



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS**

**“CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD EN EL NIVEL DE AZUFRE DE LA  
GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS”**

**T E S I S:**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MATEMÁTICO**

**P R E S E N T A :**

**ALMA ROSA CALIXTRO GUERRERO**

**ASESOR DE TESIS:**

**DR. JOSÉ ARMANDO DE LEÓN SOLÓRZANO**



**MÉXICO D. F.**

**OCTUBRE DEL 2007**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Primeramente a Dios y a la Virgen de Guadalupe por haberme dado fortaleza para llegar hasta aquí guiándome siempre por el camino de la felicidad.*

*A mi familia:*

*A mi mamá Trinidad, a mi papá Armando y a mi hermanito Ricardo por siempre apoyarme y confiar en mí, que a pesar de todos los obstáculos que se nos han presentado juntos hemos salido adelante y que por el amor que existe entre nosotros sé que saldremos del hoyo en el que nos encontramos...*

*Gracias por todo, ustedes son la fuerza que me impulsa, los Amo!!!*

*A la ESFM*

*Que me abrió las puertas y me ayudo en la formación, tanto académica como personalmente. Gracias a mis maestros por siempre apoyarme y tener en ellos un respaldo para continuar de pie.*

*A PEMEX*

*Y a las personas de esta institución que me brindaron apoyo para realizar éste trabajo, en especial al Dr. Leonel González Cruz que en cada momento que estuvo conmigo solo se preocupó por transmitirme los conocimientos que a lo largo de su vida y carrera profesional ha adquirido, siempre mostrando esa humildad que lo caracteriza y así mismo permitiéndome adquirir nuevas experiencias; de igual forma al Ing. Alfonso Partida Longoria que siempre trato de impulsarme con sus valiosos consejos y sabias palabras de aliento.*

*A Chris*

*Por siempre estar a mi lado, apoyándome, aconsejándome y en algunas ocasiones regañándome para hacerme ver los errores que cometo. Gracias por ayudarme siempre a cumplir mis metas y permitirme ser parte de tu vida.*

*A mi siempre mejor amiga: Sandra*

*Por su sincera y cariñosa amistad, por el apoyo, consejos y jalones de orejas que en momentos importantes de mi vida necesite, gracias por haberme permitido ser tu amiga y que juntas hayamos compartido grandes experiencias inolvidables, te quiero mucho Sandy.*

*A todos los compañeros que estuvieron a lo largo de mi carrera, mucho o poco, todos aprendimos algo de cada uno y quiero que sepan que siempre he valorado la amistad y ayuda que me han brindado.*

*Se preguntaran porque no menciono nombres, pero recuerden que la lista es un poco larga y tal vez no me alcancen las páginas para plasmar los nombres de las personas que tanto apoyo me han dado, pero creo que cada uno sabe que en mí tiene a una amiga, gracias por todo!*

# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Problemática

Objetivo

Hipótesis

Metodología

## CAPÍTULO I. LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS.....1

|   |    |
|---|----|
| 1.1 GASOLINA.....   | 2  |
| 1.1.1 ¿Qué es?.....   | 2  |
| 1.2 COMPONENTES DE LA GASOLINA.....                               | 2  |
| 1.2.1 El Azufre de la gasolina.....                               | 3  |
| 1.2.1.1 Hidrotratamiento.....                                     | 4  |
| 1.2.1.2 Recuperación de azufre (Tratamiento de gases ácidos)..... | 5  |
| 1.2.1.3 Contenido de azufre, % en peso.....                       | 6  |
| 1.2.1.4 Efectos del Azufre sobre la salud.....                    | 6  |
| 1.2.1.5 Efectos ambientales del Azufre.....                       | 6  |
| 1.2.2 Aromáticos en la gasolina.....                              | 7  |
| 1.2.2.1 El benceno.....   | 7  |
| 1.3 COMPONENTES QUÍMICOS DE LA GASOLINA.....                      | 8  |
| 1.4 ESPECIFICACIONES DE LA GASOLINA.....                          | 9  |
| 1.4.1 Propiedades de la Gasolina.....                             | 9  |
| 1.4.1.1 La volatilidad.....                                       | 11 |
| 1.4.1.1.1 La Prueba de Relación Vapor/Líquido.....                | 12 |
| 1.4.1.1.2 La Prueba de Presión de Vapor.....                      | 12 |
| 1.4.1.1.3 La Prueba de Destilación.....                           | 12 |
| 1.4.1.2 Contenido de azufre.....                                  | 13 |
| 1.4.1.3 Octanaje de la gasolina.....                              | 13 |
| 1.4.1.3.1 ¿Qué es el Número de Octano?.....                       | 14 |
| 1.4.1.3.2 ¿Cómo se determina el Número de Octano?.....            | 15 |
| 1.4.1.3.3 ¿Cuántos Números de Octano existen?.....                | 15 |
| 1.4.1.4 Curva de destilación.....                                 | 16 |
| 1.5 PROCESOS PARA OBTENER LA GASOLINA EN LA REFINERÍA.....        | 17 |
| 1.6 ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE LA GASOLINA.....                 | 20 |
| 1.7 ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA GASOLINA.....       | 27 |

## CAPÍTULO II. CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO (CEP).....28

|   |    |
|---|----|
| 2.1 CONTROL DE CALIDAD.....   | 28 |
| 2.2 CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD.....                                 | 30 |
| 2.3 CONTROL ESTADÍSTICO.....  | 31 |
| 2.3.1 Prevención en vez de detección.....                               | 31 |
| 2.3.2 Fenómenos de Variación.....                                       | 32 |
| 2.3.2.1 Patrones de variación.....                                      | 34 |
| 2.4 GRÁFICAS DE CONTROL.....  | 37 |
| 2.4.1 Características Generales de las Gráficas de Control.....         | 38 |
| 2.4.1.1 Los Límites de control.....                                     | 38 |
| 2.4.1.2 Tipos de Gráficas de Control y Características Principales..... | 39 |
| 2.4.1.2.1 Elección del tipo de diagramas de control.....                | 41 |
| 2.4.1.2.2 Gráfica de medidas y desviaciones estándar.....               | 42 |
| 2.4.1.2.3 Gráficas de medianas y rangos.....                            | 42 |
| 2.4.1.2.4 Gráfica de control por atributos.....                         | 42 |
| 2.4.1.2.5 Gráficas de variables.....                                    | 43 |
| 2.4.1.2.5.1 Gráfica de Control $\bar{X}$ -R.....                        | 44 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.4.1.2.5.2 Límites de control carta $\bar{X}$ .....   | 45         |
| 2.4.1.2.5.3 Interpretación de los límites de control en una carta $\bar{X}$ .....                                    | 46         |
| 2.4.1.2.5.4 Límites de control carta R.....  | 47         |
| 2.4.1.2.5.5 Interpretación de los límites de control en una carta R.....   | 48         |
| 2.4.1.2.5.6 Carta de Control $\bar{X}$ -S.....   | 48         |
| 2.4.1.2.5.7 Límites de control de la carta S.....  | 48         |
| 2.4.1.2.5.8 Interpretación de los límites de control en una carta S.....   | 49         |
| 2.4.1.2.5.9 Carta de Individuales X.....   | 49         |
| 2.4.1.2.5.10 Interpretación de las cartas de control y causas de inestabilidad.....                                  | 50         |
| 2.10.1.2.5.11 Índice de Inestabilidad, St.....   | 55         |
| <b>2.5 CAPACIDAD DEL PROCESO.....</b>  | <b>56</b>  |
| 2.5.1 Habilidad de Procesos.....   | 57         |
| 2.5.1.1 Teorema de Tchebysheff.....  | 57         |
| 2.5.1.2 Teorema del Límite Central.....  | 57         |
| 2.5.2 Índice de Capacidad de Proceso.....  | 58         |
| 2.5.2.1 Valores de Cp y su interpretación.....   | 59         |
| 2.5.2.2 Índice $C_r$ .....   | 59         |
| 2.5.2.3 Índices $C_{pk}$ , $C_{pi}$ , $C_{ps}$ .....   | 60         |
| 2.5.2.4 Índices $C_{pm}$ (Índice de Taguchi).....  | 60         |
| 2.5.2.5 Índices de Capacidad de Largo Plazo: $P_p$ y $P_{pk}$ .....  | 61         |
| <b>CAPÍTULO III. USO DE MINITAB EN EL CEP.....</b>   | <b>63</b>  |
| 3.1 PANTALLA PRINCIPAL DE MINITAB.....   | 64         |
| 3.2 INTRODUCIR DATOS.....  | 65         |
| 3.2.1 Cómo abrir, guardar y cerrar una tabla de datos (worksheet).....   | 65         |
| 3.2.2 Cómo abrir, guardar y cerrar un proyecto.....  | 65         |
| 3.2.3 Para salir del programa.....   | 65         |
| 3.3 ESTUDIOS DE CAPACIDAD DEL PROCESO PARA VARIABLES QUE SIGUEN UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL.....                         | 66         |
| 3.4 GRÁFICOS DE CONTROL PARA VARIABLES MEDIAS Y RANGOS.....  | 68         |
| <b>CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE.....</b>   | <b>71</b>  |
| 4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS..... | 71         |
| 4.1.1 Equipo, material y reactivos.....  | 73         |
| 4.1.2 Preparación de la muestra.....   | 76         |
| 4.1.3 Recolección de datos.....  | 77         |
| <b>CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>              | <b>79</b>  |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>   | <b>100</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>102</b> |
| <b>APÉNDICE.....</b>   | <b>105</b> |

# INTRODUCCIÓN

---

## ANTECEDENTES

*Mejoramiento de la calidad del aire durante los 90's*

La contaminación del aire ha sido uno de los retos ambientales más serios que han enfrentado los habitantes de la ZRP (Zona Resto del País), a partir de la segunda parte del siglo XX. Los primeros indicios del problema fueron identificados por investigadores universitarios a principios de la década de los sesenta. En ese entonces y en la década de los setenta se realizaron algunos esfuerzos aislados para medir los niveles de contaminación y se crearon las primeras instituciones y leyes ambientales del país.

A partir de 1986 se inicia el registro sistemático de los niveles de contaminación, con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

Las 21 Acciones para Reducir la Contaminación del Aire y las 100 Medidas Necesarias puestas en marcha en 1986 y 1987, respectivamente, dieron origen a esfuerzos importantes, entre los que destacaron el inicio de la sustitución de combustóleo con alto contenido de azufre por gas natural en las termoeléctricas y la reducción del contenido de plomo en la gasolina. Surgió el Programa *Un Día sin Auto*, una iniciativa voluntaria que más tarde se transformaría en el Programa *Hoy No Circula* en forma obligatoria.

En octubre de 1990, se acordó la instrumentación del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México (PICCA). Los esfuerzos del PICCA se dirigieron a la reducción de las emisiones de plomo, bióxido de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, así como de las partículas generadas por la destrucción de bosques, erosión de zonas deforestadas, tiraderos clandestinos y calles sin pavimentar.

Para ello, las estrategias del PICCA se concentraron en:

- a) El mejoramiento de la calidad de los combustibles,
- b) La reducción de emisiones en vehículos automotores,
- c) La modernización tecnológica y el control de emisiones en industrias y servicios.
- d) La restauración ecológica de las áreas boscosas que circundan al Valle de México.

Algunos de los logros más relevantes fueron la introducción de convertidores catalíticos de dos vías en los vehículos nuevos a partir del modelo 1991, a la par que se introdujo el suministro de gasolina sin plomo. También se restringió el contenido de compuestos reactivos y tóxicos en la gasolina, se inició la comercialización, en 1993, de un diesel de bajo azufre (0.05 % en peso) y se establecieron normas vehiculares que propiciaron la introducción de convertidores catalíticos de tres vías en los nuevos vehículos a gasolina. Por otro lado, se completó la sustitución de combustóleo por gas natural en las termoeléctricas y principales industrias del Valle de México en 1992 y se

instrumentaron medidas para controlar las emisiones evaporativas en las terminales de distribución de las gasolinas. Una de las medidas de mayor resonancia fue el cierre definitivo de la Refinería 18 de Marzo en Azcapotzalco. Con las medidas del PICCA se lograron mejoras sustanciales en la calidad del aire, principalmente respecto al plomo y al bióxido de azufre. Desde 1992 se logró que la concentración de estos contaminantes se mantuviera por debajo de la norma y que el monóxido de carbono solo rebasa la norma en un porcentaje reducido de días.

En 1996, la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, la Secretaría de Salud, el Gobierno del Estado de México y el entonces Departamento del Distrito Federal acordaron la instrumentación del *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000*, conocido como PROAIRE, con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad a las medidas iniciadas a principios de la década. El objetivo del PROAIRE estuvo enfocado explícitamente a la reducción de las concentraciones pico y promedio de ozono, con la finalidad de disminuir el riesgo a la salud asociado con la exposición de corto y largo plazo a este contaminante. Para tal fin, y dado que el ozono es un contaminante que se forma en la atmósfera a partir de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, las medidas implementadas fueron dirigidas a la reducción de las emisiones de estos contaminantes

Las líneas estratégicas del PROAIRE fueron:

- a)** Reducción de emisiones en la industria (industria limpia),
- b)** Disminución de emisiones por kilómetro en vehículos automotores (vehículos limpios),
- c)** Reducción de las tasas de crecimiento de los kilometrajes recorridos en vehículos automotores (nuevo orden urbano y transporte limpio), y
- d)** Reducción de la erosión del suelo (recuperación ecológica).

Con el PROAIRE se continuaron los esfuerzos para introducir tecnologías automotrices de menores emisiones contaminantes y se realizaron mejoras a las gasolinas, combustibles industriales y domésticos, destacando: la eliminación del Tetraetilo de Plomo (TEP) en la formulación de las gasolinas, incorporando un compuesto oxigenante, éter metil terbutílico (MTBE), y el establecimiento de valores máximos más estrictos para el contenido de aromáticos, olefinas y benceno; la disminución del contenido de azufre y aromáticos en el diesel automotriz; la disminución del contenido de azufre en el combustible industrial y la sustitución del combustóleo ligero por el gasóleo industrial cuyo contenido de azufre es menor.

Como resultado de estos programas, a lo largo de la década de los noventa se registró un avance en la reducción y contención de los niveles de contaminación atmosférica en la ZRP, a pesar del continuo crecimiento de la población, del número de vehículos y del ritmo de actividad de esta zona. De esta forma, las concentraciones de plomo en el aire se redujeron en más de un 99% en comparación con los niveles que prevalecían en 1988; los niveles de bióxido de azufre son ahora muy bajos comparados con la norma; los niveles de monóxido de carbono se han reducido significativamente, aunque aún constituyen un riesgo a la salud en las zonas de mayor tránsito vehicular; y los

niveles de ozono dejaron de aumentar en contraste con la tendencia que mantenían a principios de la década de los noventa.

A partir de esos elementos se definieron los objetivos de mejoramiento de la calidad del aire y las estrategias de control dirigidas a los diversos sectores que generan las emisiones de contaminantes.

## **PROBLEMÁTICA**

Dentro de la problemática de la calidad del aire atribuible a las emisiones de escape de los vehículos automotores, uno de los factores clave es el nivel de azufre en las gasolinas, tema que es de gran trascendencia para la industria automotriz y de la refinación.

Por su parte, en la industria de la refinación la problemática en torno al azufre tiene dos aspectos fundamentales:

- El primero y más importante es la característica del crudo del que dispone para su procesamiento en la obtención de gasolinas, ya que el contenido de azufre en cada tipo de crudo es diferente.
- En segundo término, el tema influye en la tecnología de refinación en lo que respecta a la infraestructura en procesos de eliminación de azufre (hidrotratamiento, hidrosulfuración) y su repercusión en los demás procesos (catalítico, reformación, alquilación e isomeración) involucrados en conformación del pool de gasolinas.

Es esencial que todo el mundo mantenga adecuadamente el motor de su auto y el equipo de control de contaminación para reducir emisiones excesivas de los vehículos de motor. Con ese fin, la Ley de Aire Limpio requiere que las áreas con problemas de contaminación del aire tengan programas de inspección y mantenimiento (I/M).

La Ley de Aire Limpio adopta un método global para reducir la contaminación proveniente de los vehículos de motor al requerir que los fabricantes manufacturen autos, camiones y autobuses más limpios, que hagan disponibles combustibles más limpios y el que se participe en programas de inspección y mantenimiento.

La gasolina ha sido formulada para reducir de manera significativa las emisiones vehiculares de contaminantes del aire tanto tóxicos como los que forman ozono. La Ley de Aire Limpio requiere el uso de gasolina reformulada en importantes zonas metropolitanas, aquellas con los peores problemas con ozono cerca del nivel de suelo.

A partir del 2004, límites más restrictivos para el azufre en la gasolina redujeron los niveles de azufre en el aire aproximadamente un 90 por ciento. El azufre en la gasolina inhibe la capacidad del convertidor catalítico del vehículo de limpiar los gases de escape de manera efectiva. Los nuevos y más avanzados sistemas de control de emisiones en los vehículos son aun más sensibles al azufre, de manera que la reducción del azufre en la gasolina asegurará que el aparato de control de emisiones en el vehículo pueda reducir la contaminación adecuadamente. Además de ser un beneficio para vehículos nuevos, gasolina

con menos azufre también resultará en emisiones más bajas en los autos que están actualmente en las carreteras. Combustible con menos azufre también reducirá las emisiones y formación de partículas finas.

## **OBJETIVO**

Verificar que el nivel de Azufre en la gasolina Magna resto del país cumpla con las especificaciones establecidas por la norma NOM-086-ECOL-2006, basándonos en el Método de Prueba ASTM D-4294, aplicando Control Estadístico del Proceso: Gráficas de Control.

### **Objetivos particulares**

El análisis de este tema puede fundamentarse en las necesidades de la industria automotriz. Hay un gran número de estudios relativos al efecto de azufre sobre la eficiencia de los convertidores catalíticos con cada uno de los principales contaminantes (HC, CO, NO<sub>x</sub>, ozono, etc.), y tomando como referencia los límites superior de 1000 ppm e inferior de 20 ppm de azufre.

## **HIPÓTESIS**

El exceso de azufre en la gasolina provoca que ésta no sea de la calidad deseada por el cliente y de principio no sea aceptada por las instituciones encargadas de verificar que se cumplan con las normas ambientales (Certificadoras).

Podemos analizar el contenido de azufre en la gasolina utilizando una de las siete herramientas estadísticas: gráficas de control y partiendo que la gasolina elaborada por PEMEX es de buena calidad, en particular, que el contenido de azufre esta dentro del rango establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-086.

## **METODOLOGÍA**

La metodología presentada servirá de marco estructural para que se pueda aplicar de manera exitosa el Control Estadístico de los Procesos.

