del parque automotor, que por entonces crecía vertiginosamente, no sólo en Estados Unidos y Europa, sino también en el resto del mundo. Por aquel año, las gasolinas poseían un número octano de 70, siendo utilizadas en motores con relación de compresión de hasta 5,5:1. La

⁴² Motor, Gasolina y plomo http://www.gratiszona.com/motor/tipos_gasolina.htm 23 Abril 2007 19:15 hrs.

Segunda Guerra Mundial volvió a impulsar el avance tecnológico de las gasolinas, ya que los motores de aviación requerían un número de octano no inferior a 100. Esto provocó un mayor desarrollo de las técnicas de refinación del petróleo, que posibilitara obtener grandes volúmenes de gasolinas de alto octanaje. Así se crearon las plantas de proceso de craqueo catalítico, reformado, alquilación y desulfuración, siempre con el agregado de fluido etílico, permitiendo que hacia 1960, la relación de compresión habitual en los vehículos de pasajeros oscilara entre 7 y 7,5:1, llegando una década después a valores entre 8 y 8,5:1.

Uso racional de los recursos⁴³

En 1973, la guerra árabe-israelí y la nacionalización de las reservas petroleras árabes, sumadas a la revolución iraní de 1979, evidenciaron la cantidad limitada de petróleo crudo disponible. Ello determinó una tendencia, no sólo en el diseño de motores y vehículos, sino también como un importante cambio en la filosofía: "Los recursos naturales deben utilizarse racionalmente y sin derroche".

Protección ambiental

Además de los factores técnicos, políticos y económicos, otro comenzó a influir en la producción y consumo de gasolinas: la consideración hacia el medio ambiente.

En 1960 se detectó una baja en la calidad del aire en la ciudad de Los Ángeles (California, EE.UU.), ocasionada por emisiones de los motores de los autos, además de una combinación de factores climáticos y geográficos. Por ese motivo, y en coincidencia con circunstancias

⁴³ Mazarr, Michael. ¿Qué será de MÉXICO en el 2005, p42, México. Publicaciones Cruz O., S.A. 2000

similares monitoreadas en otras grandes concentraciones urbanas, se inició la legislación tendiente a preservar el medio ambiente.

La necesidad de disminuir las emisiones provocó: 1) modificaciones en motores, reduciendo su rendimiento, 2) introducción de convertidores catalíticos, para el tratamiento de los gases de escape, 3) eliminación del plomo como aditivo antidetonante, 4) investigación de otros aditivos que pudiesen mejorar la calidad octánica de las gasolinas.

Mejor refinación

Estas circunstancias provocaron cambios en el diseño y elaboración de las gasolinas. Dado que los compuestos de plomo son altamente perjudiciales para los convertidores catalíticos y además cuestionados por razones de preservación ambiental, la industria refinadora continuó mejorando sus procesos e investigaciones para obtener nuevos combustibles amigables con el medio ambiente y al mismo tiempo, alcanzar la cantidad de octanos que satisficieran a los nuevos motores, de menor tamaño y mayor rendimiento.

Desde 1995, ninguna gasolina en EE.UU. posee plomo, mientras que en la Argentina, ello sucede desde 1998.

Las exigencias de los nuevos diseños de motores y las prestaciones exigidas a las gasolinas, llevaron a la formulación de lo que se conoce como "gasolinas reformuladas". Su definición general es: Eliminación del agregado de plomo.

- Limitación de hidrocarburos olefínicos.
- Limitación de azufre.
- Disminución de tensión de vapor REID.
- Aumento de la calidad octánica.

- Agregado de derivados oxigenados.
- Empleo de aditivos multifuncionales.

Las gasolinas más modernas, como las de la Línea YPF, elaboradas de acuerdo a estos principios, ofrecen como beneficios:

- Permiten el uso de convertidores catalíticos.
- Permiten la inyección de gasolina. (uso de sonda Lambda).
- Disminuyen costos de mantenimiento.
- Disminuyen consumo de gasolina.

Motores de Combustión Interna y Octanajes de Gasolina

¿Qué son los motores de combustión interna? Son los que usan los automóviles. Se llaman también motores de explosión.

¿Cómo trabajan los motores de combustión interna?

Estos motores trabajan a 4 tiempos siendo: la admisión, la compresión, la explosión y el escape. En la figura 7.3 se ilustra.

El primer tiempo o admisión, el cigüeñal arrastra hacia abajo el émbolo, aspirando en el cilindro la mezcla carburante que está formada por gasolina y aire procedente del carburador.

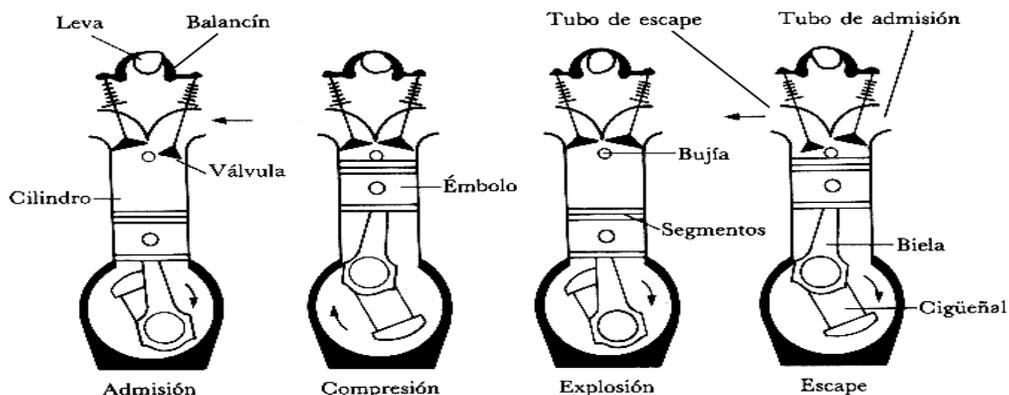


Figura 7.3 Los cuatro tiempos del motor de combustión interna

El segundo tiempo es la compresión. El cigüeñal sube el pistón, el cual comprime la mezcla carburante en la cámara de combustión.

El tercer tiempo, es la explosión cuando la chispa que salta entre los electrodos de la bujía inflama la mezcla, produciéndose una violenta dilatación de los gases de combustión que se expanden y empujan el émbolo, el cual produce trabajo mecánico al mover el cigüeñal, que a su vez mueve las llantas del coche y lo hace avanzar.

Por último, en el cuarto tiempo, los gases de combustión se escapan cuando el émbolo vuelve a subir y los expulsa hacia el exterior, saliendo por el escape del automóvil.

Naturalmente que la apertura de las válvulas de admisión y de escape, se obtienen mediante mecanismos sincronizados en el cigüeñal.

¿Qué significa el octanaje⁴⁴ en una gasolina?

A mediados del siglo pasado se descubrió que uno de los compuestos que forman la gasolina, -Heptano normal- (cadena lineal de siete átomos de carbono) es el que provocaba la peor detonación. Por lo que se le asignó un valor de cero en la escala de detonación.

El compuesto que detonaba menos era de ocho átomos de carbono, formando una cadena ramificada llamada isooctano. Se le dio un valor de 100, y así, nacieron los índices de octano de las gasolinas.

Existen aparatos especiales para medir las detonaciones. El resultado se compara con mezclas de heptano e isooctano hasta encontrar aquella que produzca un efecto semejante.

⁴⁴ Octanaje y su relación con rendimiento

<http://www.automotriz.net/cgi-bin/antiframe.pl?ref=http://www.automotriz.net/tecnica/octanaje-gasolina.html> 28 Abril 2007 19:45 hrs.

Así, por ejemplo, si cierta gasolina tiene características detonantes parecidas a las de una mezcla en 90% de isooctano y 10% de heptano normal, entonces se le asigna un índice de octano de 90.

Pero ¿por qué se dijo en el capítulo anterior que la gasolina natural proveniente de la destilación primaria no llenaba las especificaciones de octanaje requeridas por los automóviles? ¿Cómo se consigue aumentar el índice de octano en la gasolina? Si la fracción que contiene de cinco a nueve átomos de carbono en el petróleo crudo es insuficiente para satisfacer las demandas de gasolina, ¿qué procesos se usan para hacer más gasolina a partir de las otras fracciones?

Las características generales de una gasolina⁴⁵

Algunas características que se exigen a una gasolina a fin de satisfacer las necesidades de los usuarios de automóviles en el mundo son:

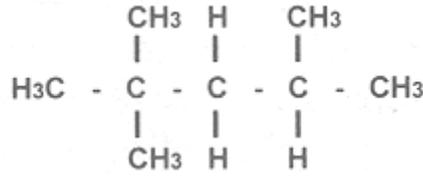
El índice de anticascabeleo. Antes de 1929, los carburantes se clasificaban en una máquina monocilíndrica, en la que el cociente de compresión podía variarse entre 2.7:1 hasta 8:1. Cada carburante se experimentaba empleando diferentes relaciones aire/combustible y tiempos de ignición variados, buscándose determinar el máximo de potencia y la relación de compresión más elevada. El valor obtenido se llamaba algo así como "cociente de compresión útil" que se refería al valor obtenido con el tolueno.

La gasolina se clasifica en primera instancia de acuerdo con el índice de anticascabeleo, que es una medida del octano. El cascabeleo (golpeteo) se origina por la dirección opuesta de dos frentes de llama: el debido a la explosión anticipada del combustible por encontrarse a

⁴⁵ Gasolina, <http://tq.educ.ar/tq03028/html/naftas.htm> 28 Abril 2007 21:32 Hrs.

elevada temperatura y el que produce la bujía. Como resultado de la dirección opuesta de ambos frentes se producen las vibraciones.

La medida de habilidad de un combustible para resistir la auto ignición bajo un incremento de presión es el octano. La eficiencia de un automóvil encendido por una chispa se relaciona con la relación de compresión. Cualquier "detonación" causada por el carburante destruirá rápidamente los elementos mecánicos del motor. Desde 1912 los automóviles cuya ignición del combustible se inicia mediante la chispa de una bujía siempre se han visto limitados por los "cascabeleos" indeseables, es este sonido una descripción justa cuando el automóvil emplea gasolina de bajo octano. Thomas Midgley descubrió que las detonaciones se debían al aumento brusco de la presión una vez que se llevaba a cabo la ignición. En 1926 Graham Edgar sugirió que dos hidrocarburos que podían producirse en cantidad suficiente y de alta pureza fueran utilizados para desarrollar una escala, que en aquel tiempo iba de 0 a 100. Los primeros resultados se publicaron en 1929 y la industria sigue usando este método y los mismos patrones para las comparaciones. Dos parafinas de propiedades físicas similares fueron escogidas, una es el heptano normal, es decir el hidrocarburo lineal de siete átomos de carbono con sus correspondientes hidrógenos que, además, provoca muchas detonaciones. El cien de la escala es el llamado isooctano que químicamente hablando tiene el solemne nombre de 2,4,4, trimetil-pentano, es decir, un hidrocarburo de ocho carbonos ramificado y cuya fórmula ilustramos a continuación y que resultaba ser una sustancia de muy baja resistencia al cascabeleo:



ISOCTANO

Figura 7.4 Fórmula del isooctano

En los años treinta se observó que no era posible correlacionar los resultados que se obtenían en el laboratorio con los del automóvil en la carretera o los que resultaban del manejo en la ciudad en donde las condiciones varían mucho. En general el RON, *grosso modo*, correlaciona la habilidad antidetonante del motor conducido a baja velocidad debido a la carga que transporta. Si el RON es muy bajo, se darán cascabeleos y detonaciones al apagar el motor. Mientras que el MON relaciona la capacidad antidetonante del auto cuando está sujeto a las altas velocidades y en condiciones severas de manejo, como al subir por caminos empinados o adelantar a un coche en donde se requiere rápidamente de potencia.

$$\text{Índice anticascabeleo} = 1/2 (\text{RON} + \text{MON})$$

| <i>Algunos factores de diseño/operación</i> | <i>de Factores externos</i> |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Relación decompresión | Presión barométrica/ altitud |
| Tiempo de ignición | Temperatura |
| Relación aire/ carburante | Humedad |
| Temperatura de combustión | Depósitos en la cámara de combustión |
| Diseño de la cámara de combustión | |
| Recirculación de gases de escape | |

Tabla 7.1 Factores de Diseño

2) *Sensibilidad*. El valor resultante de restar el RON del MON se llama *sensibilidad*. Para dos carburantes del mismo RON, una gasolina con mayor sensibilidad tendrá un MON menor. Lo que representa este valor es la capacidad que tiene la gasolina para soportar cambios en la severidad de las condiciones de operación de la máquina en términos de su capacidad antidetonante.

