

1.1 Una reseña histórica necesaria

La frase “Gestión para la Calidad”, que hoy en día es común encontrar en el ámbito internacional, soportan dos ideas claves y evolutivas; la primera es “gestión” en su modalidad substantiva o “gestionar” en su modalidad de verbo transitivo, que significa “hacer diligencias conducentes al logro de un negocio, actividad o deseo¹” y la segunda es “calidad” que ha tenido diversas interpretaciones a través de la historia reciente del siglo XX.

La palabra calidad debe permitir cuantificar y comparar, dentro del marco de referencia de nuestro sistema en estudio. A través de la evolución de este concepto se han identificado varias etapas históricas éstas son²:

Primera Etapa: Es ubicada antes del siglo XX e inicios del mismo, hasta 1910 aproximadamente. Esta etapa se caracterizó porque la calidad era únicamente parte de la fabricación. En este sistema un trabajador, o por lo menos un número reducido de ellos, tenía la responsabilidad de la manufactura completa del producto, por tanto, cada trabajador podía controlar totalmente la calidad de su trabajo.

Segunda Etapa: Aproximadamente de 1910 a 1925, por la necesidad de aumentar la producción, reduciendo sus costos, tomó auge el modelo de Frederick W. Taylor, consistente en la separación de actividades en los procesos de producción. Según este modelo, cada trabajador sólo era responsable de las actividades o tareas que le correspondían. La empresa como tal requirió entonces un supervisor por línea de producción, agrupando estos supervisores en un área o departamento de control o supervisión de la calidad. En esta etapa el responsable de la calidad del producto por línea de producción era el supervisor. En la década de los años 20, la compañía Bell Telephone fue líder en la historia moderna del control de calidad³ creando este departamento por separado.

Tercera Etapa: Esta etapa abarca aproximadamente de 1925 a 1935, caracterizándose por la creación de departamentos o áreas de inspección, que no sólo se ocupaban del control de la calidad, sino que además tenían la misión de formular nuevas teorías y métodos de inspección para mantener y mejorar la calidad. Por ejemplo, en la Western Electric se formó un departamento de inspección para respaldar a las compañías operativas de la Bell. Los pioneros del aseguramiento de la calidad Walter A. Shewhart, Harold F. Dodge, George Edwards, fueron miembros de este departamento y fue allí donde se acuñó por primera vez, el término “Aseguramiento de la Calidad”. La elaboración de gráficas de control por parte de Shewhart, de técnicas de muestreo por Dodge y de técnicas de análisis económicos para resolver problemas por Edwards, fueron las bases del moderno aseguramiento de la calidad⁴.

Cuarta Etapa: Se ubica aproximadamente de 1935 a 1965, mediante la maduración y comprensión de las teorías y métodos de inspección estadísticos y técnicas de análisis económicos desarrollados en la etapa anterior y las fuertes presiones de producción provenientes de la segunda guerra mundial, donde las esferas militares comenzaron a utilizar procedimientos estadísticos de muestreo y establecer normas a cumplir por los proveedores. Así, el control estadístico de calidad se popularizó y otras empresas lo adoptaron en forma gradual. Se crearon las tablas de muestreo “MIL – STD” (Military Standard).

¹ Diccionario Porrúa de la Lengua Española©2001, pág. 354

² Feigenbaum A.V., Control Total de la Calidad, 3ª Edición©1994, Edit. Continental, págs. 16 a 18

³ M.D. Fagan, ed. A history of Engineering and Science in the Bell System, the Early Years (1875 – 1925) (New York: Bell Telephone Laboratories, 1974)

⁴ Evans J.R./Lindsay W.M., Administración y Control de la Calidad©1995, Edit. Iberoamérica, págs. 3 a 8

En 1944 se publicó por primera vez la revista Industrial Quality Control y poco después se fundaron asociaciones profesionales entre las que destaca la American Society for Quality Control (ASQC), actual American Society for Quality (ASQ).

Una de las mayores contribuciones de esta cuarta etapa, fue la introducción de la inspección por muestreo, en lugar de la inspección al 100%. El trabajo del control de calidad, sin embargo, permaneció restringido a las áreas de producción y su crecimiento fue lento.

La lentitud del crecimiento del control de calidad tuvo poco que ver con los problemas del desarrollo de las ideas técnicas y estadísticas, el crecimiento de conceptos como la gráfica de control y los planes fundamentales de muestreo pronto quedaron establecidas. Los principales impedimentos fueron la voluntad o la habilidad de las organizaciones de negocios y gubernamentales para tomar las medidas adecuadas referente al trabajo técnico y estadístico.

Con frecuencia, las recomendaciones resultantes de las técnicas estadísticas, no podían manejarse mediante las estructuras existentes de toma de decisiones. Ciertamente, no estaban siendo manejadas con eficacia por los grupos de inspección existentes, o por quienes se convirtieron en coordinadores del control de calidad, o los ingenieros de diseño a quienes se les daban tareas parciales para difundir el tema del control de calidad. El trabajo que se estaba realizando era aún básicamente la inspección del trabajo en planta, el cual nunca pudo en realidad abarcar los verdaderos problemas de la calidad según la veían las administraciones de las empresas.

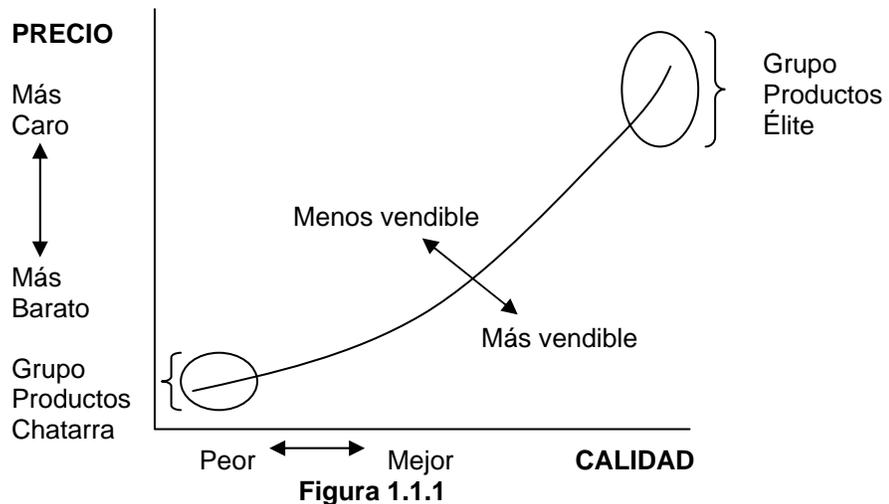
Quinta Etapa: Es ubicada aproximadamente de 1965 a 1985. En la década de 1960 existieron nuevas corrientes de pensamiento administrativo entre las que destaca la administración por objetivos (APO), la cual inició un concepto integrador de todas las partes de la empresa. En las décadas del 70 y principalmente en la del 80, se consolidó el sistema de administración para la calidad total (ATC); en esta última, la empresa es un todo y la responsabilidad de la calidad la tiene la alta gerencia, verificando los niveles de calidad por medio de procedimientos preestablecidos, validados y hechos por el propio trabajador con capacitación y entrenamiento, tanto en las áreas de producción, como las áreas de apoyo administrativo. Sólo cuando las empresas empezaron a establecer una estructura operativa y de toma de decisiones para que la calidad del producto fuera lo suficientemente eficaz, pudieron obtener resultados tangibles con mejor calidad y menor costo.

Se empezó a comprender que el sistema que forma la empresa debe ser flexible y evolutivo, conforme a los diferentes mercados en la cual la empresa se encuentra involucrada. Recordando el siguiente comportamiento del mercado y de la competencia generada en el mismo:

“A valores iguales de los parámetros de calidad que el cliente observe, el menor precio gana; y a valores de precio iguales, los mejores parámetros de Calidad Ganan”.

Aunque la empresa o institución ineficiente logre satisfacer su mercado (clientes), existe el hecho de que hace las cosas con gran desperdicio y cuando aparece un competidor que las realiza con mayor eficiencia y por ende puede vender su producto más barato, entonces desaparece la primera ya que ambas tenían la misma Calidad. O bien, el competidor se encuentra más ordenado, identifica aspectos de mejora en el proceso de elaboración del producto, reduce sus costos y logra al mismo precio mejorar sus parámetros de calidad y utilidades; en consecuencia la primera empresa desaparece puesto que no puede competir.

Si consideramos una gráfica intuitiva donde los ejes son calidad y precio, se generan dos regiones, la región del producto más vendible (abajo) y la región del producto menos vendible (arriba) y en los extremos de la línea divisoria se encuentran los dos siguientes grupos: “Grupo de Productos Élite” y el “Grupo de Productos Chatarra”.