En particular, nuestra herramienta de apoyo para este trabajo serán las Gráficas de Control.

# CAPÍTULO I.

## LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS

**E**n 1895, con la aparición de los nuevos automóviles, inició el consumo de gasolina, combustible que en los años posteriores se consumiría en grandes cantidades. En vísperas de la Primera Guerra Mundial, antes de 1914, ya existían en el mundo más de 1 millón de vehículos que usaban gasolina.

La verdadera proliferación de los automóviles se inició cuando Henry Ford lanzó en 1922 su famoso modelo "T". Lógicamente el consumo de petróleo crudo para satisfacer la demanda de gasolina ha crecido en la misma proporción que el crecimiento de producción de los automóviles.

A principios del siglo pasado, la obtención de la gasolina de calidad era cuestión de suerte. La naturaleza proporcionaba los ingredientes, casi siempre parafinas (hidrocarburos cíclicos y lineales), pero diluidos con otros componentes contenidos en el petróleo crudo.

En la actualidad la gasolina es un producto elaborado por el hombre:

1. Los crudos contienen de 25 a 30% de gasolina directa con índices de octano entre 40 y 60, los cuales son demasiado bajos para usarse en los motores de combustión interna. Este bajo número de octano de la gasolina directa se debe a la estructura molecular de los hidrocarburos que la constituyen.
2. La cantidad de gasolina directa contenida en los crudos es insuficiente para satisfacer la gran demanda provocada por los cientos de millones de automóviles que circulan diariamente por las calles y carreteras del mundo entero.

## 1.1 GASOLINA

### 1.1.1 ¿Qué es?

La gasolina automotriz es una mezcla de cadenas de hidrocarburos de cinco a nueve átomos de carbono, de relativa volatilidad, con o sin pequeñas cantidades de aditivos, los cuales están mezclados para formar un combustible conveniente para uso en motores automotrices de combustión interna.

Los tipos de gasolina más comunes son:

- ❖ Gasolina Magna resto del País
- ❖ Gasolina Magna de la Zona Metropolitana del Valle de México
- ❖ Gasolina Zona Fronteriza Norte
- ❖ Gasolina Premium
- ❖ Gasolina UBA (Ultra Bajo Azufre)

## 1.2 COMPONENTES DE LA GASOLINA

La gasolina está compuesta por una mezcla de hidrocarburos parafínicos, isoparafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos, que principalmente contienen moléculas con cadenas de cinco a nueve carbonos, obtenidos de diversos procesos de refinación como destilación, craqueo térmico y catalítico, reformación catalítica, alquilación, e isomerización.

Principales gasolinas que existen en nuestro país y su composición así como las diferencias en precio y beneficio al ambiente y automóvil.

En México se comercializan dos tipos de gasolinas automotrices: PEMEX Magna y PEMEX Premium. Básicamente se componen de una mezcla de hidrocarburos conteniendo moléculas con cadenas de 5 a 9 carbonos. Obtenidas de la destilación directa, de craqueo térmico y catalítico, de reformación catalítica, de alquilación, de isomerización y de refinados de la separación extractiva del benceno y tolueno.

Adicionalmente, pasa por procesos de mejoramiento de sus características, así como de eliminación de compuestos contaminantes como el azufre.

El mayor octanaje en las gasolinas PEMEX Magna y PEMEX Premium permite su combustión sin causar detonación en los motores de los automóviles, previniendo su desgaste prematuro, principalmente en los de alta compresión. Asimismo, son de una mayor calidad ecológica, ya que no contienen plomo, elemento altamente contaminante al ambiente y perjudicial para el ser humano; a la vez, el menor contenido de azufre disminuye la emisión a la atmósfera de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), principal causante de la lluvia ácida.

Algunos de los componentes de la gasolina son: Azufre, MTBE, Aromáticos, Níquel, Vanadio, Nitrógeno, etc.

### **1.2.1 El Azufre de la gasolina**

Si la cantidad de Azufre sobrepasa la norma establecida, la gasolina puede tener efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y de los tubos de escape o muflas. También se relaciona con efectos nocivos sobre el ambiente, siendo un factor importante en la producción de lluvia ácida.

Además de llevar a mayores emisiones de particulado y SO<sub>x</sub>, el azufre impide el rendimiento de los convertidores catalíticos en los automóviles, los cuales son usados para reducir las emisiones del tubo de escape. En general, si se usan convertidores catalíticos, los niveles de azufre debieran ser constreñidos a 500 ppm máximo; reducir estos niveles a cerca de cero va a mejorar todavía más el rendimiento del catalizador.

La situación es aún más crítica para los vehículos con catalizador avanzado de baja contaminación. El funcionamiento usando gasolina convencional típica norteamericana que contiene 330 ppm azufre va a aumentar las emisiones de NO<sub>x</sub> y VOC de escapes de los vehículos norteamericanos nuevos actuales y futuros (en promedio) en cerca de 40% y cerca de 150%, respectivamente, relativo a sus emisiones con combustible que contenga más o menos 30 ppm azufre.

Un estudio reciente (Sulfur - The Lead of the New Century: The Need For and Benefits of Reducing Sulfur in Gasoline & Diesel Fuel, Katherine O. Blumberg, Michael P. Walsh , Charlotte Pera) evaluó el impacto de los niveles de azufre en las gasolinas sobre las emisiones y sus principales resultados se resumen más abajo.

Los niveles de azufre en la gasolina se relacionan sólo a las emisiones directas de SO<sub>2</sub> en los vehículos a gasolinas que no tienen equipos de control de emisiones funcionando. La mayoría de los vehículos a gasolina actualmente en uso, sin embargo, incluso en muchos países latinoamericanos, están equipados con catalizadores para el control de CO, HC, y NO<sub>x</sub>, los cuales son impactados por niveles de azufre en el combustible. El impacto del azufre aumenta en cuanto a su severidad a medida que los vehículos son diseñados para cumplir con estándares más estrictos. Los niveles de azufre actuales en el combustible son el primer obstáculo cuando se trata de introducir tecnologías de control de emisiones avanzadas al mercado, tecnologías que van a reducir espectacularmente los contaminantes convencionales y también van a posibilitar diseños de motor con mayor eficiencia en su combustible.

Los mayores objetos de preocupación en cuanto a los niveles de azufre en la gasolina incluyen:

- El azufre aumenta las emisiones de los catalizadores de tres vías, el tipo más común de tecnologías de control de emisiones en los vehículos a gasolina.
- El negativo impacto de azufre aumenta con controles catalíticos avanzados y más eficientes.
- Los niveles actuales de azufre presentan una barrera importante a la introducción de más diseños de motor de gasolina eficiente, los cuales requerirán avanzadas tecnologías de control de emisiones que sean severamente impactadas por el azufre.
- Los altos niveles de azufre contribuyen al alza de emisiones de particulado.

### **1.2.1.1 Hidrotratamiento**

La mayoría de las corrientes de los productos intermedios que vienen de la unidad de Destilación de Crudo contienen niveles de azufre que exceden las especificaciones de los productos finales y/o las especificaciones de los catalizadores en unidades de procesos subsecuentes. El Hidrotratamiento es el proceso más comúnmente utilizado para remover el azufre de corrientes intermedias, además de que se pueden remover algunos metales como níquel y vanadio. Los equipos de este proceso pueden ser diseñados para procesar continuamente una alimentación de hidrocarburos en particular, o pueden procesar diferentes corrientes de alimentación.

El Hidrotratamiento es un proceso en el cual el gas hidrógeno se mezcla con la corriente de hidrocarburos que se va a tratar y se introducen en un reactor que contiene varias camas de catalizador. La eliminación de Azufre, como la practican las refinerías de petróleo, puede tomar la forma de eliminación química (tratamiento con ácido o “endulzamiento”), concentración en productos de la refinería (coque con alto contenido de azufre) o hidrodeshulfuración. Es importante revisar porque se emplea la hidrodeshulfuración para eliminar compuestos de azufre de aceites crudos o fracciones de petróleo.

Esta eliminación se practica en las refinerías de petróleo debido a que los compuestos de azufre:

- 1) Hacen disminuir la calidad de los productos refinados.
- 2) Contaminan la atmósfera en forma de óxidos de azufre cuando se les quema.
- 3) Corroen el equipo de procesamiento de la refinería y
- 4) Envenenan los catalizadores empleados en algunos procesos.

Las reacciones de hidrodeshulfuración (HDS) se llevan a cabo a una temperatura y presión elevadas, y además son exotérmicas, por lo que es necesario enfriar constantemente la corriente de hidrocarburos a lo largo del reactor para que el soporte del catalizador no pierda su estructura cristalina y se desactive debido a las altas temperaturas. El catalizador es un sólido que

consiste en una base de alúmina impregnada con óxidos de metales. Tiene forma de pequeños pellets (diámetro de 1/8 in por menos de 1 in de longitud), generalmente en forma de cilindros para maximizar el área efectiva de contacto entre los reactivos. En las reacciones HDS, los óxidos metálicos más comunes que se impregnan en el catalizador son de cobalto y molibdeno.

Las reacciones HDS ocurrirán más rápidamente mientras mayor sea la temperatura y presión del reactor (lo que provoca un incremento en la presión parcial del hidrógeno) y mayor sea el volumen de catalizador con respecto al volumen de hidrocarburos que serán tratados. Para un crudo dado, comparando dos fracciones de diferentes puntos de ebullición, la fracción de un mayor rango de punto de ebullición generalmente contiene mayor concentración de azufre y nitrógeno. Además, el azufre y el nitrógeno se remueven más fácilmente de los compuestos de menor punto de ebullición. Como resultado, la severidad del reactor se debe incrementar entre mayor sea el rango de ebullición de la fracción.

### **1.2.1.2 Recuperación de azufre (Tratamiento de gases ácidos)**

El ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) es un gas altamente tóxico que puede estar contenido en el crudo y también se produce en el proceso de Hidrotratamiento. El simple quemado de  $H_2S$  como componente de combustible se evita por seguridad y consideraciones ambientales porque se produce dióxido de azufre ( $SO_2$ ), que también es tóxico. En cualquier proceso en que se manejan concentraciones de  $H_2S$  arriba de 50 ppm, se lleva acabo una operación con amina (usualmente con una solución acuosa de monoetilendiamina o dietanolamina) en la que después se regenera la amina aplicando calor para extraer el  $H_2S$  en una corriente de gas concentrado al que nos referimos como gas ácido.

El proceso de Conversión de Azufre toma la corriente de gas ácido y convierte el  $H_2S$  en productos benignos de azufre y agua. Dicho proceso, que se utiliza en la mayoría de las refinerías modernas es una variante del proceso inventado por Claus en el siglo XIX, llamado "Proceso Claus". En general, como se puede apreciar en la figura, el proceso Claus consiste en la combustión de un tercio de  $H_2S$  a dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y después reacciona el  $SO_2$  con el  $H_2S$  remanente en presencia de un catalizador de cobalto molibdeno en una cama fija de alúmina activada para formar azufre elemental.

Existen diferentes configuraciones de esta planta para alcanzar la relación 2:1 de ácido sulfhídrico y dióxido de azufre en los reactores de conversión. En la configuración de flujo dividido, se lleva acabo una combustión completa de una tercera parte de la corriente de gas ácido, y los productos de la combustión después se combinan con el gas ácido que no se hizo reaccionar. En la configuración de un solo paso, se lleva acabo una combustión parcial de la corriente del gas ácido suministrado sólo el oxígeno necesario para quemar la tercera parte del gas ácido. Dependiendo de la conversión total requerida del  $H_2S$ , se emplean dos o, en la mayoría de los casos tres etapas de conversión. En cada etapa adicional se alcanza una conversión cada vez menor que en la etapa anterior. En un proceso tipo Claus se puede alcanzar una conversión del  $H_2S$  a azufre elemental 96-97%.

Finalmente, para cubrir los estándares de calidad de aire, se puede llevar a cabo un Tratamiento de Gases de cola para remover esencialmente todo el  $H_2S$  remanente en los gases de cola provenientes del proceso de Conversión

de Azufre. El Tratamiento de Gases de cola emplea una solución patentada para absorber el H<sub>2</sub>S y convertirlo en azufre elemental.

### **1.2.1.3 Contenido de azufre, % en peso**

El contenido de azufre es una de las propiedades que tiene mayor influencia en el valor de crudo del petróleo. El contenido de azufre se expresa en % en peso de azufre o ppm (partes por millón). Aunque el término de crudo amargo hacia referencia inicialmente a los crudos que contenían H<sub>2</sub>S disuelto independientemente del contenido total de azufre, también puede referirse a cualquier crudo de petróleo con un contenido de azufre suficientemente alto. No existe una línea divisoria clara entre los crudos amargos y dulces, pero el contenido de azufre del 0.5% se utiliza como criterio frecuentemente.

### **1.2.1.4 Efectos del Azufre sobre la salud**

El azufre se puede encontrar frecuentemente en la naturaleza en forma de sulfuros. Durante diversos procesos se añaden al medio ambiente enlaces de azufre dañinos para los animales y los hombres. Estos enlaces de azufre dañinos también se forman en la naturaleza durante diversas reacciones, sobre todo cuando se han añadido sustancias que no están presentes de forma natural. Los compuestos del azufre presentan un olor desagradable y a menudo son altamente tóxicos. En general las sustancias sulfuradas pueden tener los siguientes efectos en la salud humana:

- Efectos neurológicos y cambios de comportamiento
- Alteración de la circulación sanguínea
- Daños cardiacos
- Efectos en los ojos y en la vista
- Fallos reproductores
- Daños al sistema inmunitario
- Desórdenes estomacales y gastrointestinales
- Daños en las funciones del hígado y los riñones
- Defectos en la audición
- Alteraciones del metabolismo hormonal
- Efectos dermatológicos
- Asfixia y embolia pulmonar

### **1.2.1.5 Efectos ambientales del Azufre**

El azufre puede encontrarse en el aire en varias formas diferentes. Puede provocar irritaciones en los ojos y garganta de los animales, cuando la toma tiene lugar a través de la inhalación del azufre en su fase gaseosa. El azufre se aplica extensivamente en las industrias y es emitido al aire, debido a las limitadas posibilidades de destrucción de los enlaces de azufre que se aplican. Los efectos dañinos del azufre en los animales son principalmente daños cerebrales, a través de un malfuncionamiento del hipotálamo, y perjudicar el sistema nervioso.

Pruebas de laboratorio con animales de prueba han indicado que el azufre puede causar graves daños vasculares en las venas del cerebro, corazón y riñones. Estos tests también han indicado que ciertas formas del azufre pueden

causar daños fetales y efectos congénitos. Las madres pueden incluso transmitirles envenenamiento por azufre a sus hijos a través de la leche materna.

## 1.2.2 AROMÁTICOS EN LA GASOLINA

### Compuestos Aromáticos

Son sistemas clínicos que poseen una gran energía de resonancia y en los que todos los átomos del anillo forman parte de un sistema conjugado único (conjugación clínicamente cerrada).

Los aromáticos dan gasolinas de buen valor octánico, indeseables para producir aceites.

Uno de los compuestos aromáticos es:

#### 1.2.2.1 El benceno

Conocido también como bencol, es un líquido incoloro de olor dulce. El benceno se evapora al aire rápidamente y es sólo ligeramente soluble en agua. El benceno es sumamente inflamable.

La mayoría de la gente puede empezar a detectar el olor del benceno en el aire cuando está en concentraciones de 1.5 a 4.7 partes de benceno por millón de partes de aire (ppm) y en el agua cuando la concentración es de 2 ppm. La mayoría de la gente empieza a detectar el sabor del benceno cuando está en concentraciones entre 0.5 y 4.5 ppm en el agua.

Una parte por millón equivale aproximadamente a una gota en 40 galones. El benceno se encuentra en el aire, el agua y el suelo. El benceno proviene tanto de fuentes industriales como naturales.

El benceno fue descubierto y producido a partir de alquitrán en el siglo XIX. Hoy en día, la mayoría del benceno se produce a partir del petróleo.

Las fuentes naturales de benceno, entre las que se incluyen los gases emitidos por volcanes y los incendios forestales, también contribuyen a la presencia de benceno en el medio ambiente. El benceno también se encuentra en el petróleo y la gasolina y en el humo de cigarrillos.

Investigaciones realizadas han indicado que el benceno es una peligrosa sustancia cancerígena y causa una variedad de desordenes sanguíneos tales como la leucemia. En orden de peligrosidad le siguen el tolueno y el xileno; todas estas sustancias están presentes en las gasolinas sin plomo "aromáticas", en composiciones que oscilan, en el caso de Europa, entre 29 y 55% por volumen, en donde el contenido de benceno puede ser hasta de 5%. Sin embargo, aún cuando la cantidad de benceno fuese muy baja, éste puede producirse también durante la combustión a través de procesos de demetilación de otras sustancias aromáticas tales como el tolueno y el xileno; encontrados en mayor proporción.

En experimentos de carcinogenicidad en ratas, realizados por el Instituto de Oncología y Ciencias Ambientales de Bolonia, Italia; se demostró que la exposición a gasolinas con alto contenido aromático conduce a la formación de tumores generalmente malignos, especialmente tumores del útero.

La gasolina es utilizada como combustible para el funcionamiento de motores de combustión interna, por tanto la gasolina debe cubrir una amplia gama de condiciones operacionales en el motor, como las variaciones en los circuitos de carburante, temperaturas del motor, bombas de carburante y presión del carburante. De igual forma debe cubrir una variedad de climas, altitudes, y pautas de manejo.

### 1.3 COMPONENTES QUÍMICOS DE LA GASOLINA

Los hidrocarburos que componen la gasolina están comprendidos entre los que poseen 4 átomos de carbono y los que tienen 10-11 átomos de carbono (C10-C11). De las 4 clases en que se subdividen los hidrocarburos (parafínicos, nafténicos, aromáticos y olefínicos), la que predomina en el petróleo bruto es la clase de los hidrocarburos parafínicos (parafinas), que pueden ser de cadena lineal (n-parafinas) o ramificada (isoparafinas).

Se presentan a continuación: Las características de las 4 clases de hidrocarburos mencionados anteriormente:

*Las n-parafinas* poseen una resistencia a la detonación inferior a la correspondiente a las isoparafinas. De cualquier forma, las mezclas de n-parafinas e isoparafinas, presentes en el petróleo bruto en estado de equilibrio, tienen una resistencia a la detonación inferior a la necesaria para un correcto funcionamiento de los motores.

*Los hidrocarburos nafténicos* (naftenos) o cicloparafínicos tienen un poder antidetonante más elevado que las n-parafinas con el mismo número de átomos de carbono. Su concentración varía mucho de un petróleo bruto a otro, y su importancia está ligada a la relativa facilidad con que es posible transformarlos en hidrocarburos aromáticos.