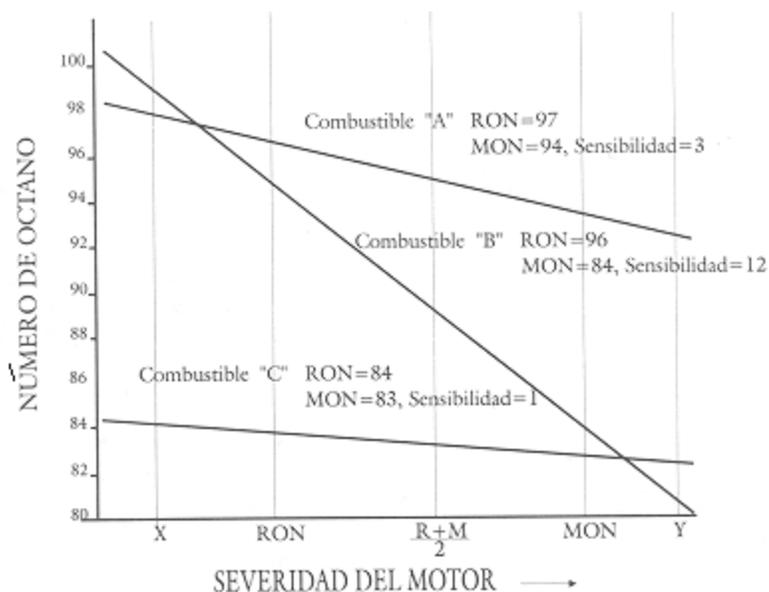


Figura 7.4 Calidad de octano en función de la severidad de la máquina

Con estos valores podemos relacionar los procesos de transformación de hidrocarburos con las sensibilidades obtenidas de ellos, comenzando por la que proviene directamente del crudo, veamos:

| | |
|-----------------------------------|---------------|
| Tipo de corte de gasolina | $RON + MON/2$ |
| gasolina atmosférica | 70 |
| gasolina catalítica | 86.2 |
| producto de reformación de naftas | 89.9 |
| producto de alquilación | 92.5 |

Tabla 7.2 Proceso de transformación de los hidrocarburos

En la refinería se cuenta con diversas corrientes para hacer las mezclas apropiadas y dar las especificaciones de octanaje. Los números de octano de mezclado son reales, ajustados para ganancias adicionales en el mezclado y se pueden ponderar linealmente. Y he aquí un ejemplo en el que utilizamos los datos anteriores. Imagine que se desea hacer gasolina de 87 octanos y llegan 5 millones de barriles por día de gasolina atmosférica, 17 de catalítica, 3 de alquilado y nos preguntan: ¿cuánto le añadimos de gasolina de reformación? Simple:

A) Descripción de la situación actual

La filosofía esencial de un negocio es el logro de la satisfacción de las necesidades y expectativas de nuestro cliente; una disciplina que mide de forma clara y real la efectividad o capacidad de un proceso productivo o de servicios; Seis Sigma es una Metodología que contiene pasos analíticos empleando herramientas estadísticas para mejorar productos y procesos existentes y establece metas organizacionales para realizar todas las actividades diarias de una empresa con el fin de alcanzar niveles de calidad exigidos por el cliente final, el cual es la razón de existir de cualquier negocio sano.

Los niveles de Satisfacción del cliente se logran al reducir la variabilidad en los procesos, dando como resultado la reducción de la variabilidad de los productos y servicios, con esta metodología, lograremos que se reduzcan los costos, los tiempos ciclo, aumentando con esto la competitividad de nuestro negocio e incrementando con esto, la posibilidad de subsistencia en mercados sumamente competidos en la actualidad.

Con base en lo anterior lo que resta es buscar quién será nuestro cliente para saber que es lo que el quiere y cómo nuestros productos pueden satisfacer sus necesidades más preciadas.

Para poder comenzar a tomar datos a cerca de los procesos, se requiere lo siguiente:

- Reconocer como afectan los desempeños de cada uno de nuestros procesos a los resultados globales de la organización.
- Reconocer como afectan los procesos a la rentabilidad.
- Definir cuales son las características críticas del proceso del negocio

7.2 Fase de Definición.- Carta compromiso del proyecto

El siguiente documento, muestra el “contrato” efectuado con la dirección del negocio, a fin de establecer un compromiso, entre el equipo de trabajo y la dirección de la compañía; cabe hacer mención que este documento es el que sustenta la viabilidad del proyecto de mejora.

Project charter⁴⁶

6-Sigma Project Charter Document

Instructions to Project Champion: The Project Champion must complete this document prior to the start of a Black Belt project. All Black Belt projects must be clearly aligned to their organization's KEY business plan objectives (contact your manager/6-Sigma Director or MBB for alignment to your Business Plan Objectives). This document is intended to clearly describe the chart or for a proposed project, and to obtain agreement from key stakeholders. It must be an attachment to the Project Tracking System.

Project Title: Fuel economy in luxury cars optimization

Problem Statement: Fuel economy for luxury cars has been one of the higher customer concerns.

Linkage to Key Business Plan Objective(s): (Identify linkage to your organization/department's key business plan objectives)

COST

Defect Definition/CTQ (measurable): Customer wants to reduce fuel consumption in their luxury cars.

Definition of Project Scope: This project is focused to reduce fuel consumption into one luxury cars line.

Project Key Business Plan Deliverable(s)/Objective(s) (Cost/Quality/Timing):

(How will project be assessed to determine success for your organization/department's key business plan objectives? What are the specific deliverables (project outputs) linked to your organization's key business plan objectives?)

Reduce fuel consumption at speed cruise.

Enabler(s): (What resources/people/funds are available to assist with this project? Describe any interactions with other projects or major initiatives.)

| Performance Metric(s) | Present | Expected |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Fuel economy at speed cruise | 82% Customer Satisfaction | 90% Customer Satisfaction |
| Reduce fuel consumption | Cold & Hot: 0.26 gallons/start | Cold & Hot: 0.13 gallons/start |

Champion/BB Meetings Scheduled: Yes

Proj. Champion (Dept. Manager) Name/Signature/Date: David González _____

Process Owner /Customer Name/Signature/Date: Manuel Rodríguez _____

Black Belt Name/Signature/Date: Jorge A. Morales _____

Master Black Belt Name/Signature/Date: Carlos Dario Pérez _____

Project Expected Start Date: Aug 1st 2008 **Expected Closure Date:** Dec 1st 2008

¿Quién es el Cliente?

Cuando se decide llevar a cabo una investigación, para poder comenzar algún estudio sobre un tópico de interés, se deberá por

⁴⁶ Project Charter: Carta del proyecto por su traducción al español

fuerza seguir un procedimiento serio, ordenado y disciplinado, es por esto que se tendrán que seguir los siguientes pasos:

- a) Se requiere conocer quien es el cliente, la persona o la actividad que será la que se vea beneficiada por la terminación exitosa de este proyecto de mejora.

Para el presente trabajo el cliente será aquella persona que lleve a cabo el proceso de compra de un vehículo, también pudiera ser aquella organización que hace la compra de una flotilla vehicular y está interesada en obtener el mejor rendimiento de su inversión automotriz.

- b) Lo que sigue después es el conocer que es lo que busca el cliente es decir su "voz". Para este caso el cliente lo que busca es:

"Lograr el mayor rendimiento de combustible por milla recorrida"

- c) Lo que se requiere hacer una vez cumplido el paso anterior, es el determinar cual será la fuente de información de la cual extraerá sus datos, así como su confiabilidad, la cual garantizará la validez de dicha información, con la cual se tomarán las decisiones para el logro de los resultados esperados por el cliente. La fuente de información será: Las Pruebas de Durabilidad realizadas por una Armadora Automotriz.

Teniendo como base lo anterior se procederá a revisar toda la información recolectada para determinar su grado de confiabilidad.

Finalmente el cumplimiento de las expectativas del cliente y su máxima satisfacción: será el siguiente paso a seguir.

7.3 Fase de Medición.- ¿Quién es el cliente? y ¿Cuál es su Voz?

Aquí se usó una metodología disciplinada; la cual conta de las fases DMAIC⁴⁷, proveniente de la Metodología Seis Sigma

Para nuestro caso existen dos tipos de cliente: uno es el interno el cual será **La Armadora automotriz** en cuanto a el nivel de participación en el mercado y el cliente externo que el cual será el **cliente final** que adquiere los vehículos y paga por su mantenimiento y funcionamiento.

Durante el presente trabajo de investigación se pretende llevar a la práctica los pasos que se pudieron aplicar de la Metodología Seis Sigma, ya que como se indicó en su oportunidad este caso no es estrictamente un proyecto Seis Sigma, porque no está alineado a un proceso estratégico del negocio en cuestión.

Se revisará, la gráfica de caja, la normalidad de los datos, el análisis del sistema de medición, la estadística básica, las etapas de un Diseño de Experimentos, así como la aplicación de la Optimización del Proceso al resultado final obtenido. El objetivo principal de este trabajo experimental consiste en proponer todos los posibles factores que están implícitos en el consumo de combustible que tiene un automóvil, para por último emitir los documentos que permitan controlar la mejora.

La industria automotriz ha continuado experimentando una creciente demanda por parte del público consumidor de automóviles, así como por las agencias gubernamentales de vehículos automotores, el incremento en el rendimiento en el uso de combustible basado en

⁴⁷ D = Definir, M = Medir, A = Analizar, I = Improve (Mejorar traducido del inglés) y C = Controlar

hidrocarburos (gasolina) sea cada vez de mayor valor, es decir que se reduzca el uso de este insumo. Sin embargo, como sabemos en general, un proceso productivo tiene un sin fin de fases y por ende un mucho mayor número de variables y factores que influyen en el resultado final, por lo cual el alcance del proyecto considera la evaluación únicamente base a los datos obtenidos para un auto producido por la Armadora automotriz.

Evaluación de beneficios.

Los Beneficios del presente proyecto estarán basados en el sustento teórico de que en general una gasolina debe permitir:

- Arranque rápido en frío y en caliente. **Menor uso de gasolina**
- Calentamiento rápido del motor. **Menor uso de gasolina**
- Desarrollar máxima potencia y pique del motor con la máxima economía a todos los regímenes de marcha.
- Ausencia de pistoneo o detonación.
- Mantener limpios inyectores, carburador, cámara de combustión, bujías y cabeza del pistón.

- Variable Respuesta.