La línea divisoria de las dos regiones, es la percepción en el cliente del precio que debe pagar por la calidad recibida. Un ejemplo sobresaliente de la figura 1.1.1 ha sido el pueblo Japonés en los tiempos de posguerra. En la década del 60 las exportaciones japonesas eran consideradas del “Grupo de Productos Chatarra”, sin embargo, esta percepción cambió fuertemente hasta ser considerada del “Grupo de Productos Élite” en la década del 80. Adicionalmente movieron los mercados del mundo hacia la zona más vendible ya que sus productos eran del 20 al 40% menos costosos y consecuentemente más baratos con mayores márgenes de utilidad.

El cambio se inició cuando los directivos de muchas compañías de Japón observaron en 1948 y 1949 que una mejora en la calidad repercute de manera natural e inevitable en un aumento de la productividad. Esta observación surgió del trabajo de unos cuantos ingenieros japoneses que estudiaron la bibliografía proporcionada por los ingenieros de la Bell Telephone que incluía el libro de Walter A. Shewhart, Economic Control of Quality of Manufactured Product (Van Nostrand, 1931). Los resultados fueron alentadores, indicando que efectivamente la productividad progresa al reducir la variación, tal como se profetizaba en los métodos y la lógica del libro de Shewhart⁵.

En el verano de 1950, la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (JUSE) invitó al Dr. W. Edwards Deming a efectuar varios ciclos de conferencias a los directivos de las empresas japonesas, continuando con la educación, capacitación y entrenamiento del personal de las mismas. Lo anterior provocó la siguiente reacción en cadena:

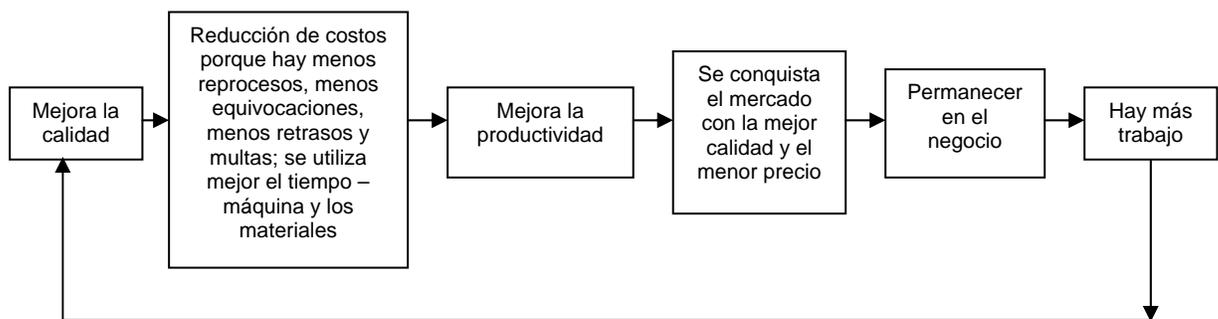


Figura 1.1.2

⁵ Deming W.E. “Calidad, Productividad y Competitividad. La Salida de la Crisis”. 3° Ed.©1989, en inglés©1982, Ed. Díaz de Santos, págs. 2 a 3 y 377 a 381

Al comprender que la reducción de la variación, es parte importante para facilitar el ajuste de valores de los parámetros de diseño que cada paso necesita en la ejecución de un proceso productivo, se formó una nueva cultura hacia la mejora de la calidad. El siguiente paso era fijar la referencia de la calidad, ésta se encuentra contenida en la cuarta fase de la figura 1.1.2. El mercado, el consumidor o cliente es la parte más importante de la línea de producción, algo nuevo para las economías de posguerra las cuales estaban condicionadas a la producción militar.

El Dr. Joseph Jurán realizó su primera visita a Japón en 1954, a solicitud de la JUSE. Sus enseñanzas proporcionaron a los directivos japoneses una nueva visión sobre la responsabilidad de los directivos para mejorar la calidad y la productividad. Entre 1950 y 1970 la JUSE enseñó métodos estadísticos a 14,700 ingenieros y a miles de trabajadores.

Fuertes contribuciones hacia nuevos conceptos de la calidad se desarrollaron en esta etapa. El Dr. Kaoru Ishikawa logró la formalización de los “Círculos de Control de Calidad” en la década del 60, clasificando las diferentes herramientas para la calidad en 3 categorías (Elementales, Intermedias y Avanzadas), y desarrolló la herramienta gráfica de “Diagrama de Causas y Efecto”, enlazando los conceptos manejados por el Dr. Armand V. Feigenbaum de “Control Total de la Calidad” (CTC). Cuando Feigenbaum publicó su artículo en la revista Industrial Quality Control en mayo de 1957 y posteriormente su libro Total Quality Control: Engineering and Management en 1961, contribuyó con el concepto de las 9M’s, factores fundamentales que influyen en la calidad: 1. Mercados, 2. Dinero, 3. Administración, 4. Personal, 5. Motivación, 6. Materiales, 7. Máquinas y mecanización, 8. Métodos modernos de información y 9. Requisitos crecientes del producto⁶. Para Feigenbaum el control total de la calidad es:

“El control total de la calidad es un sistema efectivo de los esfuerzos de varios grupos en una empresa para la integración del desarrollo, del mantenimiento y de la superación de la calidad con el fin de hacer posibles mercadotecnia, ingeniería, fabricación y servicio, para la satisfacción total del consumidor y al costo más económico”

A finales de esta etapa se desarrolló una conceptualización integral de la calidad, representando la percepción individual del cliente que tiende a ser dinámica mediante la siguiente expresión:

$$\text{CALIDAD PERCIBIDA} = \text{CALIDAD REAL} - \text{CALIDAD ESPERADA}$$

En la expresión, cualquier diferencia entre la calidad esperada y la real puede provocar ya sea una satisfacción inesperada del cliente o un desencanto. Por lo tanto, debe tenerse gran cuidado para asegurar que se cumplan las necesidades y expectativas del cliente. Consecuentemente, la calidad real ya lograda “como mínimo no disminuya”. Ahora bien, la calidad esperada es dinámica y creciente, ya que las empresas del grupo productos élite la elevan, además bajan sus costos de producción y tienden a reducir sus precios en el mercado. En ésta última idea tuvo mucho que ver la filosofía del Dr. Taguchi desarrollada inicialmente en la década de los 70’s. Evolucionando en la década de los 80’s con diferentes contribuciones de otros autores como “Difusión de la Función de Calidad” (en el occidente se conoce como “Despliegue de la Función de Calidad”), que es esquematizada en la siguiente figura:

⁶ El concepto de las 9M’s proviene de sus iniciales en inglés de su libro: 1. Markets, 2. Money, 3. Management, 4. Men, 5. Motivation, 6. Materials, 7. Machines and mechanization, 8. Modern information methods and 9. Mounting product requirements

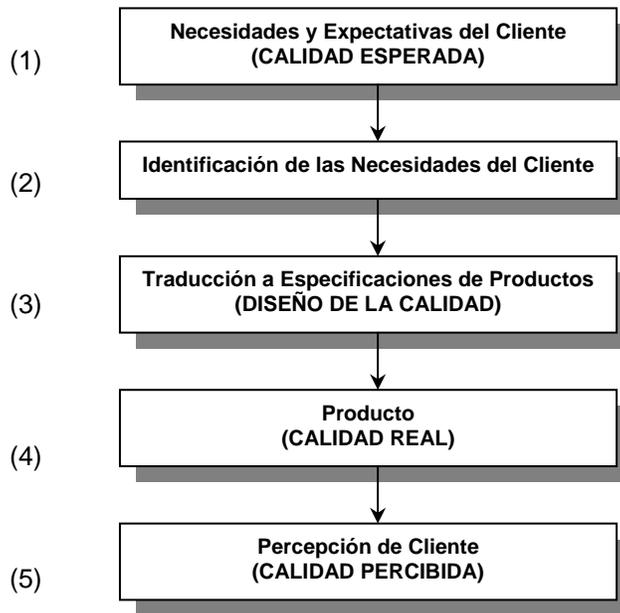


Figura 1.1.3

En la Figura 1.1.3 se ve reflejada la expresión de la calidad adicional percibida por el cliente, en las fases (5), (4) y (1). Las fases (2), (3) y (4) corresponden a los técnicos y estadísticos hacer que las empresas sean consistentes en producción y nivel de calidad. En esta etapa se nota más claramente que en los resultados, las recomendaciones técnicas y estadísticas si modifican las estructuras productivas.

Sexta Etapa: Se ubica aproximadamente de 1985 al 2000, en esta etapa se logra la sistematización de normas internacionales en las áreas de la calidad. Con la finalidad de hacer cumplir en las empresas que desean certificarse, con los requisitos mínimos de administración, organización, métodos y procedimientos que regulan sus procesos. Adicionando mayor conciencia de pensamiento estadístico en sus sistemas productivos, mejor comprensión y utilización de las herramientas de planeación y control, así como las herramientas administrativas.