*Los hidrocarburos aromáticos* se caracterizan por su elevado peso específico y por un poder antidetonante bastante elevado. Se encuentran en el petróleo bruto en cantidades limitadas, salvo algún tipo que los contiene en mayor proporción.

*Los hidrocarburos olefínicos*, caracterizados por poseer dobles enlaces carbono-carbono (ole-finis), no se encuentran normalmente en el petróleo bruto; su presencia se debe a especiales procesos de tratamiento.

Algunos ejemplos de los distintos hidrocarburos que componen a la gasolina son los siguientes:

**Butano.** Hidrocarburo ligero usado para elevar el octano e incrementar la volatilidad de la gasolina.

**Etanol.** Alcohol etílico o de grano. Se obtiene por la fermentación de diversos granos. Incrementa el octano en la gasolina. Es un carburante oxigenado y puede emplearse casi puro en los autos especialmente diseñados para su uso.

**Isobuteno.** Producto petroquímico obtenido en las refinerías que si reacciona con metanol forma éter metil terbutílico (MTBE) y con el etanol el éter etil terbutílico (ETBE), ambos son oxigenantes e incrementan el número de octano.

**Metanol.** Alcohol metílico, de madera. Se obtiene industrialmente en los procesos petroquímicos. Se emplea para incrementar el octano de la gasolina en ciertas proporciones aunque también se puede emplear puro sustituyendo la gasolina.

**Olefinas.** Componentes de la gasolina generados durante varios procesos de transformación de los hidrocarburos. Ejemplos son el etileno y el propileno. Suelen contribuir a la formación de gomas y depósitos en los sistemas de inyección.

Para obtener gasolinas con características antidetonantes idóneas a las exigencias de los motores actuales, no basta con destilar la fracción de bruto comprendida entre 30 y 200 °C, sino que hay que transformar los hidrocarburos que contiene en otros de mayor poder antidetonante. Por consiguiente, la proporción de las distintas clases de hidrocarburos que componen la gasolina depende poco de la composición del petróleo bruto y, mucho de los procesos de refinación con que son obtenidas.

## 1.4 ESPECIFICACIONES DE LA GASOLINA

Las especificaciones de las gasolinas se definen para garantizar su manejo y distribución, un buen funcionamiento en el automóvil y para prevenir el deterioro del medio ambiente, y contemplan tanto las propiedades físicas como las químicas.

### 1.4.1 PROPIEDADES DE LA GASOLINA

Entre las propiedades físicas de las gasolinas se pueden citar la densidad o peso específico y la volatilidad; y entre las químicas el octanaje, en contenido de azufre y otras características que en la actualidad se establecen con el objeto de reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Aunque existen muchas propiedades que determinan las características de una gasolina, las propiedades de la gasolina que tienen mayor efecto en el funcionamiento de los motores son: la *Volatilidad* (esta medida por la Presión de Vapor Reid (PVR), el Rango de Destilación) el *Contenido de Azufre* y el *Octanaje* (Características Antidetonantes).

Es conveniente describir cada una de estas, ya que como se había mencionado adquieren una gran importancia en el funcionamiento del motor.

La Presión de Vapor Reid (PVR) y el rango de destilación de una gasolina determinan el arranque eficiente del motor, la capacidad de aceleración, su

tendencia al sello de vapor, etc. La Presión de Vapor Reid es la presión de vapor de la gasolina a 100°F (37.78°C) en unidades absolutas.

Las características adecuadas de una gasolina con respecto a estos parámetros deben garantizar el adecuado comportamiento de la gasolina en los vehículos bajo cualquier condición climatológica, esto es, un arranque eficiente del motor tanto en climas fríos como en calientes. La **volatilidad** de una gasolina (determinada por su PVR y rango de destilación) debe ser tal que permita que ésta se vaporice adecuadamente en la cámara de combustión, a fin de lograr un mezclado efectivo de la mezcla aire-combustible, de tal forma que se obtenga el máximo aprovechamiento del combustible en el motor.

Si la gasolina es demasiado volátil, se produce en climas calientes el fenómeno denominado sello de vapor (vapor lock), impidiendo el arranque del vehículo. Por otro lado, si el combustible es demasiado pesado y no tiene la volatilidad adecuada, el motor no encenderá en climas fríos, debido a que la gasolina se mantiene en forma líquida.

Por lo tanto, la volatilidad de la gasolina deberá estar bien balanceada para garantizar una operación eficiente de los motores bajo cualquier condición climatológica. Por tal motivo, este parámetro se ajusta de acuerdo a la estacionalidad de cada región del país en cuestión.

Por otro lado el octanaje o número de octano es una medida de calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas.

Para determinar la calidad antidetonante de una gasolina, se efectúan corridas de prueba en un motor, de donde se obtienen dos parámetros diferentes:

- El Research Octane Number, RON (Número de Octano de Investigación) se obtiene mediante una corrida de prueba en una máquina operada a una velocidad de 600 revoluciones por minuto (rpm) y a una temperatura de entrada de aire de 125 °F (51.67 °C).
- El Motor Octane Number, MON (Número de Octano del Motor) se determina a una velocidad de 900 revoluciones por minuto y con una temperatura de entrada de aire de 300 °F (148.89 °C).

Para propósitos de comercialización y distribución de las gasolinas, los productores determinan el octanaje comercial como el promedio de los números de octano de investigación y el octano del motor:  $\frac{RON + MON}{2}$

La escala que se utiliza para medir el octanaje es una escala arbitraria que va de 0 al 100. Un índice de octano de 100 le corresponde al isooctano (que es poco detonante), y un índice de octano de 0 es para el n-heptano (que es muy detonante).

La prueba de determinación del octanaje de una gasolina se efectúa en un motor especial de un solo cilindro, aumentando progresivamente la compresión hasta que se manifiesten las detonaciones. Posteriormente, se hace funcionar el motor sin variar la compresión anterior, con una mezcla de isooctano y una

cantidad variable de n-heptano, que representará el octanaje o índice de octano de la gasolina para la cual se procedió la prueba y por lo tanto, tiene el mismo funcionamiento antidetonante de la mezcla de hidrocarburos.

Los principales problemas que presentan las gasolinas de bajo número de octano son: la generación de denotaciones o explosiones en el interior de las máquinas de combustión interna, aparejado esto con un mal funcionamiento y bajo rendimiento del combustible cuando el vehículo esta en movimiento, aunado a una elevada emisión de contaminantes.

#### 1.4.1.1 LA VOLATILIDAD

La gasolina se mide en forma líquida, por los inyectores del carburante (o carburador), mezclada con el aire y atomizada antes de entrar en los cilindros. Por lo tanto, es muy importante controlar la tendencia de un carburante a evaporarse con ciertas normas. La capacidad de un carburante de vaporizarse o pasar de líquido a vapor se llama volatilidad. La volatilidad es una característica primordial de la gasolina y por lo consecuente tiene efectos en el rendimiento del vehículo.

Por ejemplo:

La gasolina insuficientemente volátil acarrea pobre arranque en frío y pobre manejabilidad en calentamiento así como distribución desigual del carburante en los cilindros de los vehículos carburados. Estos carburantes también pueden contribuir a formar depósitos en el cárter y en la cámara de combustión así como en las bujías de encendido.

La gasolina demasiado volátil se vaporiza muy fácilmente y puede hervir en las bombas o líneas de carburante o en los carburadores a altas temperaturas de funcionamiento. Si se forma demasiado vapor, esto podría disminuir el flujo de carburante al motor, produciendo signos de tapón de vapor que podrían incluir pérdida de potencia, marcha irregular del motor u obstrucción completa. El consumo de carburante también podría deteriorarse y aumentar las emisiones evaporativas.

Se utilizan 3 parámetros para controlar los límites de volatilidad:

- \*Presión del vapor.
- \*Prueba destilación.
- \*Relación vapor/líquido.

La ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) da normas para procedimientos de prueba para medir estas características. Hay 6 clases de presión de vapor/destilación de gasolina denominadas AA, A, B, C, D y E. AA es la menos volátil y E la más volátil.

También hay 6 clases de protección contra tapón de vapor (volatilidad E) numeradas de 1 a 6 siendo 1 la menos volátil y 6 la más volátil.

**1.4.1.1.1 La Prueba de Relación Vapor/Líquido:**

Determina la temperatura requerida para crear una relación vapor/líquido (V/L) de 20. Para alcanzar esta relación V/L, los carburantes más volátiles requieren menores temperaturas que los menos volátiles. La relación V/L ayuda a definir la tendencia de un carburante a contribuir al tapón de vapor.

**1.4.1.1.2 La Prueba de Presión de Vapor:**

Esta prueba puede realizarse por una variedad de procedimientos de laboratorio y dispositivos de medición automatizados. Por ejemplo el procedimiento de prueba del "Método de Reid" se realiza sumergiendo una muestra de gasolina (sellada en una cámara de muestra metálica) en un baño de agua a 100°F. Los carburantes más volátiles se vaporizarán más prontamente, generando así mayor presión en el dispositivo de medición y lecturas superiores.

Los carburantes menos volátiles generarán menos vapor y, por tanto, lecturas inferiores. La medición de la presión de vapor según el método de prueba de Reid se conoce como Presión de Vapor Reid o PVR.

**1.4.1.1.3 La Prueba de Destilación:**

Se utiliza para determinar la volatilidad del carburante a través de todo el rango de ebullición de la gasolina. La gasolina se compone de una serie de elementos químicos que se evaporan a diferentes temperaturas. Los más volátiles (de vaporización más rápida) se evaporan a menores temperaturas; los menos volátiles (de vaporización más lenta) a mayores temperaturas. La proyección de estas temperaturas de evaporación resulta en la llamada curva de destilación. La especificación ASTM fija rangos de temperatura a los que se evaporarán el 10%, 50% y 90% del carburante así como la temperatura a la que se habrá evaporado todo el carburante (llamada punto final).

Cada punto afecta diferentes áreas del rendimiento del vehículo:

- \* La temperatura para 10% de evaporación debe ser lo bastante baja para facilitar el arranque en frío pero lo bastante alta para minimizar problemas de tapón de vapor/manejabilidad en caliente.
- \* La temperatura para 50% de evaporación debe ser lo bastante baja para lograr un buen calentamiento y manejabilidad en clima frío sin ser tan baja como para provocar problemas de manejabilidad caliente y tapón de vapor. Este tramo del galón también impacta en el consumo en trayectos cortos.
- \* La temperatura para 90% de evaporación y punto final debe ser lo bastante baja para minimizar los depósitos en el cárter y cámara de combustión y los problemas de bujías y de dilución del aceite del motor.

Así mismo, las características de destilación frecuentemente se alteran según la disponibilidad de componentes de gasolina.

Para garantizar a los carburantes las características de volatilidad apropiadas, los refinadores ajustan estacionalmente la gasolina, suministrando gasolina más volátil en invierno para facilitar el rendimiento en el arranque en frío y calentamiento. En verano, se produce gasolina menos volátil para minimizar los problemas de tapón de vapor y de manejabilidad en caliente y cumplir con las normas medioambientales.

También se hacen ajustes para áreas geográficas con mayores altitudes porque, a mayor altitud, se requiere menos calor para que un líquido hierva.

Estos cambios estacionales y geográficos en las normas sobre volatilidad minimizan los problemas, no los eliminan completamente. Por ejemplo, en períodos de calor excepcional en primavera y otoño, una volatilidad de gasolina adecuada para temperaturas inferiores puede presentar problemas.

#### **1.4.1.2 CONTENIDO DE AZUFRE**

Esta propiedad se encuentra altamente relacionada con la cantidad poseída de azufre (S) presente en el producto (gasolina). Dentro de la cantidad, se encuentran determinados promedios y estadísticas en la cual en producto no puede sobrepasar o resaltar, ya que si esto sucede la gasolina puede tener efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y sobre los tubos de escape. A su vez, al salir del caño de escape, esta produce un alto grado de contaminación en el ambiente, produciendo a su vez las conocidas lluvias ácidas.

#### **1.4.1.3 OCTANAJE DE LA GASOLINA**

El octanaje en la gasolina es la medida de su calidad antidetonante, es decir, su habilidad para quemarse sin causar detonación en los motores de los automóviles.

Existen tres métodos para medir esta propiedad: Número de Octano en Motor (MON), Número de Octano Investigado (RON) y Número de Octano en Marcha  $(R+M)/2$ .

El MON es tomado normalmente como una indicación de la habilidad del combustible para prevenir la detonación en motores de altas velocidades, mientras que el RON mide la tendencia de detonación a bajas velocidades. Sin embargo, el Número de Octano en Marcha es el que muestra realmente cómo se comporta el combustible en el motor de un automóvil, en cuanto a sus características de detonación.

El rendimiento y el consumo de carburante óptimos se logran cuando el AKI de un carburante es adecuado para el motor donde entra en combustión.

No hay ventaja en utilizar gasolina de un AKI superior al requerido por el motor para funcionar sin detonaciones.

El RON y MON de los carburantes se miden mediante métodos de laboratorio reconocidos de ensayo motor.

Generalmente, los resultados de estos ensayos pueden traducirse en términos de rendimiento en servicio.

En algunos vehículos, el rendimiento antidetonante de un carburante se representa mejor por el RON, mientras que en otros se asocia mejor con el MON. Pero para que exista un equilibrio, el comportamiento antidetonante de la gasolina se relaciona mejor con el promedio de los octanajes teórico y motor, o  $(R+M)/2$ .

Estos parámetros son de gran importancia para el buen funcionamiento del motor en un vehículo, pero ambos provocan inconvenientes en la gasolina:

- El RON afecta el golpeteo de baja a mediana velocidad y el reencendido o autoencendido del motor. Si el octanaje teórico es muy bajo, el conductor podría experimentar golpeteo a baja velocidad y reencendido del motor después de parado.
- El MON afecta el golpeteo a alta velocidad y por aceleración parcial. Si el octanaje motor es demasiado bajo, el conductor podría experimentar golpeteo del motor durante los periodos de aceleración en potencia por ejemplo al sobrepasar otros vehículos o al subir cuestas.

En general los problemas que representan las gasolinas de bajo número de octano es la generación de detonaciones o explosiones en el interior de las máquinas de combustión interna, aparejado esto con un mal funcionamiento y bajo rendimiento del combustible, cuando el vehículo está en movimiento, aunado a una elevada emisión de contaminantes.

Un grave inconveniente a causa de la imperfecta combustión de la gasolina, debido a la mala elaboración de esta, es la expulsión de productos molestos o nocivos para la salud humana. Este inconveniente ha sido el problema más grave que han tenido los fabricantes de motores en los últimos años, a consecuencia de las severas disposiciones legislativas y sanitarias, que imponen escrupulosos controles sobre la contaminación y sostienen rigurosas sanciones para quienes superan los límites establecidos.

En consecuencia es necesario elaborar gasolina de buena calidad, que cumpla con las especificaciones establecidas, propiedades requeridas y de igual forma cumplir con las expectativas del cliente y por lo tanto la satisfacción del mismo.

#### **1.4.1.3.1 ¿Qué es el Número de Octano?**

Un motor de combustión interna funciona adecuadamente cuando la onda de expansión iniciada por la chispa de la bujía, se mueve rápida y suavemente por la cámara de combustión.

El Número de octano es la capacidad antidetonante de una gasolina; es la propiedad que asegura la estabilidad al encendido de la gasolina, hasta el momento en que salta la chispa.

Una gasolina con un número de octano inferior al requerido por el motor, no soporta las condiciones de presión y temperatura de la cámara, autoinflamándose antes de la aparición de la chispa de la bujía, lo que origina el fenómeno de cascabeleo.

#### 1.4.1.3.2 ¿Cómo se determina el Número de Octano?

El Número de Octano se determina en un motor monocilíndrico Waukesha, que permite variar el volumen de la cámara de combustión, y con ello la relación de compresión.

Para la determinación del Número de Octano, en 1926 se creó la escala de octano, que sirve para medir la capacidad antidetonante de las gasolinas. A partir de ello, se determinó que el 100 de la escala es el 2,2,4 trimetil pentano (conocido como iso-octano); para el 0 se definió al n-heptano, hidrocarburo detonante de primer orden. Mezclando ambos hidrocarburos se producen los combustibles de referencia que podrán ser comparados con cualquier gasolina que se quiera determinar el número de octano. Por ejemplo: si se mezcla 98% de iso-octano y 2% de n-heptano, se obtiene una mezcla con número octano 98.

#### 1.4.1.3.3 ¿Cuántos Números de Octano existen?

Existen dos formas de medir el número de octano:

RON: Número de Octano de Investigación.

MON: Número de Octano Motor.

El RON se mide en condiciones de bajas revoluciones, en el momento del pique; el MON se mide con altas revoluciones, durante la aceleración en ruta.

Por lo general, las gasolinas se clasifican según su Índice Antidetonante (AKI), una medida de calidad del octano. El AKI mide la capacidad del carburante a resistir la detonación del motor (golpeteo).

El AKI de un carburante motor es el promedio entre:

- Relación de compresión
- Secuencia de encendido
- Relación aire/combustible
- Temperatura de combustión
- Entrada recalentador tubuladura de admisión
- Temperatura aire admisión
- Temperatura de enfriamiento
- Tasa de recirculación de gases de escape Diseño cámara de combustión

El octano requerido a mayores altitudes es menor debido a la disminución de la presión barométrica. La mayoría de los vehículos de modelos recientes tienen sistemas de control del motor que permiten compensar, total o parcialmente, muchas de las variables relacionadas con el octano y el octanaje requerido.

Por ejemplo, los vehículos equipados con dispositivos captadores de golpeteo permiten al sistema de control del motor adelantar o retrasar la secuencia de encendido en respuesta al golpeteo del motor.

Otros vehículos con controles electrónicos del motor utilizan un sensor barométrico para compensar el reglaje del encendido y la mezcla aire/carburante en respuesta a los cambios barométricos. El efecto de la altitud

sobre el octanaje requerido por estos vehículos de modelos más recientes es tres veces menor al de los motores no tan equipados.

Con el correr de los años se han desarrollado varios mitos sobre el octano. Hay una percepción muy difundida de que a mayor octano, mejor rendimiento. Sin embargo, una vez provisto el octano suficiente para prevenir el golpeteo del motor, la mejora del rendimiento es escasa o nula. Una excepción son los vehículos equipados con sensores de golpeteo. En estos vehículos, si el octano es insuficiente, el ordenador retardará la secuencia para limitar el golpeteo del motor. Si el vehículo funciona en modo "limitación de golpeteo" (secuencia retrasada), el uso de un carburante con mayor octanaje permitirá adelantar la secuencia, con cierta mejora en el rendimiento. No obstante, incluso en estos vehículos, las pruebas han demostrado que no hay mejora perceptible del rendimiento al utilizar un carburante de octanaje más alto que el recomendado por el fabricante del vehículo.