La variable Respuesta para el presente proyecto será el consumo de combustible (galón), por la distancia recorrida (millas). Para lo anterior se procederá a encontrar las CTQ's⁴⁸, de este trabajo:

Buscando establecer la mayor cantidad posible de factores que pueden afectar a la variable respuesta; el equipo recurrió al uso de la técnica de lluvia de ideas, agrupando los factores encontrados en los siguientes cinco rubros:

⁴⁸ CTQ: Critical to Quality (Crítico para la Calidad) por su traducción al idioma español

1.- Altitud

- * Manejar en ciudades al nivel del mar
- * Manejar en ciudades sobre el nivel del mar

2.- Manejo del automóvil

- * Calentar el motor del automóvil por más de un minuto (funcionando en vacío).
- * Acelerar rápidamente estando la marcha en alto
- * Velocidad de desplazamiento
- * Tránsito denso
- * Tipo de conductor agresivo o defensivo
- * Usar aire acondicionado

3.- Mantenimiento del automóvil

- * Filtro de aire sucio
- * Mantenimiento deficiente: frenos, aceite de motor, lubricación, afinación, encendido, inyectores, bujías, etc.
- * Presión de las llantas

4.- Características del Combustible

- * Tipo de Gasolina usada en base a su Octanaje (Magna o Premium).

5.- Aerodinámica

- * Carga extra sobre el automóvil

- Eliminación de factores de menor importancia.

Para eliminar los factores de menor importancia, también denominados triviales, se usó la teoría y la experiencia. Los factores que se eliminan y que se consideran de menor importancia son aquellos que provocan una pérdida de combustible menor o igual al 15% o que son provocados por el conductor y que en un diseño de experimentos no es posible controlarlos.

- Altitud (metros sobre el nivel del mar).

Uno de los factores que afecta directamente el rendimiento de combustible en un automóvil es la altura sobre el nivel del mar, puesto que a mayor altura menor cantidad de oxígeno. Esta disminución de oxígeno afecta la combustión, fenómeno que hace funcionar los motores, ocasionando una pérdida de potencia, torque y un menor rendimiento de combustible (milla / galón).

Este factor es muy importante, sin embargo se elimina debido a la dificultad de realizar pruebas a diferentes altitudes y a que el estudio se hará a 2300 m sobre el mar, lo que a la postre beneficiará al cliente final, ya que el rendimiento esperado a nivel del mar será mayor.

- Calentar el motor del automóvil por más de un minuto (funcionando en vacío).

Se elimina este factor debido a que de acuerdo con la teoría un automóvil consume 100 ml. por cada 10 minutos funcionando en vacío, la cual es una cantidad muy pequeña de combustible, además de que este factor depende de cada conductor.

- Acelerar rápidamente desde un alto.

Aunque se consume hasta un 50% más de combustible en comparación con una aceleración gradual, es poco común que se acelere de esta manera, a menos que se trate de gente que le guste la emoción.

- Transito denso: va relacionada con la velocidad y paradas continuas.

El transito denso aumenta hasta en un 15% el consumo de combustible, pero este no se tomará en cuenta debido a las condiciones reglamentarias para llevar a cabo la prueba, siendo esta en un laboratorio o en una pista sin tráfico.

- Usar aire acondicionado.

Se consume 10% más de combustible, sin embargo, en ciudades donde el calor no es tan fuerte o existe humedad ambiental no se acostumbra el uso de automóviles con aire acondicionado por economía.

- Filtro de aire sucio

Es importante mantener limpios los filtros ya que si están sucios la mezcla de nafta y el aire aumenta y queda mayor cantidad de nafta sin quemar. La combustión no es correcta y puede aumentar hasta en un 10% el consumo de gasolina, para nuestro caso este factor queda eliminado debido a que el estudio se lleva a cabo en un vehiculo nuevo con filtros nuevos.

- Mantenimiento.

Un mantenimiento deficiente aumentará hasta en un 30% el consumo de combustible, sin embargo, las pruebas serán realizadas en un automóvil nuevo, por lo que este factor no será tomado en cuenta.

- Carga extra del auto

Por cada 50 kg de peso extra en el vehículo se incrementa en un 2% el consumo de combustible. Este factor tiene poca importancia ya que es muy raro que uno sobrecargue un auto y por las especificaciones

propias de la prueba en las que se indica que el vehiculo solo llevará a un pasajero, en este caso el piloto de pruebas.

Elección de factores de mayor importancia (CTQ's).

Basados en el análisis anterior, se concluyó que los principales factores son:

- **Presión de aire en las llantas.**
- **Octanaje del combustible.**
- **Velocidad promedio de desplazamiento.**

Recolección de datos para el estudio de investigación.

Los datos usados fueron los siguiente:

| Auditor | Muestra | Dato | Dato | Auditor | Muestra | Dato | Dato |
|-------------|---------|-------|-------|-------------|---------|-------|-------|
| Juan Torres | 1 | 9.99 | 10.00 | Isidro Glez | 1 | 10.00 | 9.99 |
| Juan Torres | 2 | 15.00 | 15.00 | Isidro Glez | 2 | 15.02 | 15.02 |
| Juan Torres | 3 | 20.03 | 20.04 | Isidro Glez | 3 | 20.04 | 20.05 |
| Juan Torres | 4 | 25.05 | 25.07 | Isidro Glez | 4 | 25.07 | 25.07 |
| Juan Torres | 5 | 30.07 | 30.08 | Isidro Glez | 5 | 30.07 | 30.08 |
| Juan Torres | 6 | 35.08 | 35.10 | Isidro Glez | 6 | 35.09 | 35.09 |
| Juan Torres | 7 | 40.09 | 40.10 | Isidro Glez | 7 | 40.08 | 40.08 |
| Juan Torres | 8 | 45.07 | 45.09 | Isidro Glez | 8 | 45.07 | 45.08 |
| Juan Torres | 9 | 50.06 | 50.06 | Isidro Glez | 9 | 50.06 | 50.06 |

Box plot⁴⁹.

Haciendo uso del programa Minitab, obtenemos en la siguiente la gráfica de caja para la cual sirve para revisar si no se tienen observaciones inusuales. Ver la figura 7.5

⁴⁹ Box plot: Gráfica de caja por su traducción al español

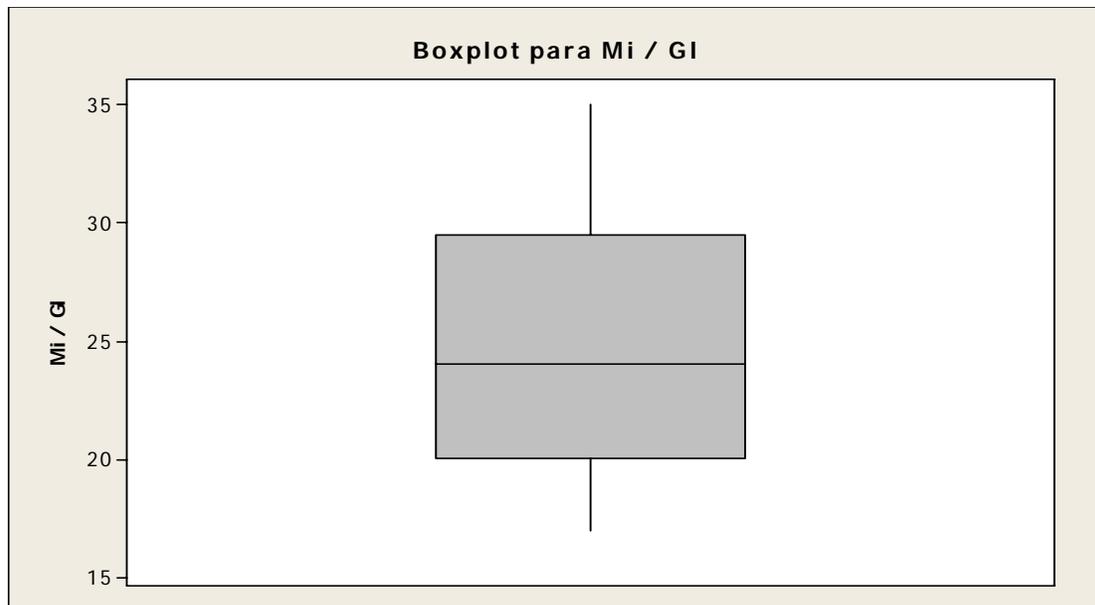


Figura 7.5 Diagrama de caja se observa que no se tienen lecturas provenientes de causas especiales, toda la variación se origina por causas comunes.

Prueba de Normalidad

El siguiente paso es el de revisar el tipo de distribución que siguen los datos obtenidos, esto es relevante debido a que se hace necesario el llevar a cabo una serie de inferencias estadísticas a cerca del comportamiento que tendrán los datos en el futuro, así como la predicción de comportamientos futuros de los procesos en estudio.

Por lo anterior se hace necesario el desarrollar un procedimiento de prueba de Normalidad por medio del software llamado Minitab⁵⁰, con la prueba Anderson Darling⁵¹

⁵⁰ Minitab: Software estadístico marca registrada

⁵¹ Método de análisis de normalidad para más de 15 datos

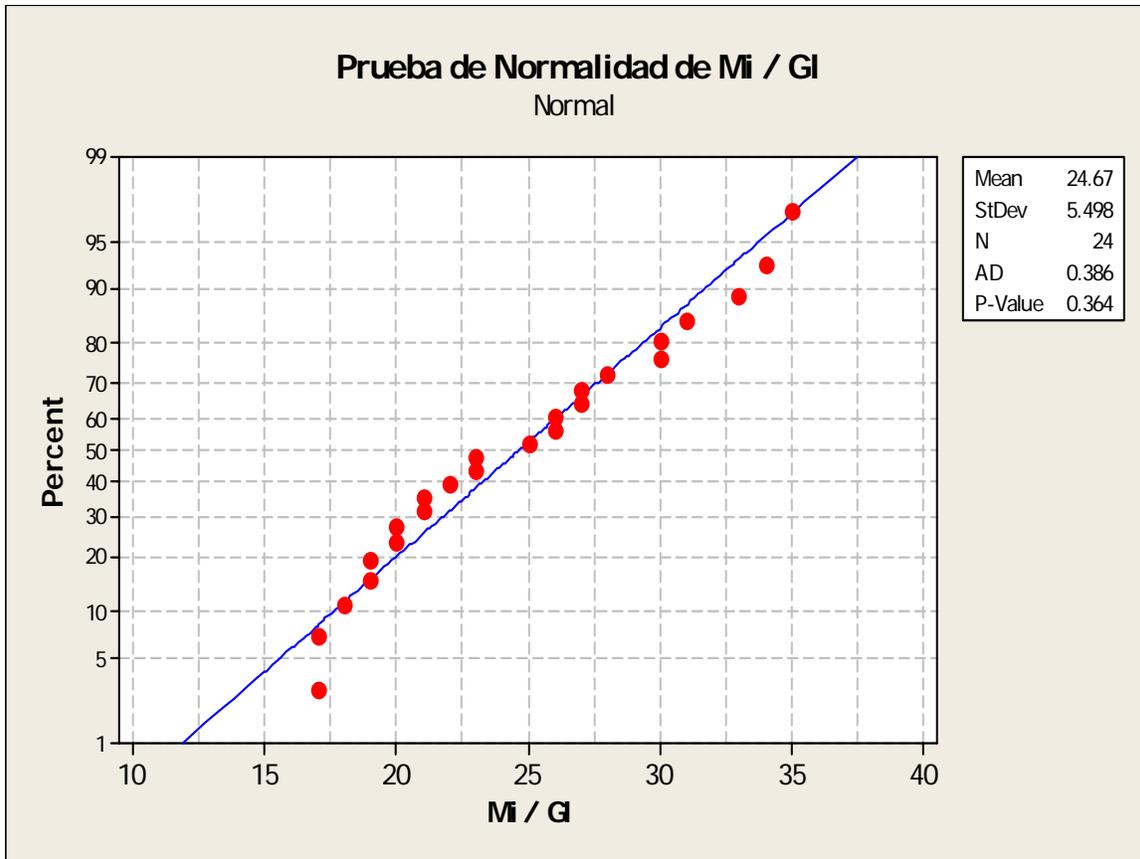


Figura 7.6 El $p_{\text{-value}}$ es > 0.10 , por tanto podemos seguir adelante con nuestro estudio ya que la distribución de datos sigue una distribución de tipo Normal.