Existe a su vez, una tendencia integradora de la normativa en aseguramiento de la calidad, previsión social y aspectos ambientales, aunque todavía las regulaciones se manejan por separado. La ISO⁷ (the International Organization for Standardization), hace revisiones cada 5 años (1990, 1995 y 2000), generando las directrices para los países miembros en sus comités. En la última revisión (ISO 9000:2000) existe la tendencia unificadora no obligada de los aspectos en calidad, social y ambiental. Por medio de los anexos de las normas en donde se plantean sus correspondencias entre “Gestión para la Calidad” y “Gestión Ambiental”, permitiendo que en cada país se genere la normativa en “Previsión Social”.

En esta reseña histórica hemos tratado de sintetizar la evolución del concepto de la calidad y estamos conscientes que grandes personalidades en el área no han sido nombradas, sin pretender ser exhaustivo, complementaremos lo anterior con el siguiente cuadro de contribuciones:

⁷ Las siglas originales en el lenguaje oficial de la Organización deberían ser IOS pero desde su creación se convino manejar en forma sistemática el orden de sus siglas como ISO ya que ésta última genera un efecto psicológico de homogenización e igualación

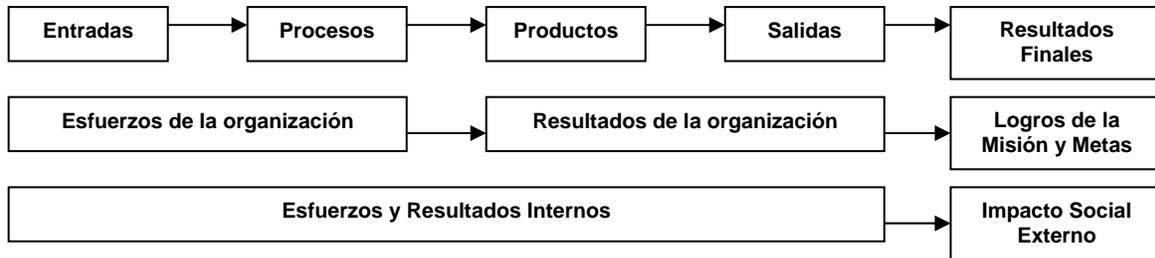
| | |
|---|---|
| Walter A. Shewhart Harold F. Dodge George Edwards | Utilizan el término: “Aseguramiento de la Calidad” Desarrollo de las Gráficas de Control Desarrollo de las Técnicas de Muestreo Desarrollo de las Técnicas de Análisis Económico |
| Armand V. Feigenbaum | Plantea literalmente el concepto “Control Total de la Calidad” y los factores de la calidad, 9M’s. |
| Walter E. Deming | Sugiere una metodología de 14 pasos y advierte de las 5 “Enfermedades Mortales en la Empresa” |
| Kaoru Ishikawa | Formaliza los “Círculos de Control de Calidad”, clasifica las herramientas para la calidad y desarrolla los “Diagramas Causas – Efecto” |
| Joseph M. Jurán | Su trilogía “Gestión Financiera” y “Gestión para la Calidad” |
| Shigeo Shingo | Sus aportaciones al “Justo a Tiempo” (Just in Time), y Cero Defectos, mediante la Ingeniería e Investigación de Procesos |
| Philip B. Crosby | Sus aportaciones de 14 puntos para lograr Cero Defectos y su Cuadro de Madurez hacia la Calidad en la Empresa |
| Claus Moller | Su aportación en la “Administración del Tiempo” |
| Genichi Taguchi | Su aportación en su filosofía de calidad y su modelo de Diseño de Experimentos |
| Eliyahu M. Goldratt | Su aportación en sus 5 pasos de “Teoría de Restricciones” |

Cuadro 1.1.1

1.2 El concepto de calidad. Significado actual

Fundamentalmente el concepto actual de calidad debe iniciarse en identificar los requerimientos que el cliente plantea (fase 2 de la figura 1.1.3). Se debe ser competente en convenir los diferentes atributos y su nivel de presencia en el producto final que utilizará el consumidor. Se debe traducir dichos requerimientos a especificaciones finales, intermedias e iniciales, de tal forma que se obtenga el proceso de elaboración que asegure el producto. Los requerimientos de elaboración definirán las especificaciones necesarias a cumplir por parte de los proveedores (fase 3). Se debe lograr un sistema de organización flexible que permita la verificación, retroalimentación, acciones preventivas y correctivas, de tal forma que cualquier corrección o mejora se documente, estandarice y se convierta en procedimiento operativo real y efectivo para ser aplicado (fase 4).

Para lograr lo anterior, será necesario la participación de todo el personal de la empresa, iniciando con la alta gerencia que debe tener liderazgo reconocido por los demás integrantes. Esto último es un hecho para lograr cooperación. El enfoque de la organización debe ser hacia los procesos de elaboración con la conceptualización de sistema como se esquematiza en la siguiente figura:



| ENTRADAS | PROCESOS | PRODUCTOS | SALIDAS | RES. FINALES |
|--|--|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Personas ➤ Dinero ➤ Equipos e Inst. ➤ Conocimientos ➤ Experiencias ➤ Tiempos ➤ Metas y Objetivos ➤ Normas Nal. E Int. ➤ Problemas Actuales ➤ Colaboraciones ➤ Necesidad Social ➤ Ofertas y Demandas | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Entrenamiento y Capacitación ➤ Técnicas de Manuf. ➤ Procedimientos ➤ Técnicas de Admón. ➤ Fórmulas y Métodos ➤ Admón. ACT y/o Directrices ➤ Implementación Normativa ➤ Sist. De Control y Verificación ➤ Acciones Preventivas y Correctivas ➤ Metodologías de Predicción y Prevención | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Trabajadores Entrenados ➤ Metas Cumplidas en Capacitación ➤ Manual de Calidad y Procedimientos ➤ Evaluación de Estándares ➤ Control de Variables en la Empresa ➤ Acciones Preventivas Claras ➤ Identificación Áreas de Influencia | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Calif. En el Trabajo y mejor Ambiente ➤ Mejores Variables de la Empresa ➤ Reducción de Costos ➤ Mejoramiento en las Utilidades ➤ Menos Acciones Correctivas ➤ Innovaciones de Áreas y Productos | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Confianza en las Relaciones Clientes/Empresa y Empresa/Proveedor ➤ Cualidades mejoradas Producto/Cliente ➤ Inversiones Estables en la Empresa |

Figura 1.2.1

Dentro del sistema de calidad en la empresa se debe tener un programa permanente de mejoramiento de la calidad, éste puede esquematizarse mediante la siguiente figura:

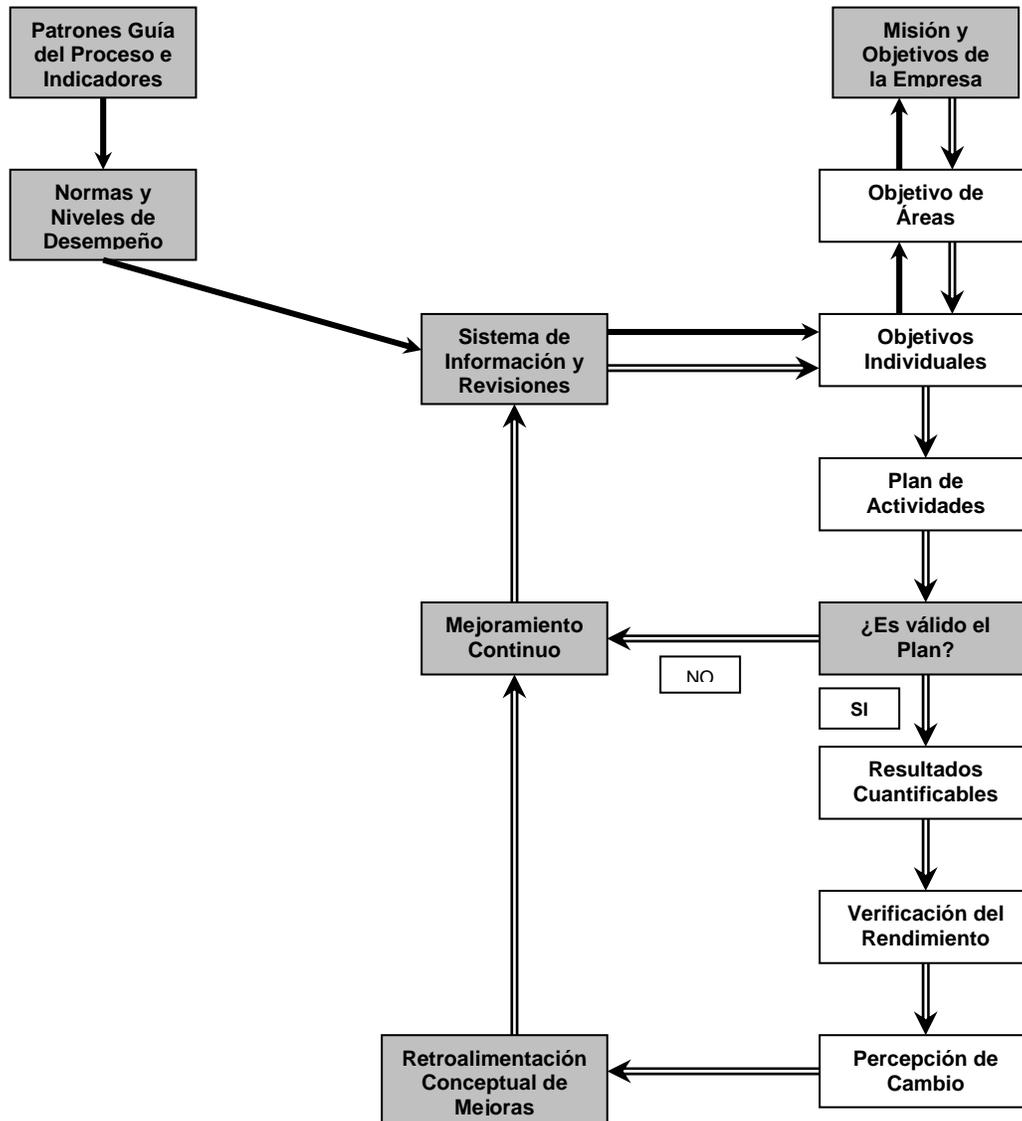


Figura 1.2.2

Mediante la definición de la misión y objetivos de la empresa, utilizando los patrones guía del proceso e indicadores, por medio de las Normas y niveles de desempeño definidos, podemos crear el Programa de Mejora Continua (PMC). En su centro de control se encuentra el sistema de información y revisiones que es el encargado de los registros, estandarización de métodos y procedimientos validados de operación. El sistema de información y revisiones nos permite basarnos en hechos para la toma de decisiones. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), en sus Normas ISO 9000:2000, plantea los 8 principios fundamentales de la filosofía de la calidad los cuales son los siguientes:

- 📖 **Principio 1:** Organización orientada al cliente.
- 📖 **Principio 2:** Liderazgo.
- 📖 **Principio 3:** Participación del personal.
- 📖 **Principio 4:** Enfoque basado en procesos.
- 📖 **Principio 5:** Enfoque de sistema para la gestión.
- 📖 **Principio 6:** Mejora continua.
- 📖 **Principio 7:** Enfoque basado en hechos para la toma de decisiones.
- 📖 **Principio 8:** Relaciones mutuamente benéficas con el proveedor.

El significado actual de calidad, sin pretender ser exhaustivo, es:

1. La calidad es un sistema de mejoramiento continuo.
2. Cumplir como mínimo con las necesidades y expectativas de los clientes, que dentro de la empresa se convierten en requerimientos.
3. Mejorar los procesos de elaboración de productos para que los clientes tengan valores positivos de calidad percibida adicional.
4. Mantener orden en la producción, orden en el aspecto financiero y contable, orden y diálogo con el personal de la empresa para poder identificar recursos mal utilizados y desperdicios, generando acciones de mejora que reducirán los costos involucrados, logrando aumentar la utilidad sin elevar precios de los productos.
5. Documentar toda acción en la empresa que permita mediante evaluaciones, crear innovaciones de mejora en los procesos y/o reducción de costos.
6. Lograr involucrar a todo el personal, y lograr una conciencia clara de la importancia de cada actividad hecha por el trabajador en el contexto completo de la calidad en la empresa.
7. El enfoque de “Gestión para la Calidad” en la empresa crea modificaciones de actitud, la cual reduce tiempos y trabajos para “buscar culpables” y aumenta la actitud de resolver problemas sin dañar otras áreas de la misma.

Los beneficios que la calidad aporta a la empresa son:

1. Sobrevivir en los sistemas productivos.
2. Al percibir los clientes productos con calidad, tienden a ser más leales a la empresa.
3. Al tener orden interno en la empresa, se definen más claramente las características que se requieren de los proveedores para que puedan cumplir.
4. Al tener documentadas y registradas las acciones en la empresa es posible dar seguimiento a las mismas y encontrar las causas que provocaron un error o un cambio y poder corregir o implementar modificaciones.
5. Mediante orden y análisis comparativos de las actividades en los procesos involucrados en la empresa se identifican proyectos de ahorro, reduciendo costos que no dan valor percibido por los clientes al producto.
6. Se genera en todo el personal un sentido de responsabilidad y previsión.
7. Todo el personal se involucra en la calidad, ya que toma mayor conciencia de su propia contribución al valor agregado final del producto.
8. La actitud de los empresarios se modifica al ser más reflexivos de las interrelaciones Cliente – Proceso Productivo – Personal de la Empresa – Proveedores.

1.3 Uso de la estadística en la gestión para la calidad

Se comentó al inicio de la sección 1.1 que la calidad debe ser cuantificada y comparada dentro del marco de referencia del sistema en estudio. La cuantificación y comparación debe lograrse bajo dos valores fundamentales que estudia la estadística, el ajuste al valor de los parámetros de diseño (tendencia central) y el comportamiento dispersivo o variación contenida en el sistema. Es entonces esperable que la metrología⁸ haga el enlace entre ambas áreas del conocimiento.

Los avances en los métodos desarrollados en la estadística han llevado fases de comprensión y maduración para ser aplicados en el concepto histórico de la calidad. Desde las primeras etapas en donde el concepto de calidad era fuertemente la inspección del producto terminal, hasta la conceptualización de la difusión para la calidad. Adicionalmente, el uso de las herramientas estadísticas, también ha reforzado otras áreas del conocimiento tales como las ingenierías y la administración, de tal forma que conjuntamente han logrado el enfoque funcionalmente integral de la calidad en las empresas.

⁸ Estudia los sistemas de medición, la manera de hacer las mediciones y los requerimientos de los aparatos y equipos que se utilizan

Las herramientas y métodos estadísticos que mayormente han influido en el concepto moderno de la gestión para la calidad son:

1. Sustentación teórica, práctica y operativa del pensamiento estadístico en la industria.
2. Planeación para la obtención de información, organización, manejo y análisis de la misma.
3. Apoyos metodológicos y gráficos.
4. Inspección por muestreo.
5. Teoría del control y sus gráficas.
6. Planeación, desarrollo y análisis de fenómenos y experimentos.
7. Metodologías de mejoramiento y optimización de resultados.

En forma particular, merecen ser nombrados: Los histogramas, polígonos de frecuencia, diagramas de Pareto y diagramas de dispersión, clasificados por el Dr. Ishikawa en las herramientas estadísticas elementales para la calidad. Dentro de las herramientas estadísticas intermedias se clasifican los métodos desarrollados por la teoría del muestreo e inspección, métodos para la estimación estadística de parámetros y comprobación de hipótesis, métodos basados en pruebas sensoras y métodos generales de diseño experimental. En la clasificación de herramientas estadísticas avanzadas se encuentran diseños experimentales especiales, método del Dr. Taguchi en diseños experimentales y diversos métodos de investigación de operaciones y optimización.

1.4 Mejoramiento de la calidad como requisito para el éxito

Un sistema para la calidad en sí mismo, no asegura que la empresa que lo tenga establecido, efectivamente otorgue en sus productos la calidad requerida por los clientes. Lo que si asegura un sistema para la calidad es la posibilidad de la identificación, seguimiento, medición, trazabilidad⁹ y corrección de desviaciones en los requerimientos que el producto debe cumplir.

El párrafo anterior tiene su justificación porque algunos sectores de los empresarios occidentales aún en las décadas 80 y 90 han decidido buscar la certificación ISO 9000 para la calidad, principalmente como factor a ser utilizado en sus programas mercadológicos, si bien, el lograr la certificación es fuertemente gratificante y motivo de orgullo interno en la empresa, ésta no asegura el éxito de la empresa.

La certificación en ISO 9000, lleva un conjunto de pasos, revisiones y auditorías para verificar la capacidad de la empresa en poder atender y cumplir como sistema integral los requerimientos de los clientes. El punto clave para el éxito empresarial está en la eficacia de su programa de mejoramiento continuo y la flexibilidad en la comprensión de los requerimientos crecientes y cambiantes del mercado.

1.5 Los diseños experimentales en el ámbito de la calidad, uso tradicional

Los experimentos diseñados nacieron principalmente en el área de la agricultura, siendo Ronald A. Fisher el que desarrolló y usó por primera vez el análisis de varianza como herramienta de análisis estadístico de los datos provenientes de experimentos diseñados. El diseño experimental inició su aplicación en la industria en la década de los 30's, en las empresas de lana y textiles en Inglaterra, cuando el concepto de calidad se encontraba en su tercera etapa que era básicamente de inspección (sección 1.1).

Actualmente los experimentos diseñados son muy efectivos en el mejoramiento de los procesos de manufactura, desempeño de productos y en la confiabilidad de uso¹⁰. Conforme ha evolucionado el concepto de la calidad, los diseños experimentales han aumentado sus aplicaciones en las actividades de diseño técnico (o diseño de ingeniería), en las cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Otras aplicaciones de apoyo al ámbito de la calidad han sido para la selección de materiales y proveedores. En las áreas donde el producto que se oferta es un servicio, han contribuido para mejorar la eficiencia del mismo. Una aplicación que merece ser nombrada aparte dentro de la ingeniería, es la selección de valores de parámetros de diseño. De modo que el producto funcione consistentemente bien en una amplia variedad de condiciones (producto robusto).