Otro mito dice que utilizar un carburante de mayor octanaje mejorará el consumo de carburante (más millas por galón).

Ahora bien, el octano no es más que una medida de calidad antidetonante. El consumo de carburante está determinado por numerosas variables, incluida el contenido energético del combustible.

Dos combustibles de idéntico octano pueden tener diferente contenido energético debido a diferencias en la composición.

Los consumidores sólo deben utilizar una gasolina conforme a los niveles de octano que recomienda el fabricante superior al MON. Por ejemplo, una gasolina de 87 octanos tiene, con frecuencia, un MON de 82 y un RON de 92.

La mayoría de los vehículos se comporta satisfactoriamente con carburante del octanaje recomendado. Pero en ciertos casos, el uso del carburante especificado no asegura que un vehículo marche sin golpeteo, incluso con una buena puesta a punto. Puede haber significativas diferencias entre motores, incluso de igual marca y modelo, debido a variaciones normales de producción.

La pérdida de potencia y daño a un motor de automóvil, debidos al golpeteo, generalmente, no son significativos salvo si la intensidad se hace severa. No obstante, un golpeteo fuerte y prolongado puede dañar al motor.

El golpeteo o no de un motor depende de la calidad del octano del combustible y del Octanaje Requerido (ONR) por el motor.

#### **1.4.1.4 CURVA DE DESTILACIÓN**

Esta propiedad se relaciona con la composición de la gasolina, su volatilidad y su presión de vapor. Indica la temperatura a la cual se evapora un porcentaje determinado de gasolina, tomando una muestra de referencia.

## 1.5 PROCESOS PARA OBTENER LA GASOLINA EN LA REFINERÍA

En estos procesos se llevan a cabo reacciones químicas para obtener productos de mayor valor agregado. Estas reacciones permiten *mejorar las especificaciones de calidad de los productos* re-arreglando su estructura molecular para obtener compuestos más ligeros.

Obtención de la gasolina a partir del petróleo

En forma general, la gasolina se obtiene a partir del petróleo, a través de las siguientes etapas:

- Proceso de destilación (separación física) de los componentes del petróleo, uno de los cuales es la gasolina.
- Proceso de desintegración de los componentes pesados del petróleo, para convertirlos en gasolina y gas licuado.
- Procesos que se emplean para mejorar las características de las gasolinas como el de reformación catalítica, isomerización, alquilación y adición de compuestos oxigenantes como el metil terbutil éter y metil teramil éter.
- Procesos de purificación, para que su calidad cumpla con las normas de calidad y las normas ecológicas, tales como la hidrodesulfuración.

Para la producción de gasolinas en la industria de refinación se emplea la destilación del crudo, seguida de procesos de rompimiento, unión o reestructuración de moléculas, además de otros procesos auxiliares para la purificación del producto, tales como el hidrotratamiento y los tratamientos cáusticos.

Obtención de la gasolina a partir del petróleo:

Simplificando, la gasolina Magna resto del país se obtiene a partir del petróleo, pasando por las siguientes etapas:

**TABLA I. OBTENCIÓN DE LA GASOLINA**

|   | <i>SERVICIO</i>  | <i>PRODUCE</i>   |
|---|--|--|
| <b>Planta de Destilación Primaria No. 1 y No.2</b>                | Esta planta se creó para obtener productos refinados por destilación fraccionada. Su rendimiento es variable de acuerdo a la composición del aceite crudo.   | Gas seco<br>Gas licuado<br>Gasolina<br>Turbosina primaria<br>Kerosina primaria |
| <b>Planta Estabilizadora de Gasolina No. 1 y No. 2</b>            | Su objetivo es separar el gas licuado y el gas seco de las naftas (gasolinas) de despunte provenientes de las plantas de destilación primaria.   | Gas seco<br>Gas licuado<br>Gasolina estabilizada primaria.                     |
| <b>Planta Hidrodesulfuradora de Gasolinas U-400- 1</b>            | La planta elimina el contenido de azufre, oxígeno, nitrógeno, cloro, metales y olefinas de gasolina primaria mediante un proceso de hidrogenación catalítica (la reacción en la que se rompe un enlace sencillo entre átomos con adición de hidrógeno) | Gas amargo<br>Pentano<br>Hexano<br>Gasolina desulfurada con 0.5 ppm            |
| <b>Planta Hidrodesulfuradora de Intermedios U-700-1 y U-800-1</b> | Su objetivo es eliminar los compuestos de azufre, oxígeno y nitrógeno de los destilados intermedios (turbosina y kerosina) mediante una hidrogenación catalítica.  | Gas seco<br>Gasolina amarga  |
| <b>Planta Reformadora de Gasolina U-500-1</b>                     | Su función es producir gasolina de alto octano a partir de gasolina primaria previamente desulfurada, sometiéndola a alta presión y temperatura.   | Gas seco<br>Gas L.P<br>Gas amargo<br>Gas licuado<br>Gasolina desulfurada       |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <p><b>Planta Isomerizadora de Pentanos y Hexanos</b></p>                       | <p>Convierte los hidrocarburos, pentanos y hexanos de bajo octano en productos isomerizados de mayor índice de octano.</p>   | <p>Isomero<br/>Gasolina de alto octano.</p>  |
| <p><b>Planta de Tratamiento y Fraccionamiento de Hidrocarburos U-600-2</b></p> | <p>La planta tiene una sección de tratamiento de líquidos y dos secciones de fraccionamiento.</p>  | <p>Gas seco<br/>Gas ácido<br/>Propano<br/>Isobutano<br/>Butano<br/>Isopentano<br/>Pentano<br/>Hexano<br/>Gas nafta<br/>Gasolina incolora</p> |
| <p><b>Planta Recuperadora de Azufre</b></p>                                    | <p>Su objetivo es convertir el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S, mezcla entre el sulfuro de hidrógeno y agua) contenido en las corrientes gaseosas en azufre.</p> | <p>Azufre</p>  |

En la figura 1 que se encuentra en el apéndice ilustra las etapas de obtención de la gasolina Magna resto del país.

### Destilación de crudo

Esta unidad es la encargada de transformar el crudo liviano en una serie de subproductos tales como: gas, nafta liviana, nafta pesada, queroseno, diesel, gasóleo y bunker. Para realizar esto se utiliza como medio de separación el proceso de destilación, el cual consiste en separar los compuestos químicos existentes en el crudo por medio de sus diferentes puntos de ebullición, proceso que es realizado a una presión determinada. La destilación en esta unidad es llevada a cabo en una torre de destilación que trabaja a una presión muy cercana a la atmosférica y por esto el nombre de la unidad.

La unidad de destilación atmosférica esta diseñada para procesar 4000 m<sup>3</sup> (25 mil barriles) de crudo liviano. Los crudos que normalmente se refinan tienen densidades comprendidas entre los 840 Kg/m<sup>3</sup> y los 890 Kg/m<sup>3</sup> y comúnmente son importados de Venezuela, Colombia y México.

El proceso que lleva el crudo desde que entra a la unidad de destilación, consiste en calentarse gradualmente por medio de una serie de intercambiadores de calor, luego pasa a un proceso conocido como desalinización el cual consiste en eliminarle una serie de impurezas que resultan muy dañinas para la metalurgia, las cuales si no se eliminan serian

muy perjudiciales al promover la formación de focos de corrosión en los diferentes equipos. Una vez que el crudo a sido desalado pasa a una segunda etapa de intercambiadores de calor con el fin de seguir subiendo su temperatura hasta llegar a una primera torre de destilación, conocida como de despunte o preflash, en este equipo se logra despojar al crudo de la nafta liviana y de ciertos gases, el proceso continua y el resto del crudo (crudo sin nafta liviana) adquiere una temperatura mayor en un horno especial para tal fin. Una vez que el crudo alcanza una temperatura cercana a los 350 °C pasa a una segunda torre (torre de destilación atmosférica), donde se logra separar en el resto de los componentes, que seguirán otros procesos en etapas posteriores de refinación.

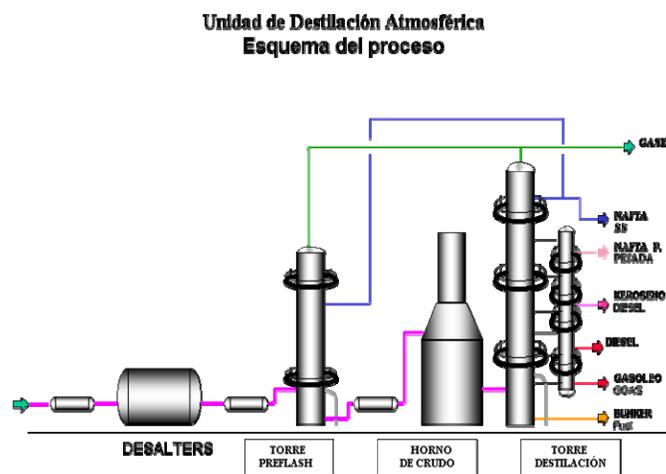


FIGURA 1 Destilación Atmosférica.

## 1.6 ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE LA GASOLINA

Para entender las normas de calidad del carburante y cómo afectan al automóvil, es importante tener una comprensión básica de la gasolina, cómo y por qué se fijan las normas de calidad, y qué significado tienen para la manejabilidad, el rendimiento y la durabilidad del motor del automóvil y sistemas relacionados.

La gasolina no es una sustancia única, sino una mezcla compleja de componentes que varían ampliamente en sus propiedades físicas y químicas. No existe gasolina pura. La gasolina debe cubrir una amplia gama de condiciones operacionales como las variaciones en los circuitos de carburante, temperaturas del motor, bombas de carburante y presión del carburante. También debe cubrir una variedad de climas, altitudes, y pautas de manejo. Las propiedades de la gasolina deben ser equilibradas para brindar rendimientos satisfactorios del motor en una gama muy amplia de circunstancias.

Las normas de calidad prevalecientes representan en cierto modo compromisos para poder satisfacer los numerosos requisitos de rendimiento.

Analizando adecuadamente las especificaciones y propiedades, es posible satisfacer los requisitos de los cientos de millones de motores de encendido por chispa del mercado con sólo unas pocas calidades de gasolina.

Las directivas de calidad sobre gasolina más comúnmente utilizadas son las establecidas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) (Sociedad para Pruebas y Materiales de EE.UU.). Las especificaciones ASTM se establecen por consenso, basado en la vasta experiencia y estrecha cooperación de productores de gasolina motor, fabricantes de equipos automotores, usuarios de ambos productos y otras partes interesadas como los reguladores estatales de calidad del carburante.

Las Normas ASTM son de observancia voluntaria. Sin embargo, la Agencia de Protección Medioambiental de EE. UU. (EPA) y algunos estados han promulgado reglamentaciones y leyes que, en algunos casos, exigen que la gasolina cumpla con la totalidad, o parte, de las directivas ASTM sobre gasolina.

Actualmente, la ASTM D 4814 es la especificación estándar para carburante de motor de encendido por chispa. Hay varios métodos de prueba incluidos en la especificación D 4814. También debe notarse que, además de las normas ASTM, algunas compañías de petróleo y operadores de oleoductos pueden seguir especificaciones que van más allá de las directivas ASTM. Por ejemplo, algunos refinadores pueden especificar un octano mínimo del motor más alto o el uso de un aditivo específico para controlar depósitos.

Recientemente, se ha prestado más atención a los requisitos medioambientales que debe cumplir la gasolina. Sin embargo, incluso con ajustes en la composición para cumplir con las normas medioambientales, la gasolina todavía debe cumplir con las normas de rendimiento establecidas por la ASTM.

Azufre y olefinas inducen ambos a mal comportamiento de la gasolina, reduciendo el azufre la eficacia del catalizador y pudiendo contribuir, a niveles altos, al desgaste prematuro del motor. Demasiado azufre también puede provocar olor "a huevo podrido" en el catalizador. Para las olefinas se ha demostrado que contribuyen a ciertas formas de depósitos en el circuito de carburante. Al reducir estos ingredientes mejorará pues la calidad de éste.

Actualmente, la gasolina contiene en promedio aproximadamente 300 partes por millón (ppm) de azufre. Sin embargo, las normas ASTM permiten un contenido de azufre de hasta 1000 ppm. Encuestas sobre calidad del carburante, efectuadas por los fabricantes de automóviles, han, en ocasiones, encontrado gasolinas con contenido de azufre próximo al límite superior o, en algunos casos, incluso superándolo.

El azufre envenena los catalizadores reduciendo su eficacia y su vida útil. En el pasado, la contaminación por azufre podía ser parcialmente revertida por la alta combustibilidad en posiciones de estrangulación de alta velocidad. No obstante, a fin de cumplir con las normas actuales y futuras sobre emisiones,

este modo de funcionamiento ha sido ampliamente eliminado. Por consiguiente, la gasolina alta en azufre puede tener un impacto negativo permanente en vehículos más nuevos. A fin de asegurarse que los catalizadores permanezcan efectivos, la EPA propuso limitar el contenido de azufre de la gasolina a 30 ppm en promedio, con ningún galón superando un máximo de 80 ppm. Estas exigencias las han tomado las empresas mexicanas, por ejemplo PEMEX y en la actualidad se pretende que el nivel máximo sea de 15 ppm. Suficiente tiempo a los refinadores para instalar el equipamiento necesario para reducir los niveles de azufre. Los requisitos de reducción de azufre se aplicarán tanto a gasolinas reformuladas como clásicas. Desde el punto de vista del rendimiento, la reducción de azufre será una mejora. Gasolinas bajas en azufre mejorarán la vida útil del catalizador y aumentarán la eficacia operativa.

En México existe la Norma Oficial Mexicana **NOM-086-ECOL-2006**, Contaminación atmosférica- Especificaciones sobre protección ambiental que debe reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.

**Algunos aspectos a considerar por esta norma se presentan a continuación:**

1.-Que las industrias y vehículos automotores que usan combustóleo, gásoleo industrial, diesel sin, desulfurado e industrial, gas natural, gas licuado de petróleo, gasolinas con y sin plomo, y turbosina, como combustible generan contaminantes, en los cuales se encuentran entre otros, las partículas, el monóxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, e hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados. Algunos de estos contaminantes primarios reaccionan entre sí o con sustancias presentes en la atmósfera, para formar otros contaminantes con características tóxicas.

2.-Que la emisión de dichos contaminantes produce deterioro en la calidad del aire si se rebasan ciertos límites, por lo que se hace necesario mejorar la calidad de los combustibles. Las especificaciones sobre protección ambiental que debe reunir los combustibles tienen como objeto disminuir significativamente las alteraciones del ambiente.

3.-Que para la determinación de las especificaciones sobre protección ambiental que debe reunir los combustibles previstos en esta Norma, se tomó en consideración la Política Nacional de Combustibles y el esquema actual de producción de Petróleos Mexicanos, así como la reconversión necesaria de aquellos procesos que permitan garantizar la fabricación de combustibles de mejor calidad.

**A continuación se presentan los puntos que contiene la Norma Oficial Mexicana:**

*1.-Objeto*

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos.

*2.-Campo de aplicación*

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en la producción, importación y distribución de combustibles fósiles líquidos y gaseosos.

*3.-Definiciones*

Combustibles fósiles líquidos o gaseosos son el gas natural y los derivados del petróleo tales como: petróleo diáfano, diesel, combustóleo, gasóleo, gas L.P., butano, propano, metano, isobutano, propileno, butileno o cualesquiera de sus combinaciones.

*4.-Especificaciones*

Las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos, son las establecidas en la tabla 1(Considerando Magna Resto del País, la cual se va a abordar en esta investigación).

Para la certificación de las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos se deberán utilizar los procedimientos establecidos por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) y otras mencionadas.

*5.-Vigilancia*

La Secretaría de Desarrollo Social, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Consumidor, en el ámbito de su competencia, son las autoridades encargadas de vigilar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana.

*6.-Sanciones*

El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana será sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y los demás ordenamientos jurídicos aplicables.

*7.-Concordancia con normas internacionales*

Esta Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

**TABLA II. ESPECIFICACIONES DE LA GASOLINA**

NOMBRE DEL PRODUCTO:

PEMEX-MAGNA

| Propiedad                           | Unidad               | Método ASTM     | Especificación        |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|
| Peso Específico a 20/4 °C           |                      | D-1298          | Reportar              |
| Destilación(2):<br>el 10% destila a | °C                   | D-86            | 65 máximo *           |
| el 50% destila a                    | °C                   |                 | 77 al 118 *           |
| el 90% destila a                    | °C                   |                 | 190 máximo *          |
| Temperatura Final de Ebullición     | °C                   | “               | 225 máxima            |
| Residuo de la Destilación           | % v                  | “               | 2 máximo              |
| Presión de Vapor Reíd               | lb/pulg <sup>2</sup> | D-4953          | 9.0 – 10.0 *          |
| Azufre                              | ppm                  | D-4294          | 1000 máximo           |
| Prueba Doctor                       | -                    | D-4952          | Negativa              |
| Azufre Mercaptánico                 | ppm                  | D-3227          | 20 máximo             |
| Corrosión al Cu, 3 hrs. a 50°C      | -                    | D-130           | Estándar no. 1 máximo |
| Goma Preformada                     | mg/100 ml            | D-381           | 4.0 máximo            |
| Período de Inducción                | minutos              | D-525           | 300 mínimo            |
| Contenido de Plomo                  | g/gal                | D-3237          | 0.010 máximo          |
| Número de octano (RON)              | -                    | D-2699          | Reportar              |
| Número de octano (MON)              | -                    | D-2700          | 82 mínimo             |
| Índice de octano (RON+MON)/2        | -                    | D-2699 y D-2700 | 87 mínimo             |
| Contenido de Fósforo                | g/gal                | D-3231          | 0.004 máximo          |
| Aromáticos                          | % v                  | FIA D-1319      | Reportar              |
| Olefinas                            | % v                  | FIA D-1319      | Reportar              |
| Benceno                             | % v                  | D-3606          | 4.9 máximo            |
| Color                               | -                    | Visual(3)       | Rojo                  |
| Aditivo Detergente                  | ppm                  | IMP-DG-15       | 165 mínimo(4)         |

Observaciones:

(1) Obligatoria en todo el Resto del País excepto la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y la Zona Frontera Norte. \*\*\*\*\*

(2) Las temperaturas de destilación corresponden a la presión atmosférica de 101.3 kPa (760 mmHg)

(3) Para fines de comparación colóquense la muestra tipo y la PEMEX-MAGNA Resto del País en botellas Tequileras de 1 Litro.