Descriptive Statistics⁵²

Con esta herramienta se revisarán los parámetros estadísticos muestrales de nuestra Variable de Respuesta que para nuestro estudio es la distancia en millas recorridas por galón de combustible.

La figura 7.7 se muestra a continuación.

⁵² Descriptive Statistics: Estadística Descriptiva por su traducción al español

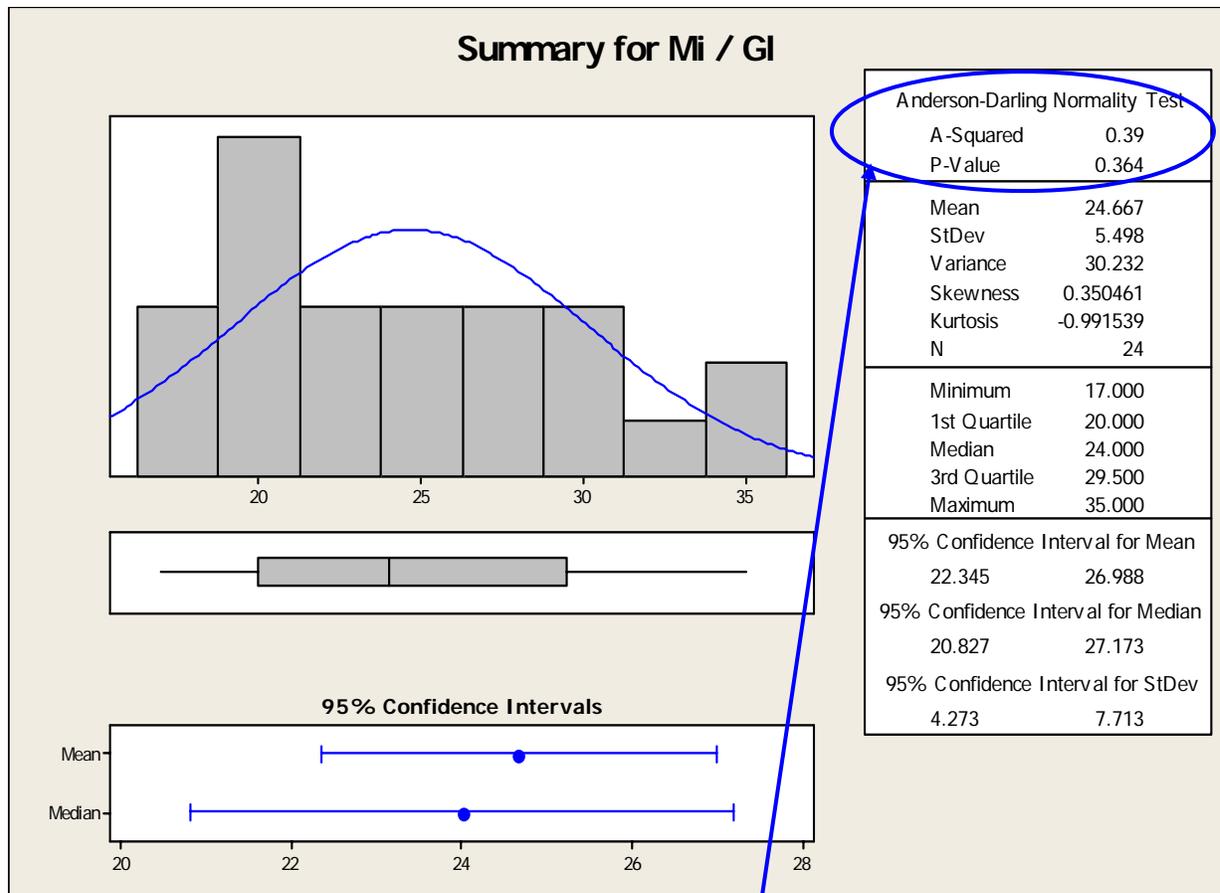


Figura 7.7. se ratifica que el $p\text{-value}$ es > 0.10 , por tanto podemos asumir que nuestros datos siguen una distribución de tipo Normal, con una media de 24.667, y una varianza de 30.232

Análisis del Sistema de Medición ASM.

El Sistema de Medición que se probará en primera instancia será el de la presión de aire en las ruedas, este sistema consta de un manómetro digital que medirá la presión de aire, las unidades de medición serán psi, y la precisión será de 0.01 psi⁵³, dos operarios tomando nueve lecturas con dos repeticiones. Los resultados del estudio se muestran a continuación:

⁵³ PSI: pound square inche: Libra por pulgada cuadrada, por su traducción al español

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage name: Air tire pressure gage
 Date of study: Sep 27, 2006
 Reported by: Esbeidy Barajas J. A. Morales J. C. Ramirez
 Tolerance: 6 psi

Two-Way ANOVA Table With Interaction

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|-------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Sample a) | 8 | 9037.06 | 1129.63 | 9878567 | 0.00000 |
| Auditor | 1 | 0.00 | 0.00 | | 0.33845 |
| Auditor*Sample a) | 8 | 0.00 | 0.00 | | 0.03629 |
| Repeatability | 36 | 0.00 | 0.00 | | |
| Total | 53 | 9037.06 | | | |

Gage R&R

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-------------------|---------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0.00 | 0.00 |
| Repeatability | 0.00 | 0.00 |
| Reproducibility | 0.00 | 0.00 |
| Auditor | 0.00 | 0.00 |
| Auditor*Sample a) | 0.00 | 0.00 |
| Part-To-Part | 188.27 | 100.00 |
| Total Variation | 188.27 | 100.00 |

| Source | StdDev (SD) | Study Var (5.15*SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-------------------|----------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0084 | 0.0432 | 0.06 | 0.72 |
| Repeatability | 0.0069 | 0.0357 | 0.05 | 0.60 |
| Reproducibility | 0.0047 | 0.0243 | 0.03 | 0.40 |
| Auditor | 0.0004 | 0.0020 | 0.00 | 0.03 |
| Auditor*Sample a) | 0.0047 | 0.0242 | 0.03 | 0.40 |
| Part-To-Part | 13.7212 | 70.6643 | 100.00 | 1177.74 |
| Total Variation | 13.7212 | 70.6643 | 100.00 | 1177.74 |

Number of Distinct Categories = 2306

Tabla 7.3 Gage R & R presión de aire

Con base en el % de tolerancia usado por la variación podemos concluir, que el estudio es altamente satisfactorio:

% Tolerance (SV / Toler) = 0.72

Del estudio Gage R & R⁵⁴, para el calibrador de presión de aire en la rueda, se obtuvieron los siguientes gráficos:

⁵⁴ Gage R & R: Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad del instrumento de medición, por su traducción al español

Gage R & R for Air Tire pressure gag

Gage name: Air tire preasure gag
 Date of study: Apr 20, 2005
 Reported by: J. A. Morales
 Tolerance: 6 psi
 Misc:

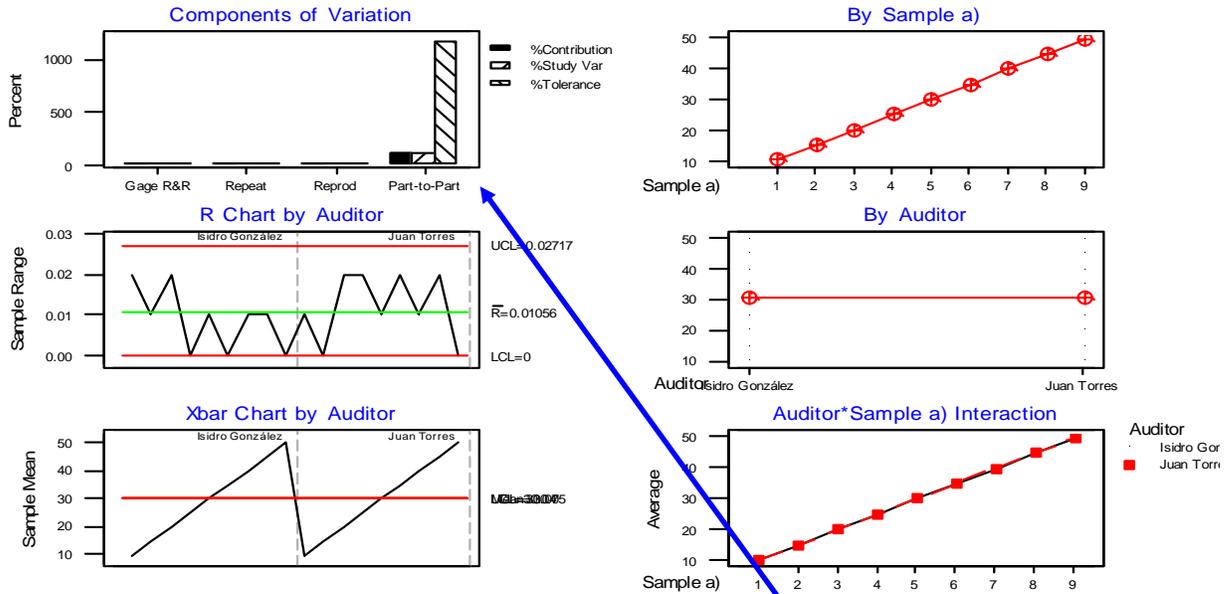


Figura 7.8 Graficas del Gage R & R

Conclusión: El estudio Gage R & R es aceptado

El siguiente Sistema de Medición que se revisará será el de la velocidad de recorrido constituido por un velocímetro digital, las unidades de medición serán millas por hora, y la precisión será de 0.1 mph. Los resultados del estudio se muestran a continuación:

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Data

Gage name: Gage R & R para Clusters
 Date of study: Oct. 4. 2006
 Reported by: E. Barajas, J. Morales, J. Ramirez
 Tolerance: 0.1 mph
 Misc:

Two-Way ANOVA Table With Interaction

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|-------------------|----|---------|---------|---------|-------|
| Cluster | 5 | 802.292 | 160.458 | 66396.6 | 0.000 |
| Auditor | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.2 | 0.695 |
| Cluster * Auditor | 5 | 0.012 | 0.002 | 0.1 | 0.989 |
| Repeatability | 12 | 0.275 | 0.023 | | |
| Total | 23 | 802.580 | | | |

Alpha to remove interaction term = 0.25

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|----|---------|---------|---------|-------|
| Cluster | 5 | 802.292 | 160.458 | 9501.75 | 0.000 |
| Auditor | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.02 | 0.877 |
| Repeatability | 17 | 0.287 | 0.017 | | |
| Total | 23 | 802.580 | | | |

Gage R&R

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|---------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0169 | 0.04 |
| Repeatability | 0.0169 | 0.04 |
| Reproducibility | 0.0000 | 0.00 |
| Auditor | 0.0000 | 0.00 |
| Part-To-Part | 40.1104 | 99.96 |
| Total Variation | 40.1273 | 100.00 |