⁹ La interpretación que se le da a la palabra trazabilidad en calidad, proviene de traza (Planta Industrial o Diseño de un Proyecto que está conforme a la planeación), que conlleva la comparación de lo real con lo planeado. A diferencia de la palabra seguimiento que en calidad se interpreta como el compendio de hechos históricamente documentados

¹⁰ B. Scibilia, A. Kobi, R. Chassagnon, and A. Barreu, "Minimal Design Augmentation Schemes to Resolve Complex Aliasing in Industrial Experiments", *Quality Engineering*, 14(4), 523 – 529 (2002)

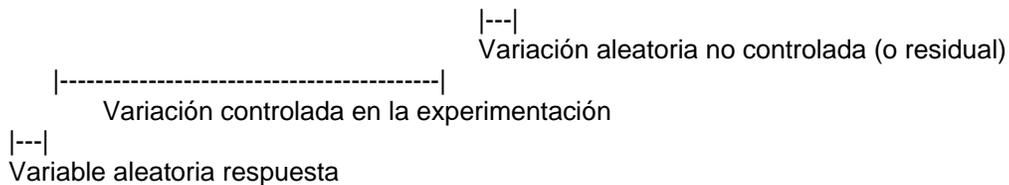
Vale la pena detenerse en la técnica del análisis de varianza, su fundamento y supuestos que deben cumplirse:

Fundamento y supuestos:

1. El análisis de varianza es una técnica estadística para el análisis de mediciones que dependen de varias clases de efectos (factores e interacciones) que actúan simultáneamente sobre la variable respuesta para decidir cuáles de estas clases son importantes y estimar los valores (efectos) de los mismos¹¹.
2. Las clases de efectos en estudio se definen asumiendo un modelo lineal de la variable respuesta, cuyos coeficientes (desconocidos) representan a estas clases de efectos.
3. Para la decisión de cuáles clases de efectos son importantes es necesario formular las hipótesis adecuadas sobre estos coeficientes.
4. En la solución, mediante la aplicación del análisis de varianza, de las pruebas de hipótesis que se establezcan, la variación total de la variable respuesta se descompone atendiendo a la contribución sobre ésta de cada una de las clases de efectos bajo estudio y la de la clase de los efectos no controlados (variación residual). Posteriormente se comparan cada una de las variaciones de las clases de efectos en estudio con la variación residual.
5. Para la validez de los resultados del análisis de varianza es necesario ciertos supuestos probabilísticos, a saber: independencia y distribución normal con igual varianza de la variable respuesta, concebida ésta como una variable aleatoria observable.

Para utilizar la técnica de análisis de varianza definimos las clases de efectos mediante un modelo estadístico lineal (punto 2 anterior) que es expresado matemáticamente en la forma siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \tag{Ec. 1.5.1}$$



Donde **y** es variable aleatoria observable. Las **x₁, x₂, ... x_p** son variables matemáticas y sus valores son controlados o al menos obtenidos en forma precisa por el experimentador. Los coeficientes **β₁, β₂, ... β_p** son valores desconocidos que representan los factores e interacciones y deben ser estimados a partir de los datos experimentales. El término **ε** es una variable aleatoria que representa la variación residual.

El modelo estadístico lineal expresado por la ecuación 1.5.1, tiene una estructura general que dependiendo de los valores de las variables matemáticas **{x_j para j = 1, 2, ... p}**, llevan a 3 tipos de análisis que son los siguientes:

1. Cuando todas las **{x_j}** son valores usualmente enteros 0 o 1, tenemos análisis de varianza.
2. Cuando todas las **{x_j}** son valores de observaciones de variables continuas independientes (también se les llaman concomitantes o covariables), la variable respuesta **y** es dependiente de las mismas, tenemos análisis de regresión.
3. Cuando se encuentran presentes ambos tipos de valores anteriores en las **{x_j}**, tenemos análisis de covarianza.

¹¹ Henry Scheffe. "The Analysis of Variance". John Wiley & Sons©1959, pág. 3

El término β_0 en la ecuación 1.5.1 es una constante aditiva, que en aplicaciones usualmente es la “media general de la variable respuesta”. En análisis de varianza se le llama “Modelo de efectos fijos” al modelo que cumple que todos los coeficientes $\{\beta_j\}$ son constantes. Se le llama “Modelo de efectos aleatorios” al modelo que cumple que todos los coeficientes $\{\beta_j\}$ son variables aleatorias, excepto el término de la constante aditiva β_0 en caso de que ésta se considere en el modelo. Se le llama “Modelo de efectos mixtos” al modelo que al menos uno de los $\{\beta_j\}$ es variable aleatoria y al menos uno de los $\{\beta_j\}$ es constante, con excepción del término β_0 .

En cualquiera de los tres tipos de análisis anteriores para formular las hipótesis (punto 3 de fundamento y supuestos), se requiere tener control sobre los dos tipos de errores que podemos cometer asociados a las hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1), estos son:

Error tipo I:

Es el que se incurre cuando se toma la decisión de rechazar la hipótesis (H_0), siendo esta verdadera. La probabilidad de cometer este error se denota como (α) el cual se dice que es el riesgo de cometer el error de tipo I o el tamaño de éste último:

$$\alpha = P\left(\text{rechazar } H_0 / H_0 \text{ es verdadera}\right)$$

Error tipo II:

Es el que se incurre cuando se toma la decisión de aceptar la hipótesis (H_0), siendo ésta falsa, el tamaño del error tipo II se denota por (β):

$$\beta = P\left(\text{aceptar } H_0 / H_0 \text{ es falsa}\right)$$

En el ámbito de la calidad el valor (α) se nombra como “riesgo del fabricante o proveedor” ya que a mayor valor del mismo, mayor porcentaje de la producción es rechazada por no tener la calidad mínima esperada, consecuentemente aumentan costos de inspecciones, pruebas, ajustes, rediseños, reprocesos y desperdicios. Por lo anterior su valor usualmente es pequeño, cuando una empresa tiene un buen sistema de calidad su valor es mínimo.

En el mismo ámbito anterior, el valor (β) se nombra como “riesgo del cliente o consumidor” ya que a mayor valor del mismo, el cliente o consumidor tiene la creencia que mayor porcentaje de la producción cumple con la calidad mínima esperada consecuentemente la acepta. Por lo anterior, el fabricante o proveedor debe mantener mínimo su valor ya que de lo contrario se incrementan los costos en demandas legales, garantías e insatisfacciones del cliente o consumidor. Cuando una empresa tiene un buen diseño, aplicación y funcionamiento de su sistema de calidad este valor debe tender a cero (la potencia del sistema completo debe tender a 1).

Al ser (α) y (β) los valores de los errores en las decisiones que podemos tomar en las pruebas de hipótesis éstos deben ser minimizados. La inferencia estadística aplicada a los procesos industriales es fundamental para el control de dichos errores. Desafortunadamente no es posible minimizar en forma simultanea ambos valores de los errores ya que es invalidado por Neyman–Pearson¹². Consecuentemente se sugiere que uno de ellos sea pre–asignado con algún valor pequeño. Históricamente se ha fijado (α), asignando el nombre de nivel de significación de la prueba estadística de la hipótesis. Al hacer la minimización del error (β), la potencia de la prueba descrita por su complemento $1-(\beta)$ es maximizada. En toda prueba estadística de hipótesis consecuentemente se debe buscar la prueba óptima, que es la prueba uniformemente más potente para un nivel de significación dado.

A partir del modelo estadístico lineal representado por la ecuación 1.5.1 se han generado diferentes diseños particulares de experimentación que son útiles en el ámbito de la calidad.

¹² S.D. Silvey. “Statistical Inference”. Chapman and Hall ©1975, Chapter 6, pág. 94 a 97

1. **Diseños de un factor:** Son aquellos que estudian sólo un factor (una sola clase de efectos) con varios niveles. Los niveles (o valores) de este factor pueden ser fijos o aleatorios. Entre los diseños más utilizados en este caso pueden mencionarse: el diseño completamente al azar, diseño en bloques al azar, cuadrado latino, etc.
2. **Diseños de más de un factor:** Son aquellos que estudian dos o más factores (varias clases de efectos). Usualmente los niveles de los factores son fijos ya que sus aplicaciones buscan comparar los valores de los factores preestablecidos que permitan encontrar la combinación más adecuada de ellos. Entre estos diseños se encuentran: Diseños factoriales completos, Diseños factoriales fraccionados, Diseños de factores anidados, etc.