(4) La determinación del contenido de aditivo detergente sirve para confirmar los resultados de la dosificación del mismo, al momento de la adición.

\* Estas especificaciones solo aplican en los meses de Enero a Agosto.

Las normas de estabilidad son controles a la tendencia del carburante a contribuir a formar depósitos en el circuito de inducción y a obstruir el filtro y también determinan la vida de almacenaje del carburante.

Una norma sobre corrosión del cobre evita que el carburante cause corrosión excesiva en el circuito de carburante del vehículo.

Se establece una limitación al contenido de azufre. El excesivo contenido de azufre puede aumentar las emisiones de escape y los depósitos en el motor. Además, el exceso de azufre puede traer consigo compuestos acídicos en el cárter que reducen la eficacia de los aditivos de aceite del motor, contribuyendo así al desgaste prematuro del motor.

Hay una especificación para el contenido máximo de plomo del carburante sin plomo porque el plomo puede ensuciar los catalizadores. Las Enmiendas a la Ley de Saneamiento del Aire de 1990 prohíben la venta de gasolina con plomo después del 31 de diciembre de 1995 salvo para ciertas aplicaciones en aviación y en carreras. Por último, una temperatura para especificación de separación de fase se utiliza para determinar la tolerancia al agua de los carburantes mezclados (mezclas con etanol y metanol).

Muy similar a los ajustes creados para el control del automóvil, como la separación entre electrodos, la secuencia de encendido y la velocidad de ralentí, las normas de control de la gasolina determinan su rendimiento. Sin embargo, la principal diferencia es que las especificaciones de un motor de automóvil están concebidas para que ese motor funcione como debe. *En el caso de la gasolina, las especificaciones o normas son un control de propiedades físicas, compromisos para permitir que la gasolina se comporte bien en una vasta gama de automóviles y climas.*

Estas normas generales cubren la más amplia gama posible de vehículos y circunstancias de funcionamiento. No obstante, incluso carburantes conformes a las especificaciones pueden contribuir a problemas de manejabilidad en algunos vehículos bajo ciertas condiciones operacionales. Cuando ocurren estos casos aislados pueden, por supuesto, plantearle dificultades al técnico para diagnosticar el problema e identificar el curso de acción apropiado.

En la siguiente tabla se muestra las especificaciones de la gasolina y su influencia en el desempeño en vehículos, en el manejo y el ambiente.

| TABLA 1.6.1 Desempeño en el Manejo                |   |
|---|---|
| Propiedad   | Objetivo  |
| Volatilidad(Destilación, Presión de Vapor Reíd)   | Reducción de las perdidas de evaporación  |
| Periodo de Inducción (Estabilidad a la Oxidación) | Evitar el envejecimiento y la degradación   |
| Tendencia a la formación de Herrumbre             | Evitar la corrosión excesiva de tuberías, tanques de almacenamiento, bombas, etc. |

| TABLA 1.6.2 Desempeño en Vehículos                            |   |
|---|---|
| Propiedad   | Objetivo  |
| Octanaje  | Asegurar el eficiente desempeño del motor   |
| Corrosión a la lamina de cobre                                | Evitar el deterioro de los sistemas de manejo del combustible                       |
| Gomas Preformadas   | Evitar la formación potencial de depósitos en el sistema de quemado del combustible |
| Volatilidad(Destilación, Presión de Vapor Reíd, Relación V/L) |   |
| Aditivos Multifuncionales                                     | Garantizar el eficiente funcionamiento del motor                                    |

| TABLA 1.6.3 Desempeño Ambiental |  |
|---------------------------------|--|
| Propiedad                       | Objetivo   |
| Contenido de azufre             | Evitar el deterioro del convertidor catalítico               |
| Contenido de aromáticos         | Reducción de emisiones de hidrocarburos, CO, NO <sub>x</sub> |
| Contenido de benceno            | Disminución de emisiones de compuestos tóxicos a la salud    |
| Contenido de olefinas           |  |
| Contenido de plomo              |  |
| Volatilidad                     |  |
| Aditivos Multifuncionales       |  |

## **1.7 ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA GASOLINA**

Generalmente, no hay especificaciones o normas ASTM para los componentes individuales de la gasolina.

Unas pocas excepciones notables conciernen a algunos oxigenados como el etanol y el éter metilterciobutílico (MTBE).

1.- El etanol se produce fuera de la refinería y es agregado a la gasolina por el productor de carburante. Debido al uso extendido y a la creciente parte de mercado de las mezclas gasolina/etanol, ASTM adoptó en 1988 una especificación normalizada para el etanol con calidad de carburante (ASTM D 4806). Esta norma fija directivas respecto a pureza y otras propiedades importantes para el etanol que habrá de mezclarse con la gasolina. La observancia de esta norma asegura el uso de etanol de alta calidad para producir dichas mezclas. Los principales productores de etanol fijan a menudo directivas adicionales que pueden exceder los requisitos ASTM.

Además, la Fundación para Carburantes Renovables (RFA), organismo comercial de la industria del etanol de EE.UU., ha fijado especificaciones y normas de calidad para el etanol fabricado por sus compañías miembro.

2.- El MTBE también se agrega a veces fuera del proceso de la refinería. Por consiguiente, ASTM también ha trabajado en una especificación normalizada para el MTBE utilizado en dicha mezcla. De igual modo que con el etanol, esta norma fijará directivas respecto a la pureza y otras propiedades importantes.

Es probable que cuando otros componentes oxigenados alcancen el uso extendido del etanol y del MTBE, también sean objeto de similares especificaciones.

# **CAPÍTULO II.**

## **CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO (CEP)**

### **2.1 CONTROL DE CALIDAD**

Para esta investigación se consideran tres de las definiciones más usuales y sencillas de control de calidad se tratan de las siguientes:

Según K. Ishikawa, el control de calidad consiste en el desarrollo, diseño, producción y comercialización de productos y servicios con una eficacia del coste y una utilidad óptimas, todo ello equilibrado con una compra satisfactoria por parte de los clientes. En el control de calidad total se busca que todos los departamentos de la empresa tengan que empeñarse en crear sistemas que faciliten la cooperación y en preparar y poner en prácticas finalmente las normas internas.

Por otro lado, según las Normas Industriales Japonesas (norma JIS), el control de calidad se define como un sistema de métodos para la provisión coste-eficaz de bienes o servicios cuya calidad es adecuada a los requisitos del comprador. También esta definición contempla el control de calidad como una nueva manera de pensar en la dirección y de dirigir, y considera que la prueba en práctica eficaz del control de calidad requiere la participación y la cooperación de todos los empleados de una empresa, desde la alta dirección, pasando por los directivos medios y supervisores, hasta los trabajadores de base. Así mismo contempla que el control de calidad moderno ha de hacer uso de los métodos estadísticos, por lo que a veces se le denomina control estadístico de calidad.

Es importante mencionar los conceptos de calidad y control independientemente para un mejor entendimiento del control de calidad conjuntamente.

Uno de los autores más prestigiosos del Control de Calidad fue Juran, que definió la **calidad** como:

Un conjunto de características de un producto que satisfacen las necesidades de los clientes y que en consecuencia hacen satisfactorio el producto.

Por otra parte, la Sociedad Americana para el control de calidad (A.S.Q.C) define la **calidad** como:

Un conjunto de características de un producto, proceso o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades del usuario o cliente.

Podemos definir **control** como:

La medición de los resultados actuales y pasados, en relación con los esperados, ya sea total o parcialmente, con el fin de corregir, mejorar y formular nuevos planes.

El control no es posible llevarlo sin no existen “estándares” ó “especificaciones” de alguna manera prefijada y entre más precisa y cuantitativas serán de mejor utilidad.

Un producto o servicio es de calidad cuando satisface las necesidades del cliente o usuario en cuanto a *seguridad* (que el producto o servicio confiere al cliente), *fiabilidad* (capacidad que tiene el producto o servicio para cumplir las funciones especificadas sin fallo y por un periodo determinado de tiempo) y *servicio* (medida en que el fabricante y distribuidor responde en caso de fallo del producto o servicio).

## 2.2 CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD

Se utiliza el control estadístico de procesos para medir el funcionamiento de un proceso. Se dice que un proceso está funcionando bajo control estadístico cuando las únicas causas de variación son causas comunes (naturales). El proceso, en primer lugar, debe controlarse estadísticamente, detectando y eliminando las causas especiales (imputables) de variación. Posteriormente se puede predecir su funcionamiento y determinar su capacidad para satisfacer las expectativas de los consumidores. El objetivo de un sistema de control de procesos es el de proporcionar una señal estadística cuando aparezcan causas de variación imputables. Una señal de este tipo puede adelantar la toma de una medida adecuada para eliminar estas causas imputables.

Las variaciones naturales afectan a todos los procesos de producción, y siempre son de esperar. Las variaciones naturales son las diferentes fuentes de variación de un proceso que está bajo control estadístico. Se comportan como un sistema constante de causas aleatorias. Aunque sus valores individuales sean todos diferentes, como grupo forman una muestra que puede describirse a través de una distribución. Cuando estas distribuciones son normales, se caracterizan por dos parámetros.

Estos parámetros son:

- La media de la tendencia central
- La desviación estándar

Mientras la distribución (precisión del output) se mantenga dentro de los límites especificados, se dice que el proceso está “bajo control”, y se toleran pequeñas variaciones.

Las variaciones imputables de un proceso suelen deberse a causas específicas. Factores como el desgaste de la maquinaria, equipos mal ajustados, trabajadores fatigados o insuficientemente formados, así como nuevos lotes de materias primas, son fuentes potenciales de variaciones imputables.

Las variaciones naturales y las imputables plantean dos tareas distintas al director de operaciones. La primera es asegurar que el proceso tendrá solamente variaciones naturales, con lo cual funcionará bajo control. La segunda es, evidentemente, identificar y eliminar variaciones imputables para que el proceso pueda seguir bajo control.

El control estadístico de procesos es un medio por el cual un operario o directivo puede determinar si un proceso genera outputs que se ajustan a las especificaciones y si es probable que los siga generando. Consigue esto midiendo parámetros clave de una pequeña muestra de los outputs generadas a intervalos, mientras está en marcha el proceso.

Esta información se puede utilizar como base para realizar ajustes sobre los inputs al proceso o sobre el proceso mismo si es necesario, para evitar que se produzcan outputs que no se ajustan a las especificaciones.

La producción de artículos que se ajustan por poco a las especificaciones puede ser aceptable hoy día, pero toda variación del valor nominal que se tiene como objetivo puede provocar rechazos y reelaboraciones a lo largo de la cadena de trabajo. Las variaciones del valor nominal también pueden provocar problemas significativos a causa de la interdependencia de los componentes en los productos complejos. El CEP permite a las empresas mejorar de manera constante la actuación del proceso para reducir las variaciones en los outputs. Esta capacidad de reducir las variaciones con respecto al valor nominal puede aportar claras ventajas competitivas, y puede permitir cobrar precios más elevados por los productos.

## 2.3 CONTROL ESTADÍSTICO

### 2.3.1 PREVENCIÓN EN VEZ DE DETECCIÓN

El Control Estadístico de procesos se enfoca a la prevención de problemas, en lugar de su detección.

El Control a través de la detección descansa fundamentalmente en algún tipo de inspección que separa el producto malo del bueno y esto representa gastos adicionales puesto que existe la necesidad de agregar trabajo en reparar el producto, cuando ello es factible, o bien, desecharlo.

Los ajustes al proceso se efectúan en base a la información proporcionada por el producto desechado o reparado.

Desafortunadamente, éste enfoque propicia el que haya desperdicio, ya que significa que tenemos que hacer el producto y luego revisar lo que tenemos que hacer para corregirlo. Toma tantos recursos el hacer un mal producto como el producir un producto bien hecho; e incluso, en el primer caso, necesitamos regresarnos para repararlo o desecharlo.

En éste enfoque la energía se concentra en la **inspección masiva**, en inspeccionar el producto terminal en lugar del proceso, aún cuando ahí fue donde se produjo el producto defectuoso.

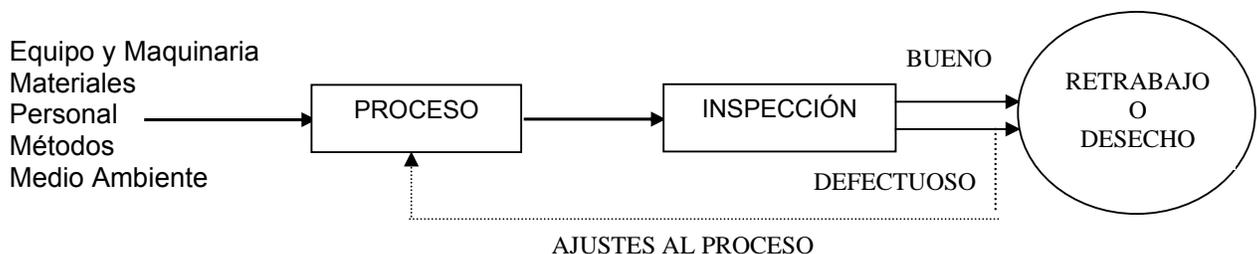


FIGURA. 2.3.1 Control del proceso a través de la detección

El énfasis en el enfoque detección de defectos ha sido la inspección después de los hechos; en este sentido, se ha pensado que lo importante es que el producto cumpla con las especificaciones. Cuando se inspecciona se necesitan ciertos estándares contra los cuáles se puede comparar el producto.

Entonces, se da por hecho que una vez que se ha alcanzado la especificación ya no puede haber posibilidades de mejora. En éste punto de vista impide que se busquen mejoras constantes en la calidad del producto.

Una alternativa diferente es el enfoque de sistemas llamado Prevención de Defectos, este enfoque hacia la prevención puede esquematizarse en la figura 2.3.2:

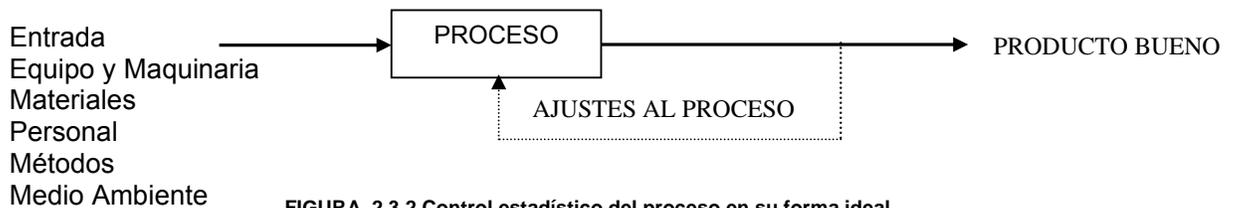


FIGURA. 2.3.2 Control estadístico del proceso en su forma ideal

### 2.3.2 FENÓMENOS DE VARIACIÓN

Las observaciones de cualquier proceso presentan variaciones y conducen al establecimiento de fenómenos fundamentales, como:

1. Todo varía: 2 artículos u ocurrencias no son exactamente iguales.
2. Las observaciones individuales son impredecibles.
3. Grupos de observaciones tienden a formar patrones predecibles o arrojan pruebas de que no hay un patrón predecible sin algún cambio del proceso.

El concepto de variación es el más importante para el control estadístico de procesos, por lo que debemos comprenderlo perfectamente antes de conocer las técnicas para controlarla, esta existe porque todos los elementos que participan en el proceso no son exactamente iguales todas las veces ya que en un proceso intervienen:

**PERSONAL:** Que no todos los días hacen las cosas exactamente igual.

**MATERIALES:** No son iguales todas las veces, máxime cuando un material proviene de proveedores distintos.

**MEDIO AMBIENTE:** En algunos procesos, las variaciones del medio ambiente afectan su comportamiento (humedad, temperatura, etc.)

**MAQUINARIA:** La maquinaria sufre desgastes, descalibraciones, etc., que hacen que su desempeño no sea siempre igual.

**MÉTODOS O PROCEDIMIENTOS:** La manera en que se llevan a cabo las actividades dentro del proceso tampoco son iguales todas las veces.

Si todos los elementos que participan en el proceso tienen variaciones, el resultado final o sea el producto, también va a tener variaciones.

Las diferencias entre los productos pueden ser muy grandes o pueden ser tan pequeñas que no puedan medirse, pero siempre están presentes.

El resultado de la variación es: Los productos dentro de las tolerancias de especificación son aceptados, los productos fuera de las tolerancias no son aceptados.

Sin embargo, para dirigir cualquier proceso y reducir la variación, la variación debe analizarse en función de las fuentes que la ocasionan. El primer paso para lograr esto es hacer la distinción entre *Causas Comunes o Aleatorias* y *Causas Especiales o Atribuibles* de variación y el tipo de acciones que deben tomarse para cada caso con el propósito de reducir dicha variación.

**Causas comunes o debidas al azar:** Son aquellas causas que están presentes en el proceso siempre, constantemente y por lo tanto están generando variación en toda la producción. Las variaciones debidas al azar son inevitables en el proceso, aun si la operación se realiza usando materia prima y métodos estandarizados, no es práctico eliminar el azar técnicamente y en forma económica por el momento.

Cuando un proceso se encuentra sujeto solamente a causas de variación debidas al azar podemos decir que el comportamiento del mismo es estable estadísticamente, o en otras palabras es un proceso bajo control. Esto no significa necesariamente que el proceso está cumpliendo con sus requisitos de especificación, significa que sólo es estable.

Este tipo de causas se deben a problemas que tienen que ver con el propio sistema y que generalmente no pueden ser solucionados por los operarios, dado que no son tareas de ajustes o composturas, sino acciones de mayor fondo, y pueden ser solucionadas solamente con la intervención de la administración. Pero se requiere, generalmente, de decisiones que deben tomar las personas que son responsables de proporcionar servicios al área productiva y de administrar el sistema.

**Causas Especiales o Atribuibles:** Son aquellas que no están presentes siempre, sino que aparecen de repente y generan un descontrol, por lo tanto no afectan la totalidad de lo producido, sino solamente la parte que se produjo mientras estuvo presente la causa especial. La variación debida a causas asignables significa que hay factores significativos que pueden ser investigados. Es evitable y no se puede pasar por alto: hay casos causados por la no aplicación de ciertos estándares o por la aplicación de estándares inapropiados.

Se dice que un proceso en el que aparecen causas especiales de variación, es un proceso fuera de control, este tipo de causas casi siempre pueden ser corregidas por el operario de la máquina al momento en que se presenta; sin embargo, corregirla cuando se presenta no es suficiente, debe tratarse de identificar aquellas causas especiales que se presentan frecuentemente para prevenir su ocurrencia o al menos hacer que su efecto sea mínimo.

El descubrimiento de una causa especial de variación y su arreglo es, usualmente, responsabilidad de alguien que está directamente conectado con la operación.