Process tolerance = 10

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.12995 | 0.7797 | 2.05 | 7.80 |
| Repeatability | 0.12995 | 0.7797 | 2.05 | 7.80 |
| Reproducibility | 0.00000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 |
| Auditor | 0.00000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 |
| Part-To-Part | 6.33328 | 37.9997 | 99.98 | 380.00 |
| Total Variation | 6.33461 | 38.0077 | 100.00 | 380.08 |

Number of Distinct Categories = 68

Tabla 7.4 Gage R & R Cluster⁵⁵

Con base en el % de tolerancia usado por la variación podemos concluir, que el estudio es altamente satisfactorio:

$\% \text{ Tolerance (SV / Toler) = 7.80}$

Del estudio Gage R & R, para el odómetro en el tablero de instrumentos, se obtuvieron los siguientes gráficos:

⁵⁵ Cluster Panes de Instrumentos del tablero de un auto por su traducción al español

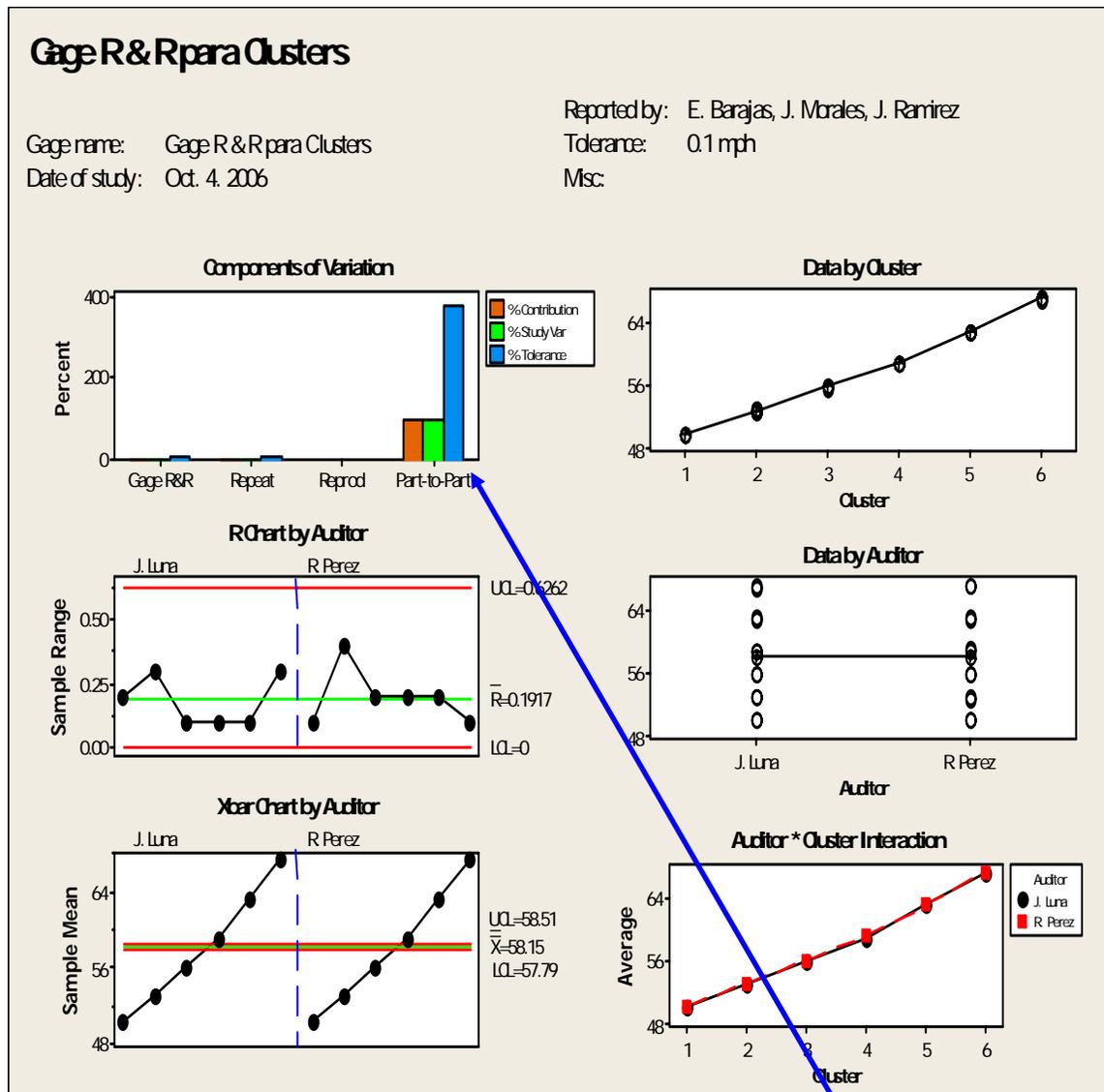


Figura 7.9 Graficas del Gage R & R

Conclusión: El estudio Gage R & R es aceptado

7.4 Fase de Análisis.- Análisis de problemas encontrados.

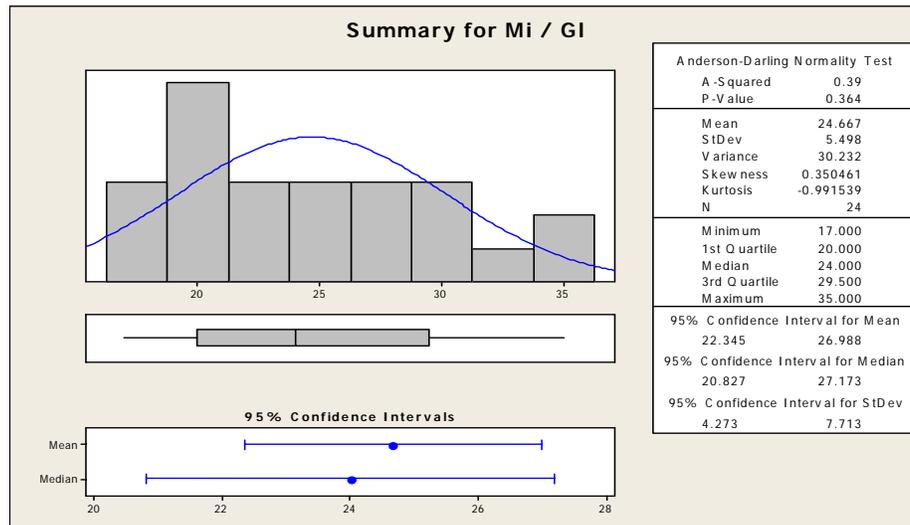


Figura 7.9 Grafica de Resumen estadístico

Objetivo Preliminar

Como primer paso se propone lo siguiente:

| Consumo inicial de combustible al arranque | Objetivo de reducción inicial | Objetivo Preliminar |
|--------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 0.26 gallon/start | 0.195 gallon/start | 25% |

Tabla 7.5 Objetivo preliminar

Se plantea como objetivo preliminar el disminuir el consumo de combustible al arranque, en un 25%, pasando de 0.26 gallon/Start, a 0.195 gallon/Start.

Dado que los datos tienen un comportamiento que sigue una Distribución Normal, podemos hacer ciertas suposiciones (estimaciones) con respecto a su comportamiento en el futuro.

Para este estudio se hizo uso de un laboratorio de pruebas, equipo de medición y pruebas, uso de combustible sin cargo, una pista de pruebas y de un conductor experimentado para eliminar con esto el

factor de ruido que involucra al tipo de conductor que realizaría las diferentes pruebas.

Los conflictos con los que nos encontramos fueron los siguientes:

- La dificultad para poder permitir a personal no perteneciente a la empresa para poder estar en áreas de acceso restringido. Obstáculo que fue insalvable.
- La nula disponibilidad de mas de un vehículo para llevar a cabo las pruebas con los distintos arreglos. Se nos presto un auto modelo 2006 de la flota de vehículos interna de la planta.
- El personal que llevo a cabo los estudios se portó muy accesible y comprometido con las pruebas.
- Saber cuantas vueltas completas deberíamos de llevar a cabo en la pista para tener datos confiables. Se calcularon dos vueltas.
- La accesibilidad de mi supervisor para permitirme el distraer tres días de mi trabajo para llevar a cabo el estudio (estudios de R y R y las pruebas de rendimiento de combustible).
- La existencia de un programa de pruebas que impedía la realización de la nuestra, lo que provoco que en ocasiones tuviéramos que hacer las pruebas en la tarde, con los consabidos trastornos de pago de tiempo extra, lluvias (factor que impidió el llevar la prueba en tres ocasiones) falta de iluminación de la pista y excesivo viento, etc.
- El pago de combustible para llevar a cabo las pruebas, aproximadamente 416 ml. de combustible por prueba.

7.5 Fase de Mejora.- Diseño de Experimentos propuesto.

Elección de factores de mayor importancia y sus niveles.

Los niveles a los que se probarán los tres factores seleccionados en el apartado 7.6, así como sus interacciones serán dos, denominándose como nivel bajo (-) y nivel alto (+), los valores para los niveles de cada factor a estudiar se muestran en la tabla que a continuación se muestra:

| Variables independientes (X's, Factores) | Nivel bajo (-) | Nivel alto (+) |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Presión de las llantas psi | 30 | 35 |
| Octanaje | 87 | 92 |
| Velocidad (MPH) | 55 | 65 |

Tabla 7.5 Niveles de los factores

Los valores de las variables o factores a los cuales con los cuales se llevará a cabo el diseño experimental, se listan a continuación:

Presión de Inflado en libras por pulgada cuadrada (psi) serán:

- ❖ Nivel Bajo 30 psi
- ❖ Nivel alto 35 psi

Octanaje (explosividad) del combustible a ser estudiado serán:

- ❖ Nivel Bajo 87 Octanos
- ❖ Nivel alto 92 octanos

Velocidad de desplazamiento en millas por hora (mph) serán:

- ❖ Nivel Bajo 55 millas por hora
- ❖ Nivel alto 65 millas por hora

Mecanismos para control de los niveles de cada factor.

Los principales mecanismos elegidos para controlar los niveles de los factores durante el experimento fueron:

- a) La presión de aire de ruedas se fijará en 30 y en 35 psi, el ¿porqué? lo explica la especificación del rango de velocidad para el inflado de ruedas.
- b) Para el octanaje se tienen dos tipos: la Magna de 87 octanos, y la Premium con 92 octanos.
- c) Las velocidades de prueba por recomendaciones del fabricante, se fijarán entre las 55 MPH (88.4 KPH) y 65 MPH (104.5 KPH).

Con base a los factores elegidos y sus distintos niveles a los que se probarán, se eligió trabajar con un diseño de experimentos del tipo:

Diseño Experimental Factorial 2^k en Completamente al Azar con tres repeticiones

Identificación del auto a usar.

Se empleará un vehículo, el cual se instrumentarán todos y cada uno de los distintos arreglos del experimento propuesto, hasta terminar los veinticuatro propuestos. En cada experimento o arreglo, en el vehículo se correrán las pruebas con base en los parámetros fijados para cada experimento, se irán midiendo los resultados del consumo de combustible usado en cada prueba y el valor se irá registrando en una tabla.

Orden de las corridas experimentales.