1.5.1 Diseños factoriales completos

En los procesos, ya sea de producción de piezas o de servicios, generalmente se tiene una gran cantidad de factores que pueden influir en la respuesta, donde en cada factor existen diferentes niveles de estudio. Para estos casos, los diseños factoriales completos son los más adecuados desde el punto de vista estadístico ya que permiten desglosar los efectos principales y todos los efectos de las interacciones involucradas. Sin embargo, la desventaja práctica de su utilización radica en el gran número de corridas o ensayos individuales que se deben realizar. Por ejemplo, para poder estimar el error o residuo necesitaremos al menos 2 réplicas de cada ensayo individual ($n \geq 2$), considerando factoriales de la serie 2^k (en donde se tienen 2 niveles en cada uno de los k factores) y de la serie 3^k , se tendrán los siguientes números de ensayos individuales:

Número de ensayos con $n = 2$

| k factores | ensayos en 2^k | ensayos en 3^k |
|------------|------------------|------------------|
| 2 | 8 | 18 |
| 3 | 16 | 54 |
| 4 | 32 | 162 |
| 5 | 64 | 486 |
| 6 | 128 | 1458 |
| 7 | 256 | 4374 |
| 8 | 512 | 13122 |
| 9 | 1024 | 39366 |
| 10 | 2048 | 118098 |

Cuadro 1.5.1

Cada ensayo individual representa la planificación, verificación de condiciones y elaboración de la experimentación para obtener la respuesta, lo que repercute en tiempo, recursos y costos, que en la mayoría de las veces no es posible disponer. Las opciones a este problema son variadas y todas ellas inciden en las decisiones que se obtienen de la experimentación, sin embargo, es necesario puntualizar que estas opciones tienden más a ser complementarias que excluyentes. A continuación se describen las opciones posibles.

Opción 1: Reducir a solo una réplica ($n = 1$) los ensayos individuales por cada combinación de niveles de los factores (factorial no replicado). Tiene como consecuencia que no es posible la estimación de la variación residual ya que permanece confundida con la interacción de mayor orden, la importancia de tener variación residual radica en el hecho de que permite la comparación de las clases de efectos en estudio (punto 4 de fundamento y supuestos). Podría pensarse en la estimación de la variación residual a partir de la misma variable respuesta, es decir, a partir de la variación total, pero esta estimación es siempre mayor o igual que la variación residual e implicaría la posibilidad de no significación de los factores en estudio. Bajo esta opción, es posible la estimación de efectos principales e interacciones de menor orden y se sugiere sólo aplicarla cuando existan al menos 3 factores en estudio (en el caso de 3 factores la variación residual permanece confundida con la interacción ABC y en la serie 2^k la variación residual o ABC sólo tiene 1 grado de libertad que no asegura validez en el ANDEVA, punto 5 de fundamento y supuestos).

Opción 2: Mantener una sola réplica ($n = 1$) en los ensayos individuales. Una aproximación al análisis de un factorial no replicado consiste en suponer que ciertas interacciones de orden superior son despreciables, y utilizar estas sumas de cuadrados para estimar la variación residual. Esto último es una apelación¹³ al “principio de dispersidad de efectos”. Sin embargo, algunas veces en la práctica pueden existir interacciones de orden superior no despreciables. Un método de análisis atribuido a Daniel (1959)¹⁴ constituye una herramienta sencilla, gráfica y útil para ayudar a decidir que efectos podrían ser despreciables para ser usados en la estimación de la variación residual.

El método de Daniel sugiere graficar las estimaciones de los valores de los efectos en orden creciente en el eje horizontal y sus correspondientes valores porcentuales en el eje vertical con escala de probabilidad normal acumulativa. Los efectos que podrían ser despreciables son aquellos que se distribuyen normalmente con media cero y varianza σ^2 , éstos tienden a ubicarse a lo largo de una línea recta en esta gráfica, en cambio, los efectos que podrían ser significativos tendrán medias distintas de cero y no se ubican en la línea recta.

Bajo esta segunda opción siendo un poco más flexible que la primera y con la ayuda del análisis gráfico, es posible la estimación de la variación residual que nos permite hacer el análisis de varianza. Sin embargo, esta opción exige supuestos a priori¹⁵ para la estimación de la variación residual e implica un mayor conocimiento del comportamiento en las variables involucradas del proceso en estudio ya que dichos supuestos deben hacerse antes de la prueba de hipótesis.

Ejemplo 1.5.1 El profesor M.J. R. Gastelum¹⁶ utilizó inicialmente un diseño 2^3 completo no replicado para investigar los siguientes factores (A) Arquitectura Molecular, (B) velocidad de corte y (C) tiempo de paro del experimento. La variable respuesta (Y) es el esfuerzo máximo desarrollado por copolímeros de estireno – butadieno al aplicárseles una deformación durante cierto tiempo dado en kPa (kilopascal). Los niveles de los factores son:

| Factor | Nivel bajo (-1) | Nivel alto (1) |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| (A) Arquitectura Molecular | Estructura lineal | Estructura estrella |
| (B) Velocidad de corte | 1 rad/s | 10 rad/s |
| (C) Tiempo de paro del Exp. | 1 s | 10 s |

En la realización de los experimentos se cuidó que toda condición diferente a los niveles de los factores fuera igualmente constante y el orden en que fueron obtenidos los resultados fue aleatorio (no se reporta la secuencialización de resultados). Se reporta el uso de métodos gráficos para determinar validez en normalidad y varianza constante. Se utiliza la notación **-1** para el valor bajo y **1** para el valor alto de los niveles de los factores A, B y C.

A continuación se presenta la tabla de coeficientes de contrastes representados por columnas, cada fila representa la combinación específica de valores para los factores y el valor de la variable respuesta (Y). La tercera columna **I** representa la columna identidad que nos permite obtener la suma total de las (Y).

¹³ Recurrir o referirse a alguien superior para algún trabajo o necesidad, el “principio de dispersidad de efectos” plantea que en la mayoría de los sistemas en estudio son dominados por algunos de los factores e interacciones de bajo orden y que la mayoría de las interacciones de orden superior son despreciables, en el ámbito de la calidad corresponde a los principios emanados de W. Pareto

¹⁴ Cuthbert Daniel (1959). “Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two Level Experiments”, Technometrics, Vol. 1, págs. 311 a 341. Reporte coincidente tanto por Montgomery D. C. En Diseño y Análisis de Experimentos como por www.amstat.org/publications/tas/abstracts_98/hunter.html

¹⁵ Dichos supuestos a priori son los obtenidos vía el análisis gráfico

¹⁶ Rivera G. M.J., Fac. de Ciencias Químicas, Guadalajara Jal. En el XIII Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química AMIDIQ 1992, efectuado del 20 al 22 de Mayo 1992, en la Unidad Iztapalapa de la UAM, México D.F., publicado en “Avances en Ingeniería Química 1992 AMIDIQ” págs. 256 a 259

| | Y | I | A | B | AB | C | AC | BC | ABC |
|-----|--------|---|----|----|----|----|----|----|-----|
| (1) | 8.857 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| a | 17.500 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| b | 38.830 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| ab | 46.260 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| c | 9.2450 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| ac | 21.390 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| bc | 41.450 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| abc | 61.220 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Al ser un diseño factorial 2^3 completo no replicado y tratarlo como tal, sólo se tienen 8 tratamientos y 8 valores de la variable respuesta (Y), por lo tanto es la opción 1 anterior. No se reporta si las interacciones se encuentran presentes o no, en consecuencia, a primera instancia es necesario tenerlas presentes.

A partir del modelo general (Ec. 1.5.1), tenemos que $\{x_j = \pm 1 \text{ para } j = 1, 2, \dots, p, \text{ donde } p = 7\}$, la β_0 es la media general de la variable respuesta μ y los coeficientes $\{\beta_j\}$ se asocian¹⁷ a las letras α , β y γ respectivamente para los factores A, B y C, los coeficientes $\{\beta_j\}$ restantes se asocian a las interacciones AB, AC, BC y ABC mediante las expresiones $(\alpha\beta)$, $(\alpha\gamma)$, $(\beta\gamma)$ y $(\alpha\beta\gamma)$. El modelo es:

$$y = \mu + \alpha + \beta + \gamma + (\alpha\beta) + (\alpha\gamma) + (\beta\gamma) + (\alpha\beta\gamma) + \varepsilon$$

o bien:

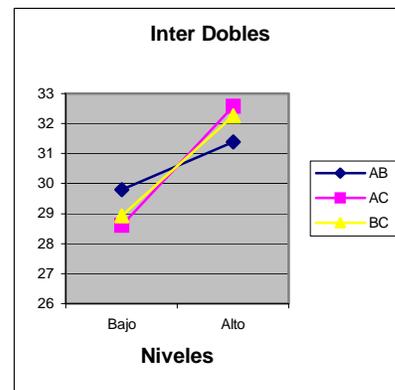
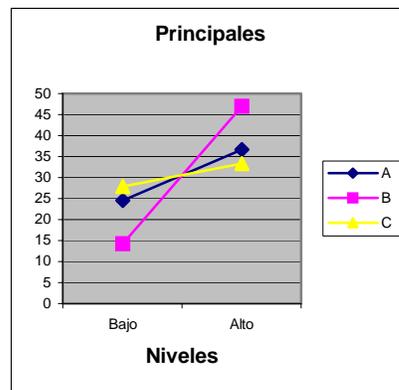
$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 AB + \beta_5 AC + \beta_6 BC + \beta_7 ABC + \varepsilon$$