Algunos ejemplos de esta causa son: máquina descalibrada, pieza rota, lote de materiales defectuosos, falla mecánica o eléctrica, paros de línea, instrumento de medición descalibrado, etc.,

### 2.3.2.1 Patrones de variación

Se obtienen examinando observaciones en formas diversas. Las observaciones obtenidas probando un producto, proceso o servicio por sus características de calidad se pueden examinar viendo una gráfica de las mediciones en el orden en el cual se midieron las unidades. Otra forma consiste en graficar estadísticas obtenidas a partir de los valores observados, como observaciones individuales, promedios, rangos, desviaciones estándar, proporciones, conteos de disconformidades y otras funciones.

Otro patrón es la representación compuesta de un grupo de esas mediciones y la ocurrencia de los elementos (frecuencia) que tienen esos valores observados. A este patrón de variación se le llama **distribución** y se ilustra con el **histograma** de los resultados de la muestra.

Es muy importante señalar tres conceptos básicos para el Control Estadístico de Procesos:

- 1.-El estado de control estadístico no es natural para un proceso productivo, más bien, ello es un logro alcanzado por la eliminación de las causas de variación, una por una.
- 2.-El control estadístico debe usarse para alcanzar la mejora continua de los procesos más que el simple cumplimiento con las especificaciones.
- 3.- La mejora continua de los procesos se deriva del uso permanente de cartas de control, de su adecuada interpretación y del uso de la información que de ellas se deriva para instituir los controles del proceso necesarios.

La aplicación práctica del Control Estadístico del Proceso requiere la utilización de datos generados por el proceso que se desea controlar, para conocer el comportamiento de un proceso cualquiera, se tienen tres posibles opciones:

- a) Observar y medir el comportamiento del proceso tomando una pieza producida y en base a dicha observación asumir el comportamiento del proceso.
- b) Observar y medir la totalidad de lo producido en el proceso para obtener una verdadera realidad de su comportamiento.
- c) Observar parte de lo producido en el proceso y utilizar esa información para inferir el verdadero comportamiento del mismo.

Se presenta los resultados de elegir las opciones anteriores:

Si seleccionamos a) estaríamos cometiendo un grave error dado que una pieza producida no puede representar el comportamiento de todas las demás piezas que el proceso a producido durante un periodo de tiempo.

Si seleccionamos b) estaríamos conociendo el verdadero comportamiento del proceso, dado que observaríamos y mediríamos la totalidad de lo producido, es decir, lo que se conoce en términos estadísticos como la población total o universo, aunque estadísticamente es la opción con menor riesgo de error, en términos prácticos es una opción imposible de llevar a cabo.

En lugar de observar la población completa lo que debemos hacer es:

Utilizar c), es decir, tomar una parte de lo producido y en base al comportamiento de esos datos suponer o inferir el comportamiento de el total, a esta actividad se le llama **muestrear el proceso** y al conjunto de productos seleccionados del total de los producidos se le llama **muestra**.

La función de una muestra es entonces representar a la población total de donde fue extraída, cuando una muestra es representativa del total se conoce como **muestra estadística**.

Los datos son la información que se obtiene acerca del comportamiento del proceso y se grafican con la finalidad de obtener la información estadística y poder analizar tendencias.

A continuación se presentan los diferentes tipos de datos que son útiles en el estudio de las características de calidad:

**Datos variables:** Se refieren a mediciones reales junto con una escala de una característica de calidad o propiedad del proceso capaz de ser medida y son expresados en unidades básicas de: Distancia, Masa, Tiempo, Corriente eléctrica, Temperatura, Intensidad Luminosa, u otras, resultantes de la combinación de éstas o de cualesquier unidades.

**Datos por atributos:** Un atributo es una propiedad o características, al juzgar datos por atributos se verifica si la característica está o no presente, o cual de dos características antagónicas entre sí está presente en lo que se está evaluando. Los datos por atributos se resumen a dos alternativas. Ejemplos de estas alternativas son: Bueno-Malo, Pasa-No pasa, Ileso-Dañado, Igual patrón-Diferente al patrón. Los datos por atributos se emplean cuando el medir resulta muy costoso, consume demasiado tiempo y resultaría impráctico obtener datos variables.

**Datos Híbridos:** Son aquellos que se obtienen de la estratificación dentro del intervalo formado por las categorías extremas en los datos por atributos acerca del grado de adecuación del producto. Ejemplo de ello son aquellas características cuyo juicio es un tanto subjetivo, puesto que no existe método preciso de medición, tal sería el caso en la medición de la tesura de una tela o del confort de un asiento, en estos casos lo más adecuado resulta designar personas que “califiquen” el resultado.

En el Control Estadístico del Proceso existen herramientas básicas para su apoyo, las cuales son las “*siete herramientas básicas*”.

### **1. Diagrama de causa efecto ó diagrama de pescado**

Los Diagramas de Causa Efecto ilustran la relación entre las características (los resultados de un proceso) y aquellas causas que, por razones técnicas, se considere que ejercen un efecto sobre el proceso.

## 2. Diagrama de Pareto

El Diagrama de Pareto es una gráfica de barras verticales que separa los problemas muy importantes de los menos importantes, estableciendo un orden de prioridades.

Fue creado sobre la base del principio de Pareto, según el cual, el 80% de los problemas son provenientes de apenas el 20% de las causas. Wilfredo Pareto fue un economista italiano que, en el siglo XIX, presentó una fórmula que mostraba la desigualdad en la distribución de los salarios.

## 3. Diagrama de dispersión

Es la forma mas sencilla de definir si existe o no una relación causa efecto entre dos variables y que tan firme es esta relación, como estatura y peso, una aumenta al mismo tiempo con la otra.

## 4. Histogramas

Presentación de datos en forma ordenada con el fin de determinar la frecuencia con que algo ocurre. El Histograma muestra gráficamente la capacidad de un proceso, y si así se desea, la relación que guarda tal proceso con las especificaciones y las normas. También da una idea de la magnitud de la población y muestra las discontinuidades que se producen en los datos.

## 5. Hojas de verificación o comprobación

Es un formato especial constituido para coleccionar datos fácilmente, en la que todos los artículos o factores necesarios son previamente establecidos y en la que los resultados de inspección o resultados de operaciones son fácilmente descritos con marcas utilizadas para verificar.

## 6. Estratificación

Es un método que permite hallar el origen de un problema estudiando por separado cada uno de los componentes de un conjunto. Es la aplicación a esta técnica del principio romano "divide y vencerás" y del principio de Management que dice: "Un gran problema no es nunca un problema único, sino la suma de varios pequeños problemas".

## 7. Gráficas de control

Es una herramienta estadística que detecta la variabilidad, consistencia, control y mejora de un proceso.

La gráfica de control se usa como una forma de observar, detectar y prevenir el comportamiento del proceso a través de sus pasos vitales.

**“JUSTIFICACIÓN”** Debido al tipo de datos con los que contamos y el fin u objetivo de este trabajo nos enfocaremos o mejor dicho nos apoyaremos en las Gráficas de Control para el análisis de los mismos.

## 2.4 GRÁFICAS DE CONTROL

W. A. Shewhart, de los Laboratorios de la Bell Telephone, fue el primero en proponer, en 1924, una gráfica de control con el fin de eliminar una variación anormal, distinguiendo las variaciones debidas a *causas asignables* de aquellas debidas a *causas al azar*. En el eje horizontal X se indica el tiempo, mientras que el eje vertical Y se representa algún indicador de la variable cuya calidad se mide. Una gráfica de control consiste en una línea central, un par de límites de control, uno de ellos colocado por encima de la línea central (**límite superior**) y otro por debajo (**límite inferior**), y en unos valores característicos registrados en la gráfica que representa el estado del proceso. Si todos los valores ocurren dentro de los límites de control, sin ninguna tendencia especial, se dice que el proceso está en *estado controlado*. Sin embargo, si ocurren por fuera de los límites de control o muestran una forma peculiar, se dice que el proceso está *fuera de control*. Las primeras aplicaciones fueron en fusibles, bobinas térmicas y aparatos de estación en la Hawthorne Works (Chicago) de la Western Electric Company.

Ejemplo:

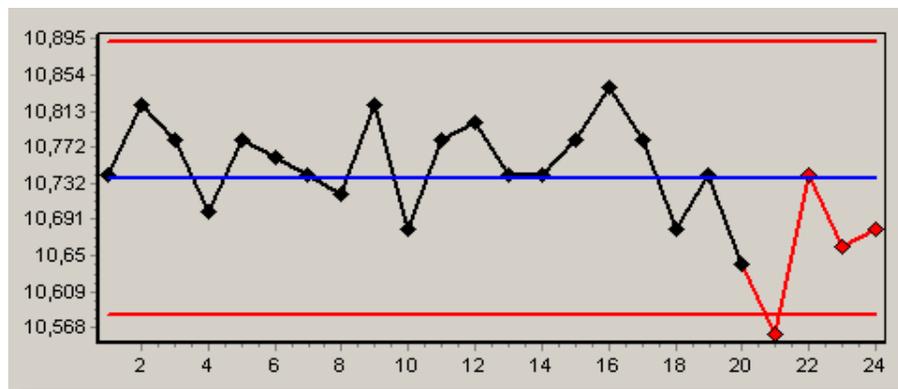


FIGURA. 2.4.1 Gráfica de Control

### Variación y Gráfica de Control

Shewhart observó que la variación ocurre en todas partes del mundo. Lo mismo es válido para procesos y servicios industriales y comerciales, la variación abunda.

El estudio del comportamiento de esta variación en características importantes de la calidad y la reducción de la variación para mejoramiento de los procesos son objetivos de la gráfica de control como una herramienta del control de calidad.

## 2.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS GRÁFICAS DE CONTROL

El término consistencia se refiere a la uniformidad en la salida del proceso; es preferible tener un producto de un proceso consistente, que tener uno con calidad superior, pero de un proceso intermitente.

Una gráfica de control se inicia con las mediciones considerando, sin embargo que las mediciones dependen tanto de los instrumentos, como de las personas que miden y de las circunstancias del medio ambiente, es conveniente anotar en las gráficas de control observaciones tales como cambio de turno, temperatura ambiente, etc.

**Los límites de control, inferior y superior**, definen el inicio y final del rango de variación, de forma que cuando el proceso está en control estadístico, haya una alta probabilidad de que prácticamente todos los valores caigan dentro de los límites. Por ello, si se observa un punto fuera de los límites de control, será señal de que ha ocurrido algo inusual en el proceso. Por lo contrario, si todos los puntos están dentro de los límites y no tienen algunos patrones de comportamiento, entonces será señal de que en el proceso no ha ocurrido ningún cambio fuera de lo común, y funciona de manera estable (que está en control estadístico). Y así, la carta se convierte en una herramienta para detectar cambios en los procesos.

### 2.4.1.1 Los Límites de control

Los límites de una carta de control no son las especificaciones, tolerancias o deseos para el proceso. Por el contrario éstos se calculan a partir de la variación del estadístico (datos) que se representa en la carta. De esta forma, la clave está en establecer los límites para cubrir cierto porcentaje de la variación natural del proceso, pero se debe tener cuidado que tal porcentaje sea el adecuado, ya que si es demasiado alto (99.99999%) los límites serán muy amplios y será, más difícil detectar los cambios en el proceso; mientras que si el porcentaje es pequeño, los límites serán demasiado estrechos, con lo que se incrementará el error tipo 1 (es decir que hubo un cambio cuando en realidad no lo hubo).

Para calcular los límites de control se debe proceder de forma que, bajo condiciones de control estadístico, los datos que se grafican en la carta tengan alta probabilidad de caer dentro de tales límites. Por lo que una forma de proceder es encontrar la distribución de probabilidades de la variable, estimar parámetros y ubicar los límites de forma que un alto porcentaje (99.73%) de la distribución está dentro de ellos. Esta forma de proceder se conoce como *límites de probabilidad*.

Una forma más sencilla y usual se obtiene a partir de la relación entre la media y desviación estándar de  $W$ , que para el caso que  $W$  se distribuya normal con media  $\mu_w$  y desviación estándar  $\sigma_w$ , y bajo condiciones de control estadístico, se tiene que entre  $\mu_w - 3\sigma_w$  y  $\mu_w + 3\sigma_w$  se encuentra 99.73% de los posibles valores de  $W$ .

En el caso de que no se tenga distribución normal, pero se tiene una distribución unimodal y con forma no muy distinta a la normal, entonces se aplica la regla empírica o la extensión del teorema de Tchebysheff (véase habilidad de proceso). Bajo estas condiciones un modelo general para una carta de control es el siguiente.

Sea  $W$  el estadístico que se va a graficar en la carta y supongamos que su media es  $\mu_w$  y su desviación estándar  $\sigma_w$ , entonces el límite de control inferior (LCI), la línea central y el límite de control superior (LCS) están dados por:

$$\begin{aligned} \text{LCI} &= \mu_w - 3\sigma_w \\ \text{Línea central} &= \mu_w \\ \text{LCS} &= \mu_w + 3\sigma_w \end{aligned}$$

Con estos límites y bajo condiciones de control estadístico se tendrá alta probabilidad de que los valores de  $W$  están dentro de ellos. En particular, si  $W$  tiene distribución normal, tal probabilidad será de 0.99873, con lo que se espera que bajo condiciones de control sólo 27 puntos de 10 000 caigan fuera de los límites.

La forma de estimar la media y la desviación estándar de  $W$  a partir de las observaciones del proceso dependerá del tipo de estadístico que sea  $W$ ; ya sea un promedio, un rango o un porcentaje.

Tiene una gran ventaja sobre el método de las distribuciones de las frecuencias al presentar datos, la gráfica de la frecuencia de observaciones muestra la calidad total y la forma de la variación durante el periodo de tiempo muestreado, pero no indica cómo o cuándo se produjo esa variación. La ventaja de la gráfica de control sobre el histograma está en el uso de límites. La gráfica de observaciones fluctuantes muestra la cantidad y naturaleza de la variación en el tiempo, pero depende de la escala y no indica la presencia o ausencia de control estadístico. La gráfica de control muestra la cantidad y naturaleza de la variación en el tiempo, indica control estadístico o la falta de él y permite la interpretación y detección del patrón de cambios en el proceso en estudio.

#### **2.4.1.2 Tipos de Gráficas de Control y Características principales**

Hay dos tipos de gráficas de control, una para *valores continuos* y otra para *valores discretos*. Los tipos de gráfica prescritos por JIS (Normas Industriales Japonesas) se muestran en la tabla 2.4.1.2.1 y sus líneas de control se muestran en la tabla 2.4.1.2.2.

Para la utilización de las gráficas se requiere un procedimiento específico:

- Decidir la gráfica de control a emplear
- Construir gráficas de control para el control estadístico del proceso
- Controlar el proceso, si aparece una anomalía sobre la gráfica de control, investigar inmediatamente las causas y tomar acciones apropiadas.

| Valor característico | Nombre   |
|----------------------|--|
| Valor continuo       | Gráfica $\bar{X}$ -R (Valor promedio y rango)<br>Gráfica X (Variable de medida)  |
| Valor discreto       | Gráfica $pn$ (Número de unidades defectuosas)<br>Gráfica $p$ (Fracción de unidades defectuosas)<br>Gráfica $c$ (Número de defectos)<br>Gráfica $u$ (Número de defectos por unidad) |

TABLA 2.4.1.2.1 Tipos de gráfica de control

| Tipo de gráfica de control                               | Límite superior de control (LCs),<br>Línea central (LC),<br>Límite inferior de control (Lci)         |
|--|--|
| Valor continuo – promedio<br>$\bar{X}$                   | LCs = $\bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$<br>LC = $\bar{\bar{X}}$<br>Lci = $\bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$   |
| Valor continuo – rango<br>R                              | LCs = $D_4 \bar{R}$<br>LC = $\bar{R}$<br>Lci = $D_3 \bar{R}$   |
| Valor continuo – valor medido<br>X                       | LCs = $\bar{\bar{X}} + 2.66 \bar{R}$<br>LC = $\bar{\bar{X}}$<br>Lci = $\bar{\bar{X}} - 2.66 \bar{R}$ |
| Valor discreto – número de unidades defectuosas<br>$pn$  | LCs = $pn + 3 \sqrt{pn(1-p)}$<br>LC = $pn$<br>Lci = $pn - 3 \sqrt{pn(1-p)}$                          |
| Valor discreto – fracción de unidades defectuosas<br>$p$ | LCs = $p + 3 \sqrt{pn(1-p)} / n$<br>LC = $p$<br>Lci = $p - 3 \sqrt{pn(1-p)} / n$                     |
| Valor discreto – número de defectos<br>$c$               | LCs = $c + 3 \sqrt{c}$<br>LC = $c$<br>Lci = $c - 3 \sqrt{c}$   |
| Valor discreto – número de defectos por unidad<br>$u$    | LCs = $u + 3 \sqrt{u/n}$<br>LC = $u$<br>Lci = $u - 3 \sqrt{u/n}$                                     |

TABLA 2.4.1.2.2 Lista de fórmulas para líneas de control

#### 2.4.1.2.1 Elección del tipo de diagramas de control.

En cuanto a la **elección del tipo adecuado de diagrama de control**, los diagramas de control por variables de  $\bar{X}$  y **R** (o de  $\bar{X}$  y **S**) son apropiados en los siguientes casos:

- Se introduce un nuevo proceso, o bien se fabrica un nuevo producto mediante un proceso ya existente.
- El proceso ha estado funcionando durante algún tiempo, pero tiene problemas crónicos o no puede cumplir con las tolerancias especificadas.
- El proceso tiene problemas, y el diagrama de control puede ser útil para fines de diagnóstico (localización de averías).
- Se necesitan pruebas destructivas (u otros procedimientos de prueba costosos).
- Es conveniente reducir al mínimo el muestreo para aceptación u otras pruebas cuando el proceso se puede manejar bajo control.
- Se han utilizado gráficas de control de atributos, pero el proceso está fuera de control o bajo control pero con producción inaceptable.
- Procesos con especificaciones muy estrechas, tolerancias de montaje traslapadas, u otros problemas de manufactura difíciles.
- Situaciones en las que el operario debe decidir si ajusta o no el proceso, o bien cuándo se tiene que evaluar una configuración.
- Se quiere un cambio en las especificaciones del proceso.
- Se debe demostrar continuamente la estabilidad y capacidad del proceso, por ejemplo en industrias no reguladas.