Se están investigando tres factores o variables, a saber, Presión de Inflado de las Ruedas, Octanaje del Combustible y la Velocidad de Desplazamiento del vehículo, para el análisis de la Economía de Combustible como Variable Respuesta para lo cual se harán las

corridas en orden aleatorio que se muestra en la siguiente tabla de eventos:

| | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | Presion | Octanaje | Velocidad |
|----|----------|----------|----------|--------|---------|----------|-----------|
| 1 | 12 | 1 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 |
| 2 | 7 | 2 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 |
| 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 |
| 4 | 8 | 4 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 |
| 5 | 4 | 5 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 |
| 6 | 6 | 6 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 |
| 7 | 18 | 7 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 |
| 8 | 17 | 8 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 |
| 9 | 16 | 9 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 |
| 10 | 3 | 10 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 |
| 11 | 5 | 11 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 |
| 12 | 22 | 12 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 |
| 13 | 10 | 13 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 |
| 14 | 15 | 14 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 |
| 15 | 23 | 15 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 |
| 16 | 11 | 16 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 |
| 17 | 21 | 17 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 |
| 18 | 13 | 18 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 |
| 19 | 9 | 19 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 |
| 20 | 2 | 20 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 |
| 21 | 24 | 21 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 |
| 22 | 20 | 22 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 |
| 23 | 14 | 23 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 |
| 24 | 19 | 24 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 |

Esta columna identifica el orden en el cual se harán las corridas experimentales

Esta columna identifica el orden en el cual se generan las corridas experimentales sin aleatorizar.

Tabla 7. 6 Arreglo del experimento en Minitab

Ejecución y Desarrollo del Experimento.

Con base en el anterior arreglo de corridas se procede a llevar a cabo el experimento, encontrando los siguientes datos para la **Economía de Combustible como Variable Respuesta** los datos fueron colocándose una vez terminado cada experimento, los datos encontrados son los siguientes:

| | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | Presion | Octanaje | Velocidad | Mi / GI |
|----|----------|----------|----------|--------|---------|----------|-----------|---------|
| 1 | 12 | 1 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 | 34 |
| 2 | 7 | 2 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 | 19 |
| 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 | 26 |
| 4 | 8 | 4 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 | 22 |
| 5 | 4 | 5 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 | 33 |
| 6 | 6 | 6 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 | 21 |
| 7 | 18 | 7 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 | 28 |
| 8 | 17 | 8 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 | 26 |
| 9 | 16 | 9 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 | 23 |
| 10 | 3 | 10 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 | 30 |
| 11 | 5 | 11 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 | 18 |
| 12 | 22 | 12 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 | 21 |
| 13 | 10 | 13 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 | 27 |
| 14 | 15 | 14 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 | 19 |
| 15 | 23 | 15 | 1 | 1 | 30 | 92 | 65 | 20 |
| 16 | 11 | 16 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 | 31 |
| 17 | 21 | 17 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 | 17 |
| 18 | 13 | 18 | 1 | 1 | 30 | 87 | 65 | 17 |
| 19 | 9 | 19 | 1 | 1 | 30 | 87 | 55 | 25 |
| 20 | 2 | 20 | 1 | 1 | 35 | 87 | 55 | 27 |
| 21 | 24 | 21 | 1 | 1 | 35 | 92 | 65 | 23 |
| 22 | 20 | 22 | 1 | 1 | 35 | 92 | 55 | 35 |
| 23 | 14 | 23 | 1 | 1 | 35 | 87 | 65 | 20 |
| 24 | 19 | 24 | 1 | 1 | 30 | 92 | 55 | 30 |

Columna de resultados

Tabla 7. 7 Arreglo del experimento

Análisis estadísticos de resultados obtenidos.

Con base en las figuras 1 a la 3, podemos concluir que el experimento fue desarrollado de una forma controlada y ordenada (sin causas especiales de variación, sino solo causas comunes), los datos de la

Variable Repuesta siguen una distribución Normal de datos con base en el p_{value} es igual a 0.364 > 0.10 y el análisis de los resultados de la estadística básica nos corrobora que la distribución de datos de nuestra Variable Respuesta sigue una distribución de tipo Normal con la cual tiene una media de 24.667, una desviación estándar de 5.488, una varianza de 30.232, una mediana de 24.00, un valor mínimo de 17.00 y un valor máximo de 35.00 millas por galón.

Adicionalmente, el intervalo de confianza con un nivel de significancia igual a 95% nos dice que para el parámetro muestral denominado: **la media está entre: 22.345 y 26.988 millas por galón.**

Los siguientes análisis estadístico se llevarán a cabo por medio de un Diseño de Experimentos, el cual nos proporcionará suficiente información para poder distinguir cual es el factor o los factores así como sus combinaciones que afectan de forma más significativa a la **Variable Respuesta (Millas por Galón)**, su análisis, las recomendaciones así como, las conclusiones finales se explicarán en los incisos subsecuentes a este inciso.

El presente diseño pretende únicamente revisar con base en los 3 factores elegidos; cuales son las mejores condiciones para cada factor que bajo condiciones controladas tienen probabilidades de lograr el mejor rendimiento de combustible en el automóvil.

En ningún momento el presente diseño pretende establecer como verdad inamovible que dichos factores son de manera exclusiva aquellos que únicamente influyen en el rendimiento y consumo de combustible; debido a que como se menciona al inicio de este estudio, para fines prácticos se llevo a cabo un

“screening⁵⁶” con base a la experiencia y “feeling⁵⁷” de los integrantes para optimizar la variable respuesta buscada.

Gráficos y Diagramas de resultados

Como ya se había explicado antes, decidimos hacer un diseño experimental 2^k completamente al azar; de este experimento y haciendo uso de la gráfica de Pareto para los efectos de los factores o variables en el Millaje recorrido por galón de combustible, se tiene lo siguiente:

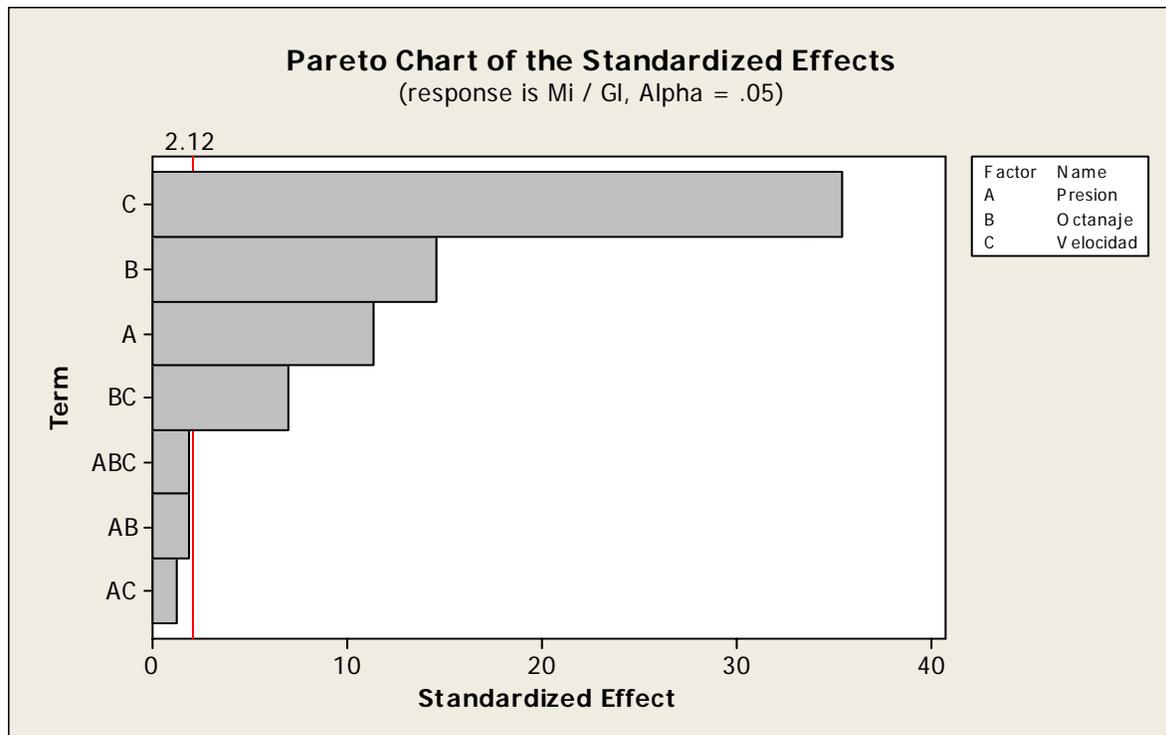


Figura 7.10 Pareto de efectos

Factorial Fit: Mi / Gl versus Presión, Octanaje, Velocidad

Estimated Effects and Coefficients for Mi / Gl (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constant | | 24.667 | 0.1318 | 187.21 | 0.000 |
| Presión | 3.000 | 1.500 | 0.1318 | 11.38 | 0.000 |
| Octanaje | 3.833 | 1.917 | 0.1318 | 14.55 | 0.000 |

⁵⁶ Screening: filtrado por su traducción al español

⁵⁷ Feeling: Sentimiento o intuición por su traducción al español

| | | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Velocidad | -9.333 | -4.667 | 0.1318 | -35.42 | 0.000 |
| Presión*Octanaje | 0.500 | 0.250 | 0.1318 | 1.90 | 0.076 |
| Presión*Velocidad | 0.333 | 0.167 | 0.1318 | 1.26 | 0.224 |
| Octanaje*Velocidad | -1.833 | -0.917 | 0.1318 | -6.96 | 0.000 |
| Presión*Octanaje*Velocidad | -0.500 | -0.250 | 0.1318 | -1.90 | 0.076 |

S = 0.645497 R-Sq = 99.04% R-Sq(adj) = 98.62%

Tabla 7. 8 Análisis de Varianza

Como se puede observar el valor de la **S cuadrada es del 99.04%**, esto quiere decir que el modelo explica el comportamiento del fenómeno en un 99.04%.

En el siguiente paso se eliminará la interacción **Presión * Velocidad** y recalcularemos la **S²**, esto debido a su **p-value**

Teniendo:

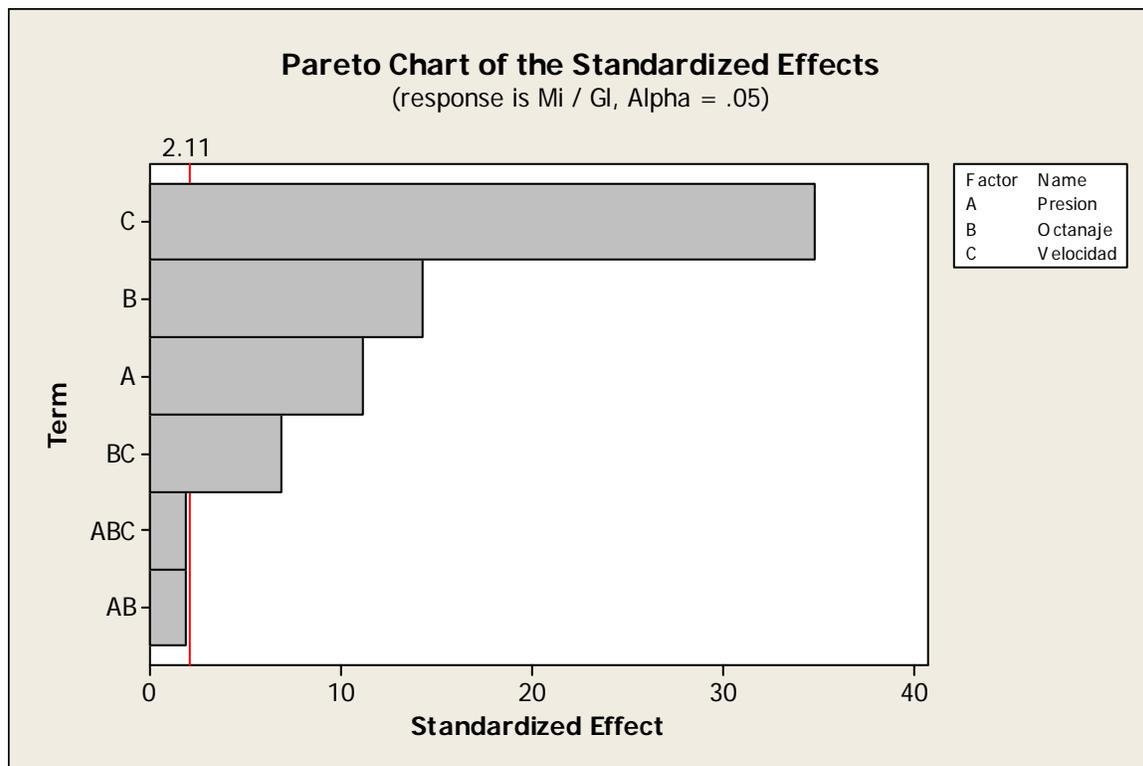


Figura 7.11 Pareto de efectos mejorados

Factorial Fit: Mi / Gl versus Presión, Octanaje, Velocidad

Estimated Effects and Coefficients for Mi / Gl (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante | | 24.667 | 0.1341 | 183.99 | 0.000 |
| Presión | 3.000 | 1.500 | 0.1341 | 11.19 | 0.000 |

| | | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Octanaje | 3.833 | 1.917 | 0.1341 | 14.30 | 0.000 |
| Velocidad | -9.333 | -4.667 | 0.1341 | -34.81 | 0.000 |
| Presión*Octanaje | 0.500 | 0.250 | 0.1341 | 1.86 | 0.080 |
| Octanaje*Velocidad | -1.833 | -0.917 | 0.1341 | -6.84 | 0.000 |
| Presión*Octanaje*Velocidad | -0.500 | -0.250 | 0.1341 | -1.86 | 0.080 |