Para los sistemas 2^k los efectos dados por cada contribución, representan las diferencias (Media alta) – (Media baja). Las fórmulas correspondientes a estos sistemas son:

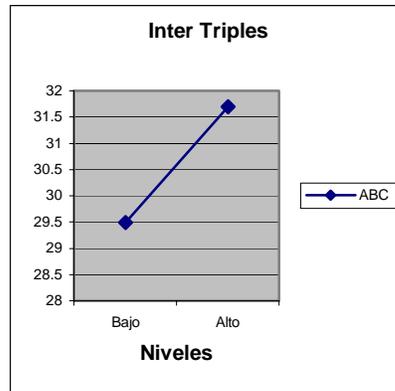
$$\text{Efec}_j = \bar{Y}_{\text{alto}} - \bar{Y}_{\text{bajo}} = \frac{\text{contraste}_j}{(2^{k-1})n} \quad \text{y} \quad \text{SS}_j = \frac{(\text{contraste}_j)^2}{(2^k)n}$$

Los valores de los contrastes, efectos, suma de cuadrados (SS), medias, coeficientes en donde $\beta_0 = 30.59400$ y gráficos de medias son:

| | Contrastes | Efectos | SS | Media baja | Media alta | β_i Modelo |
|------------|------------|---------|--------------|------------|------------|------------------|
| A | 47.988 | 11.9970 | 287.8560180 | 24.59550 | 36.59250 | 5.99850 |
| B | 130.768 | 32.6920 | 2137.5337280 | 14.24800 | 46.94000 | 16.34600 |
| C | 21.858 | 5.4645 | 59.7215205 | 27.86175 | 33.32625 | 2.73225 |
| AB | 6.412 | 1.6030 | 5.1392180 | 29.79250 | 31.39550 | .80150 |
| AC | 15.842 | 3.9605 | 31.3711205 | 28.61375 | 32.57425 | 1.98025 |
| BC | 13.302 | 3.3255 | 22.1179005 | 28.93125 | 32.25675 | 1.66275 |
| ABC | 8.838 | 2.2095 | 9.7637805 | 29.48925 | 31.69875 | 1.10475 |



¹⁷ Solamente cuando sea necesario se harán estas asociaciones a vía de este primer ejemplo se desarrolló, pero se usará otra notación más simplificada



Las pruebas de hipótesis para el sistema 2^3 son:

Para los factores (efectos principales)

$H_0: \beta_j = 0$ para j factor ($j = 1, 2$ y 3 que corresponde a **A, B y C**)

$H_1: \beta_j \neq 0$ al menos uno

Para las interacciones dobles

$H_0: \beta_j = 0$ para j interacción doble ($j = 4, 5$ y 6 que corresponde a **AB, AC y BC**)

$H_1: \beta_j \neq 0$ al menos uno

Para la interacción triple

$H_0: \beta_j = 0$ para j interacción triple ($j = 7$ que corresponde a **ABC**)

$H_1: \beta_j \neq 0$ al menos uno

Se encuentra confundida la triple interacción ABC con la variación residual (opción 1). Un ANDEVA inicial considerando la interacción ABC confundida con la variación residual, usando su valor para decidir la significación sólo de las 2 primeras pruebas de hipótesis (factores e interacciones dobles) es posible, pero para el caso 2^3 es objetable ya que los grados de libertad para la variación residual (o ABC) sólo es 1 y la validez de normalidad es débil. Los resultados son los siguientes:

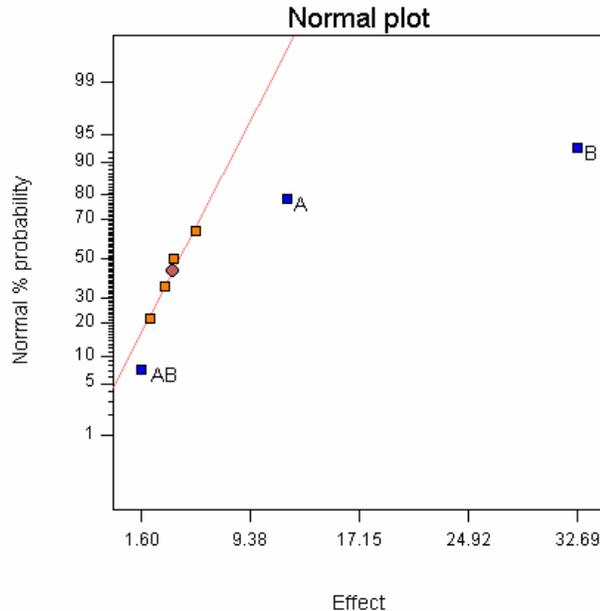
| FV | SS | GL | CM | F_0 | $P(F > F_0)$ |
|------------------|-------------|----|-------------|------------|----------------|
| A | 287.856018 | 1 | 287.856018 | 29.482026 | 0.11595 |
| B | 2137.533728 | 1 | 2137.533728 | 218.924815 | 0.04296 |
| C | 59.721521 | 1 | 59.721521 | 6.116639 | 0.24461 |
| AB | 5.139218 | 1 | 5.139218 | 0.526355 | 0.60043 |
| AC | 31.371120 | 1 | 31.371120 | 3.213010 | 0.32396 |
| BC | 22.117901 | 1 | 22.117901 | 2.265301 | 0.37334 |
| Res (ABC) | 9.763780 | 1 | 9.763780 | | Significativos |
| Total | 2553.503286 | 7 | | | B |

Modelo: $y = 30.594 + 16.346B$

Sólo es significativo el factor B (a $\alpha = .05$) ya que $P(F > F_0) < .05$. El factor A tiene una probabilidad mayor que 0.10. Un planteamiento recomendado para el análisis que puede seguirse bajo la opción 2 de esta subsección 1.5.1, es el siguiente:

Mediante la graficación de los efectos recomendados por Daniel (1959) en papel normal-aritmético con respecto al porcentaje de ordenamiento tenemos:

| Orden (i) | Tipo de Efecto | Efecto | % $=((i - .5)/7)(100)$ |
|-----------|----------------|---------|------------------------|
| 1 | AB | 1.6030 | 7.1429 |
| 2 | ABC | 2.2095 | 21.4286 |
| 3 | BC | 3.3255 | 35.7143 |
| 4 | AC | 3.9605 | 50.0000 |
| 5 | C | 5.4645 | 64.2857 |
| 6 | A | 11.9970 | 78.5714 |
| 7 | B | 32.6920 | 92.8571 |



Conforme a la graficación los efectos que difieren marcadamente de la recta son A y B. Notar que el factor C y sus interacciones se encuentran aproximadamente en la recta. Lo anterior, permite hacer una proyección a un diseño 2^2 con 2 réplicas, colocando como factores a A y B.

La proyección de resultados 2^2 , contrastes, efectos, sumas de cuadrados y medias son los siguientes:

| | Celda | I | A | B | AB |
|-----|---------|---|----|----|----|
| (1) | 18.102 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| a | 38.890 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| b | 80.280 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| ab | 107.480 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | Contrastes | Efectos | SS | Media baja | Media alta |
|----|------------|---------|-------------|------------|------------|
| A | 47.988 | 11.9970 | 287.856018 | 24.59550 | 36.59250 |
| B | 130.768 | 32.6920 | 2137.533728 | 14.24800 | 46.94000 |
| AB | 6.412 | 1.6030 | 5.139218 | 29.79250 | 31.39550 |

El ANDEVA¹⁸ correspondiente a la proyección 2^2 se tiene a continuación, lo que se maneja con el nombre error es el residuo consistente en $SS_C + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC}$ originales.

¹⁸ Elaborado con el INFOSTAT/Profesional ver. 1.1 actualización 17 de Mayo 2002. Univ. Nal. De Córdoba Argentina

Análisis de la varianza

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-----------|
| EM(kPa) | 8 | 0.951841 | 0.915722 | 18.123454 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)¹⁹

| F.V. | SC | gl | CM | F | Valor p |
|-----------|-------------|----|-------------|-----------|---------|
| Modelo | 2430.528964 | 3 | 810.176321 | 26.352699 | 0.0043 |
| Amol(A) | 287.856018 | 1 | 287.856018 | 9.363126 | 0.0377 |
| VelCor(B) | 2137.533728 | 1 | 2137.533728 | 69.527807 | 0.0011 |
| AB | 5.139218 | 1 | 5.139218 | 0.167164 | 0.7036 |
| Error | 122.974322 | 4 | 30.743581 | | |
| Total | 2553.503286 | 7 | | | |

Modelo: $y = 30.594 + 5.9985A + 16.346B$

Siendo significativos A y B al 5% y 1% respectivamente, no es concluyente la interacción AB (F<1). Los resultados son coincidentes con los encontrados por el profesor Gastelum en el sentido que reporta significativos A (Arquitectura Molecular), B (Velocidad de corte) y no significativos C (Tiempo de paro del experimento) e interacciones dobles y triple. Es posible su confirmación haciendo las otras 2 proyecciones 2² posibles ((A,C) y (B,C)). Sin embargo, para la interacción AB el estadístico F es menor que 1 y lo anterior hace pensar que es necesario un análisis de distancias residuales, bajo el modelo consistente en los 3 efectos en estudio (A, B y AB):

Modelo: $y = 30.594 + 5.9985A + 16.346B + .8015AB$

Desviación STD es la raíz cuadrada del cuadrado medio del error **S = 5.544689**.