Los **diagramas de control por variables relativos al número de individuos X** son apropiados en los siguientes casos:

- Procesos en los que es inconveniente o imposible obtener más de una medición por muestra, o cuando mediciones repetidas difieren sólo por errores de laboratorio o de análisis. Esto ocurre a menudo en los procesos químicos.
- Procesos en los que la tecnología de pruebas e inspección automatizadas permite medir todas las unidades producidas. En estos casos, se considerarán también el diagrama de control de la suma acumulativa CUSUM y el de control de promedios móviles ponderados exponencialmente EWMA.
- Situaciones en las que los datos se obtienen muy despacio y no sería práctico esperar una muestra mayor, lo que además haría el procedimiento de control demasiado lento para reaccionar los problemas. Esto sucede a menudo en situaciones no industriales, por ejemplo, se dispone de datos sobre la contabilidad sólo una vez al mes.

#### **2.4.1.2.2 Gráfica de medidas y desviaciones estándar**

Esta gráfica es el instrumento estadístico que sirve para estudiar el comportamiento de un proceso de manufactura, considerando como indicador la desviación estándar.

La estructura general, esta constituida por dos porciones, una se destina al registro de los promedios de la característica de calidad en consideración y otra para controlar la variabilidad del proceso.

La ventaja de usar esta gráfica es que para estos valores de  $n$  la desviación estándar es más sensible a cambios pequeños que el rango.

Dentro del procedimiento de construcción para dicha grafica incluye cálculos de límites de control para las dos partes que constituyen la gráfica y la graficación de los promedios y desviaciones estándar obtenidos en cada subgrupo.

Es importante la variabilidad del proceso de control, al iniciar la construcción de la gráfica, si el proceso no muestra estabilidad estadística, entonces la parte correspondiente a los promedios no será confiable dado que los límites de control de  $\bar{X}$  dependen del valor medio de  $S$ .

#### **2.4.1.2.3 Gráficas de medianas y rangos**

Es la herramienta estadística que permite evaluar el comportamiento del proceso a partir de la mediana y del rango. La estructura es la común a todas las gráficas de control para variables.

La parte superior registra el valor medio de las características de calidad en estudio, y la parte inferior indica la variabilidad de la misma.

El cálculo de la mediana, es muy sencillo, de modo que utilizar esta gráfica para monitorear el proceso es atractivo para el usuario.

El uso de esta gráfica es en procesos que actualmente muestren estabilidad estadística. Como toda gráfica de control, el usuario obtendrá, de una manera continua, información rápida y eficiente del proceso en estudio; para verificar que el proceso sigue en control o bien para reconocer la aparición de causas especiales de variación.

Para el procedimiento de construcción de esta gráfica es muy similar al de la gráfica de medias y rangos; esto es calculando los límites de control, luego se grafican los puntos y se integran los límites de control y líneas centrales, por último se efectúa la lectura de la gráfica, a fin de ver si el proceso sigue estable o bien percibir alguna situación de anormalidad.

#### **2.4.1.2.4 Gráfica de control por atributos**

Las características de calidad que no pueden ser medidas con una escala numérica, se juzga a través de un criterio más o menos subjetivo.

Los datos se presentan con periodicidad a la gerencia y con ellos se integran números índices, que son muy importantes en el desarrollo de una empresa, estos pueden referirse al producto, desperdicio rechazo de materiales.

Dentro de la clasificación de las características calidad por atributos se requiere:

- 1) De un criterio
- 2) De una prueba
- 3) De una decisión

El criterio se establece de acuerdo con las especificaciones.

La prueba consiste en la operación que se realiza para averiguar la existencia o no del criterio establecido.

La decisión determina qué título debe darse al producto, es decir si pasa o no pasa.

Entre los diagramas de control por atributos más importantes tenemos los siguientes:

- Gráfico de la proporción de unidades defectuosas o gráfico  $p$ .
- Gráfico del número de unidades defectuosas o gráfico  $np$ .
- Gráfico del número de defectos  $c$ .
- Gráfico del número de defectos por unidad  $u$ .

Los **diagramas de atributos** son apropiados en los siguientes casos:

- Los operarios controlan las causas atribuibles y es necesario reducir el rechazo del proceso.
- El proceso es una operación de montaje complicada, y la calidad del producto se mide en términos de la ocurrencia de disconformes, del funcionamiento exitoso o fallido del producto, etc. (algunos ejemplos son computadoras, equipos de automatización de oficinas, automóviles y los subsistemas importantes de estos productos).
- Se necesita un control del proceso, pero no se pueden obtener datos de mediciones.
- Casos en los que se necesita un resumen histórico del funcionamiento del proceso. Los diagramas de control de atributos, como los de  $p$ ,  $c$  y  $u$ , son muy eficaces para resumir información respecto al proceso desde el punto de vista de la administración.

### 2.4.1.2.5 Gráficas de variables

Una gráfica de control  $\bar{X}$ -R, en realidad son dos gráficas en una, una representa los promedios de las muestras (gráfica  $\bar{X}$ ) y la otra representa los rangos (gráfica R), deben construirse juntas, ya que la gráfica  $\bar{X}$ , nos muestra cualquier cambio en la media del proceso y la gráfica R nos muestra cualquier cambio en la dispersión del proceso, para determinar las  $\bar{X}$  y R de las muestras se basan en los mismos datos.

El uso particular de la grafica  $\bar{X}$ -R es que nos muestra los cambios en el valor medio y en la dispersión del proceso al mismo tiempo, además es una herramienta efectiva para verificar anomalías en un proceso dinámicamente.

Algunos puntos importantes a considerar previo a la elaboración de esta gráfica son:

- Variable a considerar
- Tamaño de la muestra
- Tener un criterio para decidir si conviene investigar causas de variación del proceso de producción.
- Familiarizar al personal con el uso de esta gráfica.

El proceso que se debe seguir para construir una grafica es:

La construcción de una gráfica de rangos y promedio resulta de formar una unidad, tanto de la gráfica de promedios como de la de rangos, consta de dos secciones:

Parte superior se dedica a los promedios,

Parte inferior a los rangos, en el eje vertical se establece la escala, a lo largo del eje horizontal se numeran las muestras.

Este proceso esta bajo control cuando no muestra ninguna tendencia y además ningún punto sale de los límites.

Entre los diagramas de control por variables más importantes tenemos los siguientes:

- Gráfico de medias  $\bar{X}$
- Gráfico de rangos **R**
- Gráfico de desviaciones típicas **S**
- Gráfico de medianas  $\bar{X}^2$
- Gráfico de individuos **X**

#### 2.4.1.2.5.1 Gráfica de Control $\bar{X}$ -R

Esta se usa para controlar y analizar un proceso en el cual la característica de calidad del producto que se esta midiendo toma valores continuos, tales como longitud, peso o concentración, y esto proporciona la mayor cantidad de información sobre el proceso.  $\bar{X}$  representa un valor promedio de un subgrupo y **R** representa el rango del subgrupo. Una gráfica **R** se usa generalmente en combinación con una grafica  $\bar{X}$  para controlar la variación dentro de un subgrupo.

Si un proceso es de tipo masivo y además las variables de salida de estos procesos son de tipo continuo, entonces estamos ante el campo de aplicación de las graficas de control  $\bar{X}$ -R.

La idea es la siguiente: imaginamos que a la salida del proceso fluyen (uno a uno o por lotes) las piezas resultantes del proceso; cada determinado tiempo o cantidad de piezas se toma un número pequeño de piezas (subgrupo) a las que se les medirá una o más características de calidad. Con las mediciones de cada subgrupo se calculará la media y el rango, de modo que cada periodo de tiempo se tendrá una media y un rango que aportarán información sobre la tendencia central y la variabilidad del proceso, respectivamente.

Con la carta  $\bar{X}$  se analiza la variación entre las medias de los subgrupos, para así detectar cambios en la media del proceso, mientras que con la carta R se analiza la variación entre los rangos de los subgrupos, lo que permite detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso.

Cabe reiterar que al sostener que el proceso es estable, se está afirmando que es predecible sobre el futuro inmediato y por tanto no necesariamente la distribución o comportamiento del proceso tiene la forma de campana. Por lo tanto que podría ser una curva con sesgo o incluso otras formas más inusuales, lo afirmado es que se mantiene sobre el tiempo. Claro que si la forma es poco usual, se recomienda investigar la causa, y ver si esa circunstancia mejora el desempeño del proceso.

#### 2.4.1.2.5.2 Límites de control carta $\bar{X}$

Los límites de control de las cartas están determinados por la media y desviación estándar del estadístico  $W$  que se grafica en la carta, mediante la expresión  $\mu_w \pm 3\sigma_w$ . En el caso de la carta  $\bar{X}$  el estadístico  $W$  que se grafica es la media de las muestras,  $\bar{X}$ , por lo que los límites están determinados por

$$\mu_{\bar{x}} \pm 3\sigma_{\bar{x}}$$

donde  $\mu_{\bar{x}}$  significa la media de las medias, y  $\sigma_{\bar{x}}$  la desviación estándar de las medias, que en un estudio inicial se estiman de la siguiente manera:

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} \quad \text{y} \quad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

donde  $\bar{\bar{X}}$  es la media de las medias de los subgrupos,  $\sigma$  la desviación estándar del proceso y es la que indica qué tan variables son las mediciones individuales, y  $n$  es el tamaño de subgrupo. Por lo general en un estudio inicial no se conoce  $\sigma$ , ésta se puede estimar de varias maneras. Directamente a través de la desviación estándar,  $S$ . Sin embargo, hacerlo de esta forma incluiría la variabilidad entre muestras y dentro de muestras ( $\sigma$  de largo plazo), y para la carta  $\bar{X}$  es más apropiado sólo incluir la variabilidad dentro de muestras ( $\sigma$  de corto plazo). La alternativa que sólo incluye la variabilidad dentro de muestras y que se utiliza cuando el tamaño de subgrupo es menor que 10, consiste en estimar  $\sigma$  mediante la media de los rangos de los subgrupos  $\bar{R}$ , de la siguiente manera:

$$\sigma \approx \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Donde  $d_2$  es una constante que depende del tamaño de subgrupo o muestra. En la tabla 1 que esta en el anexo se dan varios valores de  $d_2$  para distintos valores de n. De esta manera,

$$3\sigma_x = 3 \left( \frac{\frac{\bar{R}}{d_2}}{\sqrt{n}} \right) = \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{R} = A_2 \bar{R}$$

es una estimación de 3 veces la desviación estándar de las medias, que se simplifica al sustituir  $\frac{3}{d_2\sqrt{n}}$  por la constante  $A_2$ , que está tabulada (en la Tabla

1) y que depende del tamaño de subgrupo n. En base a lo anterior, los límites de control para una carta de control  $\bar{X}$ , se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{LCS} &= \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \\ \text{Línea central} &= \bar{\bar{X}} \\ \text{LCI} &= \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \end{aligned}$$

Cuando por algún medio ya se conoce la media,  $\mu$ , y la desviación estándar del proceso,  $\sigma$ , entonces los límites de control para la carta de medias están dados por:

$$\begin{aligned} \text{LCS} &= \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ \text{Línea central} &= \mu \\ \text{LCI} &= \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \end{aligned}$$

#### 2.4.1.2.5.3 Interpretación de los límites de control en una carta $\bar{X}$

Estos límites reflejan la variación esperada para las medias muestrales de tamaño n, mientras el proceso no tenga cambios importantes y son utilizados para detectar cambios en la media del proceso y para evaluar su estabilidad, de ninguna manera se utilizan para evaluar la capacidad, puesto que: estos límites de control no son los de especificaciones o tolerancias, ya que mientras que los primeros se han calculado a partir de la información del proceso, las especificaciones son fijadas desde el diseño del producto.

Los límites de control en una carta de medias tampoco son igual a los límites reales o naturales del proceso, los cuales están dados por:

$$\text{Límite real superior} = \mu + 3\sigma$$

$$\text{Límite real inferior} = \mu - 3\sigma$$

Reflejan la variación esperada para las mediciones individuales, y no para la media de n mediciones.

La interpretación correcta de los límites de control es de especial relevancia para una adecuada aplicación de la carta  $\bar{X}$ , ya que de lo contrario se caerá en el error de confundir los límites de control con las especificaciones o con los límites reales. **Estos errores generalmente traen como consecuencia que se trate de utilizar la carta para evaluar capacidad, cuando se debe usar para analizar estabilidad y detectar cambios en la media del proceso de manera oportuna.**

Por último, aunque los límites de control de una carta  $\bar{X}$  se deducen a partir del supuesto de normalidad, si la característica de calidad no sigue una distribución normal, la carta  $\bar{X}$  sigue teniendo un buen desempeño para detectar cambios significativos en la tendencia central de la característica de calidad, lo dicho anteriormente es debido al teorema central del límite.

#### 2.4.1.2.5.4 Límites de control carta R

Con esta carta se detectarán cambios en la amplitud de la variación del proceso y sus límites se determinan a partir de la media y la desviación estándar de los rangos de los subgrupos, ya que en este caso es el estadístico W que se grafica en la carta R. Por ello los límites se obtienen con la expresión:

$$\mu_R \pm 3\sigma_R$$

donde  $\mu_R$  significa la media de los rangos, y  $\sigma_R$  la desviación estándar de los rangos, que en un estudio inicial se estiman de la siguiente manera:

$$\mu_R = \bar{R} \quad \text{y} \quad \sigma_R = d_3 \sigma \approx d_3 \left( \frac{R}{d_2} \right)$$

donde  $\bar{R}$  es la media de los rangos de los subgrupos,  $\sigma$  la desviación estándar del proceso,  $d_3$  es una constante que depende del tamaño de subgrupo, (está tabulada en la tabla 1). Por lo general en un estudio inicial no se conoce  $\sigma$ , ésta puede estimarse a través de  $\frac{\bar{R}}{d_2}$ . En forma explícita los

límites de control para la carta R se calculan con:

$$\text{LCI} = \bar{R} - 3 d_3 \left( \frac{\bar{R}}{d_2} \right) = \left[ 1 - 3 \left( \frac{d_3}{d_2} \right) \right] \bar{R} = D_3 \bar{R}$$

$$\text{Línea central} = \bar{R}$$

$$LCS = \bar{R} + 3 d_3 \left( \frac{\bar{R}}{d_2} \right) = \left[ 1 + 3 \left( \frac{d_3}{d_2} \right) \right] \bar{R} = D_4 \bar{R}$$

Se han introducido las constantes  $D_3$  y  $D_4$  para simplificar los cálculos (ver la tabla 1) para diferentes tamaños de subgrupo, n.

#### 2.4.1.2.5.5 Interpretación de los límites de control en una carta R

Estos límites reflejan la variación esperada para los rangos muestrales de tamaño n, mientras el proceso no tenga un cambio significativo. Estos límites son utilizados para detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso y para ver qué tan estable permanece a lo largo del tiempo, de ninguna manera se deben utilizar para evaluar la capacidad.

#### 2.4.1.2.5.6 Carta de Control $\bar{X}$ -S

Con una carta  $\bar{X}$ -R se quiere tener mayor potencia para detectar cambios pequeños en el proceso, entonces se incrementa el tamaño de subgrupo, n. Pero si  $n > 10$ , la carta de rangos ya no es una carta eficiente para tales propósitos, en estos casos se recomienda utilizar la carta  $\bar{X}$ -S en lugar de la carta R. A cada subgrupo de productos se le calcula su media,  $\bar{X}$ , y su desviación estándar, S; y con la carta  $\bar{X}$  se analizará el comportamiento de las medias para detectar cambios en la tendencia central del proceso, y en la carta S se graficarán las desviaciones estándar de los subgrupos para detectar cambios en la amplitud de la dispersión del proceso.

#### 2.4.1.2.5.7 Límites de control de la carta S

Estos límites se determinan a partir de la media y la desviación estándar de S, ya que en este caso es el estadístico W que se grafica. Por ello los límites se obtienen con la expresión:

$$\mu_s \pm 3\sigma_s$$

donde  $\mu_s$  significa la media o valor esperado de S, y  $\sigma_s$  la desviación estándar de S, y están dados por

$$\mu_s = c_4\sigma \text{ y } \sigma_s = \sigma\sqrt{1-c_4^2}$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar del proceso y  $c_4$  es una constante que depende del tamaño de subgrupo y está tabulada (en la tabla 1). Por lo general en un estudio inicial no se conoce  $\sigma$ , ésta puede estimarse ahora con:

$$\sigma \approx \frac{\bar{S}}{c_4}$$

donde  $\bar{S}$  es la media de las desviaciones estándar de los subgrupos. La razón de que  $\sigma$  no se estime directamente con el promedio de las desviaciones estándar, es que  $\bar{S}$  no es un estimador insesgado de  $\sigma$ , es decir, la esperanza matemática de  $\bar{S}$ ,  $E(\bar{S})$ , no es igual a  $\sigma$ , más bien  $E(\bar{S}) = c_4\sigma$ . Por ello, al

dividir entre la constante  $c_4$ , se convierte en un estimador insesgado. De esta manera los límites de control para una carta S están dados por:

$$LCS = \bar{s} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$

$$\text{Línea central} = \bar{s}$$

$$LCI = \bar{s} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$

La forma en que ahora se ha estimado  $\sigma$ , modifica la forma de obtener los límites de control en la carta  $\bar{X}$  cuando ésta es acompañada de la carta S. En este caso se obtienen de la siguiente manera:

$$LCS = \bar{X} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$$

$$\text{Línea central} = \bar{X}$$

$$LCI = \bar{X} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$$

#### 2.4.1.2.5.8 Interpretación de los límites de control en una carta S.

Estos límites reflejan la variación esperada para las desviaciones estándar de muestras de tamaño  $n$ , mientras el proceso no tenga cambios importantes, y por tanto son útiles para detectar cambios significativos en la magnitud de la variación del proceso.

#### 2.4.1.2.5.9 Carta de Individuales X

La carta de individuales es un diagrama para variables de tipo continuo, pero en lugar de aplicarse a procesos semi-masivos o masivos como es el caso de la carta  $\bar{X}$ -R, se aplica a procesos lentos, en los cuales para obtener una medición o una muestra de la producción se requieren periodos relativamente largos. Ejemplos de este tipo de procesos son:

- Procesos químicos que trabajan por lotes.
- Industria de bebidas alcohólicas, en las que deben pasar desde una hasta más de 100 horas para obtener los resultados de los procesos de fermentaciones y destilación.
- Procesos en los que las mediciones cercanas sólo difieren por el error de medición. Por ejemplo, temperaturas en procesos.
- Algunas variables administrativas, cuyas mediciones se obtienen cada día, cada semana o más. Por ejemplo: mediciones de productividad, de desperdicio, de consumo de agua, electricidad, combustibles, etc.

En estos casos la mejor alternativa es usar una carta de individuales, donde cada medición particular de la variable que se quiere analizar se registra en una carta.

Para determinar los límites de control se procede igual que en los casos anteriores, mediante la estimación de la media y la desviación estándar del estadístico  $W$  que se grafica en la carta, que en este caso es directamente la medición individual de la variable  $X$ .