S = 0.656790 R-Sq = 98.95% R-Sq(adj) = 98.57%

Tabla 7. 9 Análisis de Varianza mejorada

Como se puede observar el valor de la S^2 es de **98.95%**, esto quiere decir que el modelo explica el comportamiento del fenómeno en un 98.95%.

Como siguiente paso eliminaremos la triple interacción y recalcularemos la S cuadrada, esto debido a su **p-value**

Teniendo:

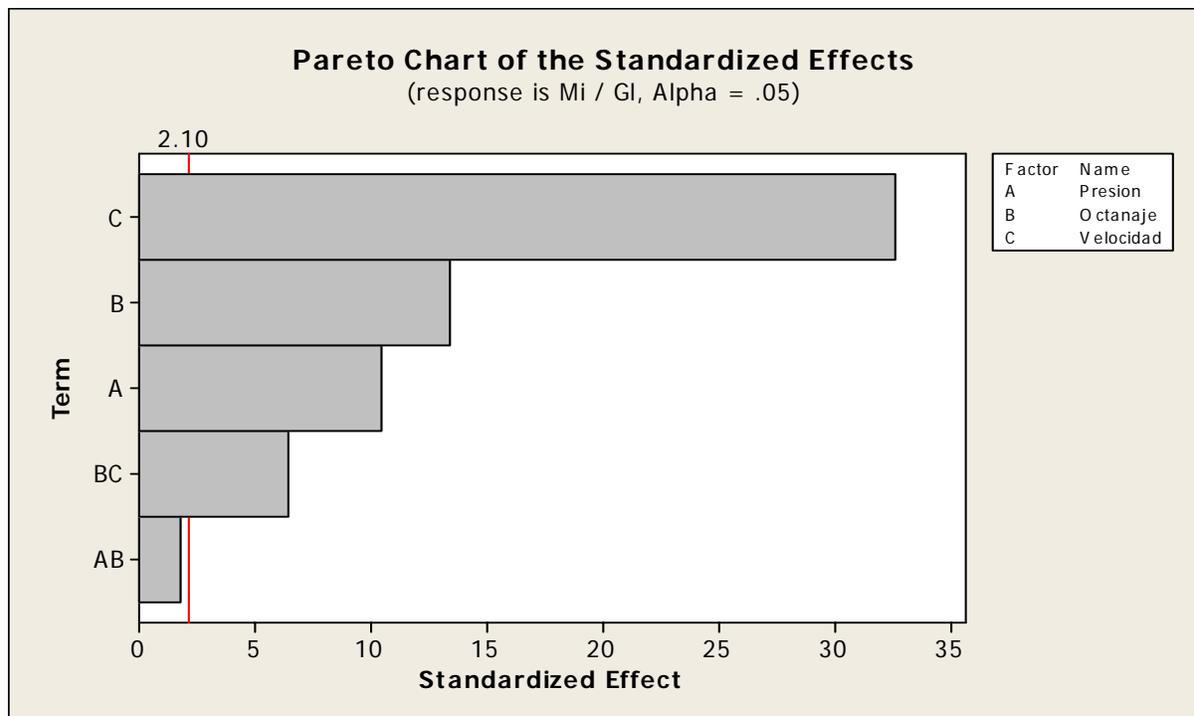


Figura 7.12 Pareto de efectos mejorados

Factorial Fit: Mi / Gl versus Presión, Octanaje, Velocidad

Estimated Effects and Coefficients for Mi / Gl (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante | | 24.667 | 0.1430 | 172.50 | 0.000 |
| Presión | 3.000 | 1.500 | 0.1430 | 10.49 | 0.000 |

| | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Octanaje | 3.833 | 1.917 | 0.1430 | 13.40 | 0.000 |
| Velocidad | -9.333 | -4.667 | 0.1430 | -32.64 | 0.000 |
| Presión*Octanaje | 0.500 | 0.250 | 0.1430 | 1.75 | 0.097 |
| Octanaje*Velocidad | -1.833 | -0.917 | 0.1430 | -6.41 | 0.000 |

S = 0.700529 R-Sq = 98.73% R-Sq(adj) = 98.38%

Tabla 7. 10 Análisis de Varianza mejorada

Como se puede observar el valor de la S^2 es de **98.73%**, esto quiere decir que el modelo explica el comportamiento del fenómeno en un 98.73%.

El siguiente paso será eliminar la interacción **Presión * Octanaje** y recalcularemos la S^2 , esto debido a su **p-value**

Teniendo:

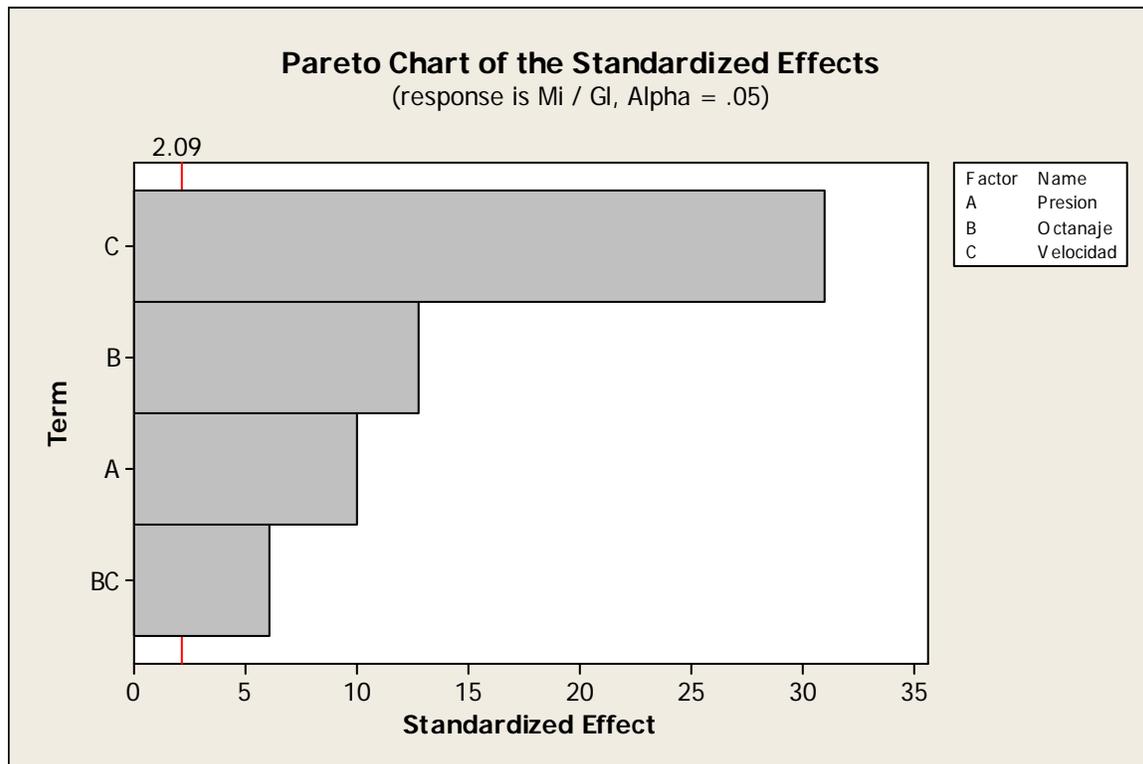


Figura 7.13 Pareto de efectos optimizados

Factorial Fit: Mi / Gl versus Presión, Octanaje, Velocidad

Estimated Effects and Coefficients for Mi / Gl (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante | | 24.667 | 0.1505 | 163.86 | 0.000 |
| Presión | 3.000 | 1.500 | 0.1505 | 9.96 | 0.000 |
| Octanaje | 3.833 | 1.917 | 0.1505 | 12.73 | 0.000 |

| | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Velocidad | -9.333 | -4.667 | 0.1505 | -31.00 | 0.000 |
| Octanaje*Velocidad | -1.833 | -0.917 | 0.1505 | -6.09 | 0.000 |

S = 0.737468 R-Sq = 98.51% R-Sq(adj) = 98.20%

Tabla 7. 11 Análisis de Varianza **Optimizada**

Como se puede observar el valor de la S^2 es de **98.51%**, esto quiere decir que el modelo explica el comportamiento del fenómeno en un 98.51%.

Este valor es muy bueno para predecir el comportamiento del fenómeno y además, los factores e interacción que permanecen en el modelo, tienen alta significancia en el modelo de predicción, por lo cual hasta aquí detendremos la eliminación de factores, toda vez que el **p-value** de los factores remanentes es menor de 0.05.

7.8 Planes futuros Fase de Mejora Optimización

Validación del modelo utilizado.

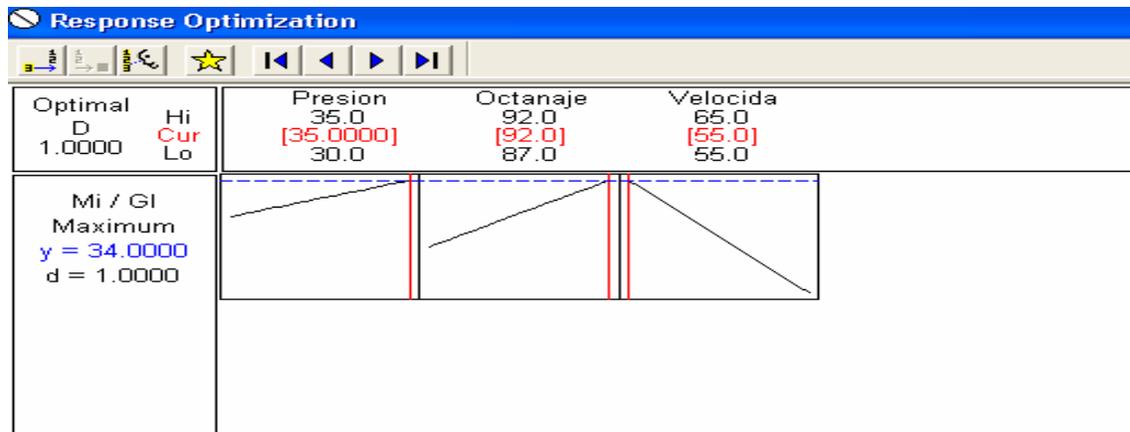


Tabla 7. 12 OPTIMIZACIÓN

El modelo matemático que explica el comportamiento de este fenómeno es el siguiente:

$$Y = - 401.25 + 0.6 \text{ PRESION} + 5.167 \text{ OCTANAJE} + 5.630 \text{ VELOCIDAD} - 0.0733 \text{ OCTANAJE} * \text{VELOCIDAD}^{58}$$

⁵⁸ Modelo que proviene del análisis estadístico del Diseño de experimentos

El cual tiene un alto porcentaje de explicación del fenómeno, siendo este del 98.51%, el cual se considera suficientemente grande, para garantizar que los resultados del modelo son altamente confiables.