S/(n)⁵ = 1.960343596

El criterio de decisión es, si el valor absoluto del residuo studentizado es mayor que el valor $T_{\alpha/2,7}$ entonces es punto atípico.

| Factores | | | Valor | Estimado | R | Residuo RS | $T_{\alpha/2,7}$ | Decisión |
|----------|----|----|--------|-------------|---------|--------------|------------------|---------------|
| A | B | C | Exp. | Mod. A,B,AB | Residuo | Studentizado | $\alpha = 0.01$ | Ptos.Atípicos |
| -1 | -1 | -1 | 8.857 | 9.051 | -0.194 | -0.098962 | 3.499481 | |
| 1 | -1 | -1 | 17.500 | 19.445 | -1.945 | -0.992173 | 3.499481 | |
| -1 | 1 | -1 | 38.830 | 40.140 | -1.310 | -0.668250 | 3.499481 | |
| 1 | 1 | -1 | 46.260 | 53.740 | -7.480 | -3.815657 | 3.499481 | Pto.Atípico |
| -1 | -1 | 1 | 9.245 | 9.051 | 0.194 | 0.098962 | 3.499481 | |
| 1 | -1 | 1 | 21.390 | 19.445 | 1.945 | 0.992173 | 3.499481 | |
| -1 | 1 | 1 | 41.450 | 40.140 | 1.310 | 0.668250 | 3.499481 | |
| 1 | 1 | 1 | 61.220 | 53.740 | 7.480 | 3.815657 | 3.499481 | Pto.Atípico |

Al tener presentes puntos con demasiada distancia residual (atípicos) es recomendable hacer transformación de variable respuesta, se hará la transformación siguiente:

$$y_T = \frac{1}{\sqrt{y}}$$

, representa el recíproco de la raíz cuadrada de la respuesta.

Resultados para y_T en 2³ original

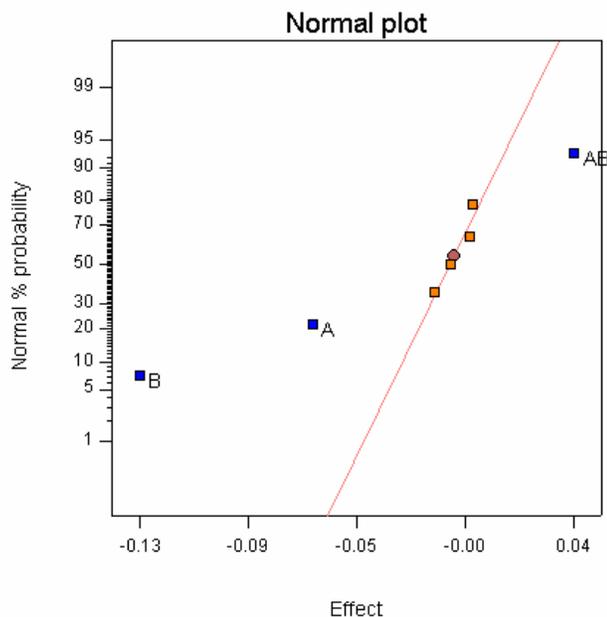
| | Y_T | Contrastes | Efectos | SS | Media baja | Media alta | β_i Modelo |
|-----|---------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------------|
| (1) | .336013 | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX | .21385000 |
| A | .239046 | -.250604 | -.0626510 | .00785030 | .24517550 | .18252450 | -.03132550 |
| B | .160478 | -.529530 | -.1323825 | .03505025 | .28004125 | .14765875 | -.06619130 |
| AB | .147027 | .168666 | .0421665 | .00355603 | .19276675 | .23493325 | .02108325 |
| C | .328887 | -.054328 | -.0135820 | .00036894 | .22064100 | .20705900 | -.00679100 |
| AC | .216219 | -.029768 | -.0074420 | .00011077 | .21757100 | .21012900 | -.00372100 |
| BC | .155324 | .005578 | .0013945 | 3.8893E-06 | .21315275 | .21454725 | .00069725 |
| ABC | .127806 | .001634 | .0004085 | 3.3374E-07 | .21364575 | .21405425 | .00020425 |

¹⁹ La suma de cuadrados SC tipo III, es aquella la cual en cada una de las diferencias de dato individual se le resta la media general

Resultados para y_T en 2^2 proyección en A, B

| | Y_T | Contrastes | Efectos | SS | Media baja | Media alta |
|-----|---------|------------|-----------|-----------|------------|------------|
| (1) | .664900 | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX | XXXXXX |
| A | .455265 | -.250604 | -.0626510 | .00785030 | .24517550 | .18252450 |
| B | .315802 | -.529530 | -.1323825 | .03505025 | .28004125 | .14765875 |
| AB | .274833 | .168666 | .0421665 | .00355603 | .19276675 | .23493325 |

La gráfica normal aritmética es la siguiente:



Su ANDEVA correspondientes es:

| FV | SS | GL | CM | F_0 | $P(F > F_0)$ |
|----------|-----------|----|------------|----------|----------------|
| A | .00785030 | 1 | .00785030 | 64.8882 | .0013 |
| B | .03505025 | 1 | .03505025 | 289.7146 | < .0001 |
| AB | .00355603 | 1 | .00355603 | 29.3931 | .0056 |
| Residual | .00048393 | 4 | .000120982 | | Significativos |
| Total | .04694051 | 7 | | | A, B y AB |

Modelo: $y_T = 1/(y)^5 = .21385 - .0313255A - .0661913B + .02108325AB$

Se nota claramente que tanto A, B y AB son significativos al 1%, concluyendo que tiene la perspectiva de ser mejor modelo haciendo la transformación de la variable respuesta. Si bajo las condiciones de este modelo se hace el análisis de distancias residuales se observa mejor ajuste.

S = .010999181 **S/(n)⁵ = .003888798**

| Factores | | | Valor | Estimado | R | Residuo RS | $T_{\alpha/2,7}$ | Decisión |
|----------|----|----|------------|-------------|------------|--------------|------------------|----------------|
| A | B | C | Exp. | Mod. A,B,AB | Residuo | Studentizado | 0.01 | Ptos. Atipicos |
| -1 | -1 | -1 | 0.33601346 | 0.33245005 | .00356341 | .916326844 | 3.499481 | |
| 1 | -1 | -1 | 0.23904572 | 0.22763255 | .01141317 | 2.934883735 | 3.499481 | |
| -1 | 1 | -1 | 0.1604783 | 0.15790095 | .00257735 | .662762632 | 3.499481 | |
| 1 | 1 | -1 | 0.14702703 | 0.13741645 | .00961058 | 2.471349759 | 3.499481 | |
| -1 | -1 | 1 | 0.32888687 | 0.33245005 | -.00356318 | -.916267700 | 3.499481 | |
| 1 | -1 | 1 | 0.21621938 | 0.22763255 | -.01141317 | -2.934883735 | 3.499481 | |
| -1 | 1 | 1 | 0.1553237 | 0.15790095 | -.00257725 | -.662736917 | 3.499481 | |
| 1 | 1 | 1 | 0.12780662 | 0.13741645 | -.00960983 | -2.471156897 | 3.499481 | |

Nota final al ejemplo 1.5.1, la intención del profesor Gastelum al presentar ante el AMIDIQ esta investigación, fue la de incentivar a los Docentes e Investigadores al mayor uso de las herramientas de la calidad. Sin embargo, si esta información fuera utilizada para situaciones predictivas del comportamiento del copolímero estireno – butadieno estudiado, se recomienda preferentemente el uso del modelo que contiene los efectos A, B y AB con la variable respuesta transformada.

Opción 3: Mediante generación de fracciones de factoriales completos, que serán tratados en la siguiente subsección 1.5.2. Es posible separar en etapas la experimentación, en donde la primera etapa son experimentos de búsqueda y escrutinio. Estos experimentos factoriales de escrutinio generalmente consideran gran cantidad de factores con el fin de identificar aquellos que tengan efectos importantes (los pocos que son significativos de los muchos posibles). Los factores que se identifican como importantes se investigan con mayor detalle en experimentos posteriores. Esta opción tiene como consecuencias que las diferentes etapas utilizadas en la experimentación pueden proyectarse a diseños más completos en el subconjunto de factores significativos (screening designs), a su vez, es posible combinar las corridas de 2 o más factoriales fraccionados para integrar de manera secuencial un diseño más grande y estimar los efectos de los factores e interacciones de interés.