Prueba de Normalidad de los Residuales

Para poder validar el experimento se procederá a revisar los supuestos básicos del experimento.

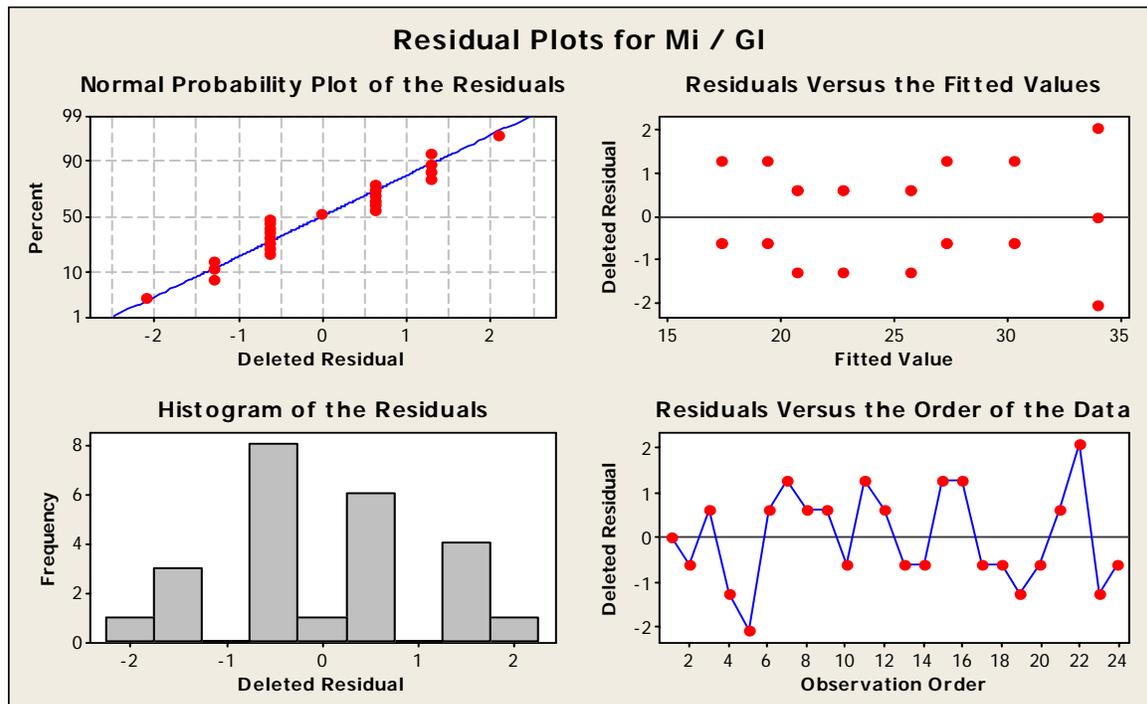


Figura 7.14 Residuales

Las figuras nos muestran que se tiene normalidad e independencia estadística.

Resultados finales

| Consumo inicial de combustible al arranque | Objetivo de reducción inicial | Objetivo Preliminar | Resultado final | Mejora |
|--------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------|------------|
| 0.26 gallon/start | 0.195 gallon/start | 25% | 0.13 gallon/start | 50% |

Como se puede observar en la tabla 7.13 el desempeño final fue mejor que el objetivo preliminar.

Sin embargo es menester aclarar lo siguiente:

"Los valores de rendimiento se obtuvieron en condiciones controladas de laboratorio, que bien pueden no ser reproducibles ni obtenerse en condiciones y hábitos de manejo convencional, debido a condiciones climatológicas, combustible, condiciones topográficas hábitos de manejo y otros factores"⁵⁹

7.6 Fase de Control.- Mantenimiento de la Mejora

Para poder mantener la mejora se procedió a emitir una serie de recomendaciones en el Manual del Propietario donde se indica la el manejo adecuado así como la revisión de la presión de aire en las ruedas.

Condiciones de tráfico y del camino

El tráfico de movimiento lento, el manejo en subida, las frecuentes curvas pronunciadas y los caminos irregulares tienen un efecto adverso en el consumo de combustible.

Hábitos irregulares de manejo

Anticípese a los peligros que se encuentren más adelante y mantenga una distancia de manejo segura con respecto al vehículo que va adelante.

Esto no sólo reduce el consumo de combustible, sino también el nivel de ruido.

Si debe esperar mucho tiempo en cruces de ferrocarril o en semáforos en áreas de construcción, es aconsejable apagar el motor durante este periodo.

Tres minutos de espera con un motor en ralentí es igual a casi 1 km de manejo.

Condiciones de carga del vehículo

El aumentar la carga del vehículo dará como resultado un mayor consumo de combustible. Retire las parrillas portaacupajes después de usarlas.

Condición del vehículo

La baja presión de la llanta o un mantenimiento inadecuado del motor o del vehículo también dará como resultado un mayor consumo de combustible.

Consejos para un manejo económico y para preservar el medioambiente:

Maneje en forma económica y utilice cargas eléctricas adicionales sólo cuando sean necesarias.

- Salga manejando inmediatamente sin calentar el motor primero.
- Utilice suavemente el acelerador.
- Pase a la velocidad inmediatamente superior tan pronto como sea posible para alcanzar una velocidad menor de motor.
- Manténgase en el cambio más alto el mayor tiempo posible. Pase a un cambio menor sólo cuando el motor ya no está funcionando correctamente.
- Evite acelerar a fondo por largos periodos. Si sólo se utilizan 3/4 de la velocidad máxima posible, el consumo de combustible disminuye hasta en un 50 %.
- Anticipe las condiciones de tránsito que se encuentran más adelante.
- Apague el aire acondicionado y el parabrisas térmico trasero cuando no los necesite.
- Revise y ajuste regularmente la presión de las llantas.
- Haga que revisen su vehículo con regularidad, de preferencia un distribuidor Ford.

Capacidades y espe

LLANTAS

Presión de las llantas

La presión de las llantas se debe revisar cuando las llantas están frías, antes de comenzar un viaje. La presión de su llanta de refacción se debe fijar al valor más alto dado para la combinación de vehículo y tamaño de llanta.

Si se usan las llantas de invierno, no exceda las presiones máximas de llanta indicadas por el fabricante de llantas.

| Presión Llantas PSI (lb/in ²) | | | |
|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------|
| Variante de modelo | Tamaño de las llantas | Carga normal hasta 3 personas | |
| | | Parte delantera | Parte trasera |
| 1.6 l Dirección manual | 175/65 R 14 H | 32 | 29 |

⁵⁹ Lo anterior es una nota que aparece en la página electrónica de la CONAE, dependencia pública del Gobierno de la República Mexicana.

Conclusiones y recomendaciones

Por medio del Análisis del Diseño Experimental Factorial con Tres Factores a dos niveles en Completamente al Azar, hemos podido revisar de forma objetiva el impacto que tienen en la Variable Respuesta, que para nuestro caso se ha denominado Cantidad de Millas por Galón de combustible recorridas, los factores:

- **Presión de Inflado de la Llantas**
- **Octanaje del Combustible**
- **Velocidad de Desplazamiento**

Se pudo determinar qué combinación de factores, es decir a que nivel de aplicación de los mismos, hemos podido lograr el mejor desempeño del vehículo, lo cual nos servirá para poder recomendar a nuestros clientes el modo idóneo de manejar su vehículo logrando con esto su máxima satisfacción en cuanto a Ahorro de Combustible se refiere.

Recomendaciones para la solución de la situación planteada.

El buscar la eficiencia en el consumo de combustible en las unidades automotrices, y por ende la determinación de la autonomía vehicular, para cada tipo de modelo construido, es uno de los Tópicos en la Industria automotriz que tienen una aplicabilidad verdaderamente grande. En otras palabras sirven de base de sustentación para lograr desarrollos más eficientes y a un bajo costo, así como, la preservación del medio ambiente.

Por último debemos de resumir que es de **suma importancia ubicar al cliente en primer lugar**, para posteriormente revisar identificar cuales son sus deseos o bien su insatisfacción, una vez reconocida esta **"voz"**, lo que sigue es obtener la información, para

posteriormente analizarla de forma estadística, para que al final, se emitan conclusiones y recomendaciones para **lograr la mejora continua, que en nuestro caso es la completa satisfacción del cliente final.**

Bibliografía

- Brassard, Michael, Six Sigma Memory Jogger II, USA. Editorial Goal/QPC. 2002
- C. Weimer Richard. Estadística. México. Editorial CECSA. 2000
- Casares, David y Siliceo, Alfonso, Planeación de Vida y Carrera. México. Editorial Limusa. 2005
- Ishikawa, Kaoru. ¿Qué es el Control Total de Calidad?, México, Norma, 1985
- Kaplan & Schuster, AP Statistics. U S A. Editorial Kaplan. 2004
- Lamprecht, James A., El Six Sigma Desmitificado, México, Panorama, 2004
- Mazarr, Michael. ¿Qué será de MÉXICO en el 2005? México. Publicaciones Cruz O., S.A. 2000
- Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, México, Limusa, 2005
- Novelo Rosado, Sergio A., El Mito de la ISO 9001:2000 ¿Es esta Norma un Sistema de Calidad Total?, México, Panorama, 2002
- Novelo Rosado, Sergio A., "101 Preguntas y Respuestas a cerca de la Calidad y la Mejora Continua", México, Panorama, 2000
- Peralta Alemán, Gilberto, De la Filosofía de la Calidad al Sistema de mejora Continua, México, Panorama, 2004
- Portus Govinden, Lincoyán. Curso Práctico de Estadística. México. Editorial Mc Graw Hill. 1988
- Salinas, Emilio, Diseño de Experimentos, Apuntes para Seis Sigma, Tlamatini-UIA, 2006.
- Slater, Robert., Mejorar o ser Vencido, México, Diana, 2001

- CONCEPTOS RENDIMIENTO, ADITIVOS,
<http://cipres.cec.uchile.cl/~icollao/objetivos.html>
- GASOLINA,
<http://tq.educ.ar/tq03028/html/naftas.htm>
- MOTOR, GASOLINA Y PLOMO
http://www.gratiszona.com/motor/tipos_gasolina.htm
- OCTANAJE Y SU RELACIÓN CON RENDIMIENTO
<http://www.automotriz.net/cgi-bin/antiframe.pl?ref=http://www.automotriz.net/tecnica/octanaje-gasolina.html>
- OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE RENDIMIENTO EN EL MOTOR
<http://motor.terra.es/motor/articulo/html/mot25961.htm>
- SEMIP, Comisión Petroquímica Mexicana,
Desarrollo histórico y análisis de la situación actual de la industria petroquímica en México, 1984.