Los límites se obtienen con la expresión  $\mu_x \pm 3\sigma_x$ . Donde  $\mu_x$  y  $\sigma_x$  son la media y la desviación estándar del proceso, respectivamente. Es decir, los límites de control en este caso coinciden por definición con los límites reales. Los cuales son:

$$\mu_x = \bar{X} \quad \text{y} \quad \sigma_x = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{\bar{R}}{1.128}$$

donde  $\bar{X}$  es la media de las mediciones de los subgrupos, y  $\bar{R}$  es la media de los rangos móviles de orden 2, al dividir el rango promedio entre la constante  $d_2$  se obtiene una estimación de la desviación estándar del proceso,  $\sigma$ .

Por lo tanto los límites de control para estas cartas son:

$$\bar{X} \pm 3 \left( \frac{\bar{R}}{1.128} \right)$$

#### Desventajas de la carta de individuales

a) Una de las desventajas de la carta de individuales es su menor potencia o sensibilidad para detectar cambios en el proceso, comparada con la carta de medias.

b) Si la distribución de la característica de calidad analizada con la carta de individuales se desvía mucho de la distribución normal, entonces los criterios de interpretación de la carta se pueden ver afectados seriamente.

#### **2.4.1.2.5.10 Interpretación de las cartas de control y causas de inestabilidad**

Una carta de control indica que es un *proceso estable* (bajo control estadístico) cuando sus puntos caen dentro de límites de control y fluctúan o varían aleatoriamente a lo ancho de la carta, con mayor frecuencia caen cerca de la línea central. Para facilitar la identificación de patrones no aleatorios lo primero que se hace es dividir la carta de control en seis zonas o bandas iguales, cada una con amplitud similar a la desviación estándar del estadístico  $W$ .

A continuación se presenta cada uno de los patrones que hacen que un proceso esté operando con causas especiales de variación, se especifican las razones comunes por las cuales pueden ocurrir dichos comportamientos.

**Patrón 1. Desplazamientos o cambios en el nivel del proceso.** Este patrón ocurre cuando uno o más puntos se salen de los límites de control o cuando hay una tendencia larga y clara a que los puntos consecutivos caigan de un solo lado de la línea central (figura a)).

Estos cambios especiales pueden ser por:

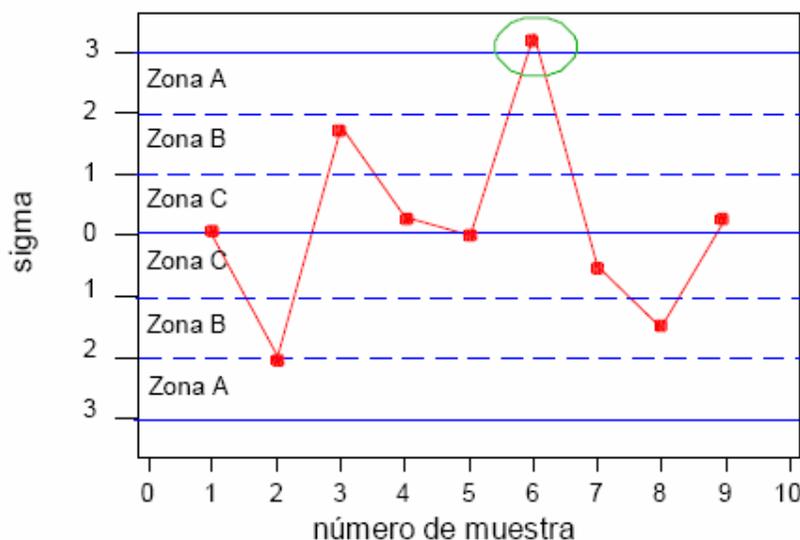
- La introducción de nuevos trabajadores, máquinas, materiales o métodos.
- Cambios en los métodos de inspección.
- Una mayor o menor atención de los trabajadores.
- Que el proceso ha mejorado (o empeorado).

Cuando este patrón ocurre en las cartas  $\bar{X}$ , p, np, u ó c, se dice que hubo un cambio en el nivel promedio del proceso; por ejemplo en las cartas de atributos eso significa que el nivel promedio de desconformidades se incrementó o disminuyó; mientras que en la carta  $\bar{X}$  un cambio de nivel significa que el centrado del proceso tuvo cambios. En la carta R y S un cambio de nivel significa que la variabilidad aumentó o disminuyó, aunque por la falta de simetría de la distribución de R y S, este patrón del lado inferior de estas cartas se debe ver con más reservas y esperar a acumular más puntos por debajo de la línea central para declarar que hay un cambio significativo.

Los criterios usuales para ver si este patrón se ha presentado son:

- Un punto fuera de los límites de control.
- Hay una tendencia clara y larga que los puntos consecutivos caigan de un solo lado de la línea central.

Fig. a) Desplazamientos o cambios en el nivel del proceso.



**Patrón 2. Tendencias en el nivel del proceso.** Este patrón consiste en una tendencia a incrementarse (o disminuirse) los valores de los puntos en la carta, como se aprecia en la figura b. Una tendencia ascendente o descendente bien definida y larga se puede deber a algunas de las siguientes causas especiales:

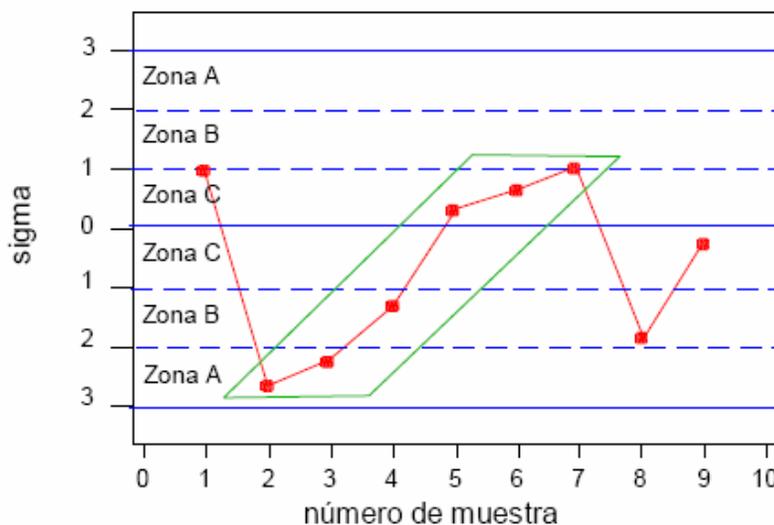
- El deterioro o desajuste gradual del equipo de producción.
- Desgaste de las herramientas de corte.
- Acumulación de productos de desperdicios en las tuberías.
- Calentamiento de máquinas.
- Cambios graduales en las condiciones del medio ambiente.

Estas causas se reflejan prácticamente en todas las cartas excepto en la R y S. Las tendencias en estas cartas son raras, pero cuando se dan, puede deberse a la mejora o decrecimiento de la habilidad de un operario; fatiga del operario (la tendencia se repetirá en cada turno).

Para determinar si hay una tendencia en el proceso se tienen los siguientes criterios:

- Seis o más puntos consecutivos ascendentes (o descendentes).
- Un movimiento demasiado largo de puntos hacia arriba (o abajo) de la carta de control, aunque no todos los puntos en ascenso (o descenso).

Fig. b) Tendencias en el nivel del proceso.



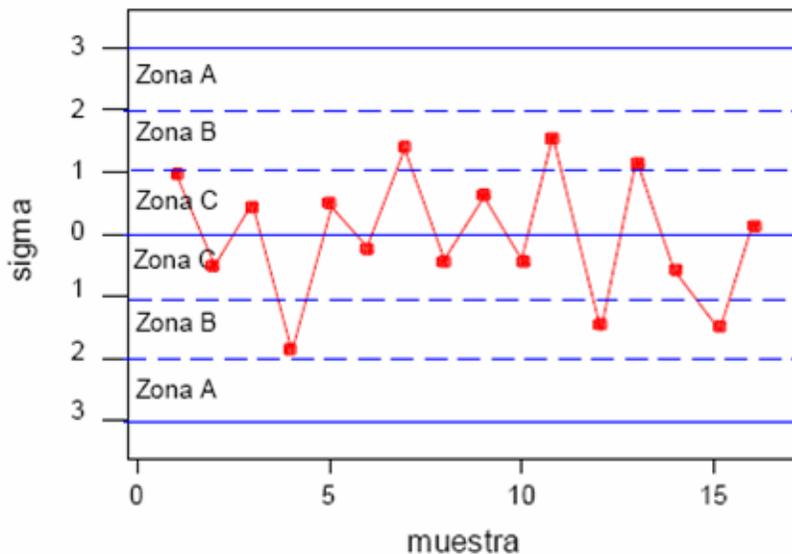
**Patrón 3. Ciclos recurrentes (periodicidad).** Otro movimiento no aleatorio que pueden presentar los puntos en las cartas es un *comportamiento cíclico de los puntos*. Por ejemplo, se da un flujo de puntos consecutivos que tienden a crecer y luego se presenta un flujo similar pero de manera descendente y esto se repite en ciclos (véase figura c).

Cuando un comportamiento cíclico se presenta en la carta  $\bar{X}$ , entonces las posibles causas son:

- Cambios periódicos en el ambiente.
- Diferencias en los dispositivos de medición o de prueba que se utilizan en cierto orden.
- Rotación regular de máquinas u operarios.
- Efecto sistemático producido por dos máquinas, operarios o materiales que usan alternadamente.

Si el comportamiento cíclico se presenta en la carta R o S, entonces algunas de las posibles causas son mantenimiento preventivo programado o fatiga de trabajadores o secretarías. Las cartas p, np, c y u se ven afectadas por las mismas causas que las cartas de medias y rangos.

Fig. c) Ciclos recurrentes (periodicidad).



**Patrón 4. Mucha variabilidad.** Una señal de que en el proceso hay una causa especial de *mucha variación*, se manifiesta mediante la alta proporción de puntos cerca de los límites de control, a ambos lados de la línea central, y pocos o ningún punto en la parte central de la carta. En estos casos se dice que hay mucha variabilidad, como se puede ver en la figura d.

Algunas causas que pueden afectar a la carta de esta manera son:

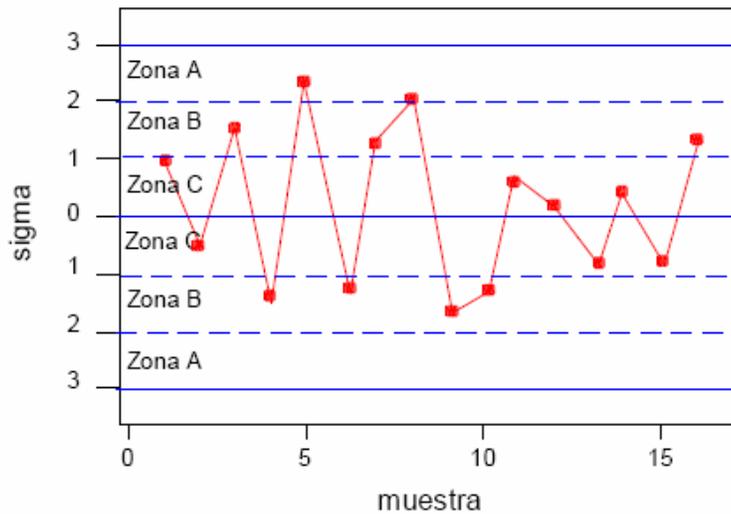
- Sobre control o ajustes innecesarios en el proceso.
- Diferencias sistemáticas en la calidad del material o en los métodos de prueba.
- Control de dos más procesos en la misma carta con diferentes promedios.

Mientras que las cartas R y S se pueden ver afectadas por la mezcla de materiales de calidades bastante diferentes, diversos trabajadores utilizando la misma carta R (uno más hábil que el otro), y datos de procesos operando bajo distintas condiciones graficados en la misma grafica.

Los criterios para detectar alta proporción de puntos cerca o fuera de los límites son los siguientes.

- Ocho puntos consecutivos a ambos lados de la línea central con ninguno en la zona C.
- Una imagen similar a la mostrada en la figura d.

Fig. d) Mucha variabilidad.



**Patrón 5. Falta de variabilidad (estaticación).** Una señal de que hay algo especial en el proceso es que prácticamente todos los puntos se concentren en la parte central de la carta, es decir, que los puntos reflejen poca variabilidad o estaticación, como se aprecia en la figura e.

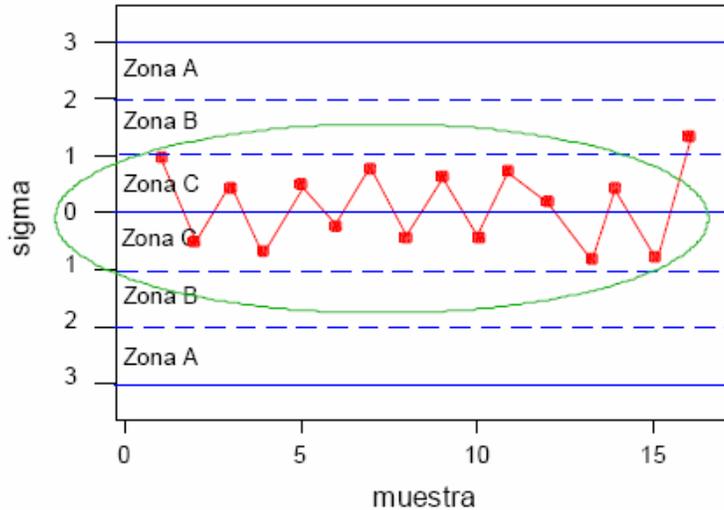
Algunas de las causas que pueden afectar a todas las cartas de control de esta manera son:

- Equivocación en los cálculos de los límites de control.
- Agrupamiento en una misma muestra a datos provenientes de universos con medias bastantes diferentes, que al combinarse se compensan unos con otros.
- “Cuchareo” de los resultados.
- Carta de control inapropiada para el estadístico graficado.

Para detectar falta de variabilidad se tienen los siguientes criterios:

- Quince puntos consecutivos en la zona C, arriba o debajo de la línea central.
- Una imagen similar a la mostrada en la figura e.

Fig. e) Falta de variabilidad (estratificación).



Cuando alguno de los patrones anteriores se presenta en una carta, es señal de que en el proceso hay una situación especial (proceso inestable o fuera de control estadístico) y causa que los puntos no estén variando aleatoriamente dentro de la carta.

Lo que significa que no se puede seguir produciendo con él, sino que el proceso trabaja con variaciones debidas a alguna causa específica (material heterogéneo, cambios de operadores, diferencias significativas entre máquinas, desgaste o calentamiento de equipo, etc.).

En consecuencia, en caso de presentarse alguno de los patrones anteriores es necesario buscar de inmediato las causas para conocer mejor el proceso y tomar medidas preventivas apropiadas y en caso necesario correctivas.

#### 2.4.1.2.5.11 Índice de Inestabilidad, $S_t$

El índice de inestabilidad proporciona una medición de qué tan inestable es un proceso, con lo que se podrán diferenciar los procesos que esporádicamente tengan puntos o señales especiales de variación, de los que con mucha frecuencia funcionan en presencia de causas especiales de variación.

El índice de inestabilidad,  $S_t$ , se define como:

$$S_t = \frac{\text{Número de puntos especiales}}{\text{Número total de puntos}} \times 100,$$

*Número total de puntos* es la cantidad de puntos que han sido graficados en una carta de control en cierto periodo de tiempo.

*Número de puntos especiales*, se designará a la cantidad de puntos que indicaron, en ese mismo periodo, una señal de que una causa especial ocurrió en el proceso.

Por lo tanto, los puntos especiales serán los puntos fuera de los límites más los que indicaron patrones especiales no aleatorios, de acuerdo con los criterios de interpretación de la carta. Por ejemplo, en el caso del patrón de tendencias que requiere de 6 puntos consecutivos de manera ascendente (o descendente), si se detecta una tendencia de 8 puntos de manera ascendente, entonces se contabilizarán sólo 3 puntos especiales, ya que durante los primeros 5 aún no se declaraba o detectaba la tendencia.

Respecto al periodo en el que se contabilizan los puntos para calcular el índice  $S_t$  éste dependerá de la frecuencia con la que se grafican puntos, pero debe ser amplio, de forma que en la carta se hayan graficado varios cientos de puntos (por lo menos 150 a 200 puntos).

Para interpretar el índice de inestabilidad  $S_t$ , se parte de que su valor ideal es cero, que ocurre cuando no hubo puntos especiales. Si todos los puntos graficados fueran especiales, entonces el valor del índice  $S_t$  sería 100. En general valores de pocas unidades porcentuales del índice  $S_t$ , indicarán un proceso con poca inestabilidad.

Aunque no hay acuerdos de qué tan pequeño tienen que ser el índice  $S_t$  para considerar que un proceso tiene una buena estabilidad, nosotros creemos que un valor entre 0 y 2% se puede decir que es un proceso con una estabilidad relativamente buena, de 2 a 5%, regular; y en la medida que el  $S_t$  supere estos porcentajes se considerará que tan mala es su estabilidad.

### **2.5 CAPACIDAD DEL PROCESO**

La capacidad del proceso es la eficiencia en el rendimiento de la calidad de un proceso, con determinados factores establecidos y bajo condiciones normales de la operación bajo control.

Se considera dos elementos importantes:

- 1.- Factores del proceso
- 2.- Condiciones del proceso

Entre los factores del proceso se incluye la materia prima, las máquinas o el equipo, la destreza del obrero, los dispositivos para la medición y la habilidad del inspector. Un cambio en uno o más de estos factores, pueden variar la capacidad del proceso. Para que resulte expresiva esta capacidad, debe de estar establecida sobre una serie de factores del proceso.

Para que sea explícito un estudio sobre la capacidad del proceso, se deben de considerar ciertas condiciones del proceso, este proceso debe tener sus mediciones normalmente distribuidas y permanecer bajo un estado estadístico del control.

En apoyo para establecer el potencial y la habilidad de un proceso, se presenta el Teorema de Tchebysheff y el Teorema Central del Límite como los fundamentos principales del estudio del Potencial y Habilidad de un proceso.

### 2.5.1 HABILIDAD DE PROCESOS

La habilidad de procesos está determinada por la variación total que se origina por las causas comunes, es la variación mínima que puede ser alcanzada una vez que todas las causas especiales.

Para estar en condiciones de poder determinar la habilidad del proceso es absolutamente necesario lograr su estabilidad, ya que el haber eliminado todas las causas especiales, sólo las causas comunes, intrínsecas al proceso, están presentes.

La habilidad representa el rendimiento del proceso en si mismo una vez que se ha demostrado que ese proceso está en control estadístico.

Los fundamentos principales del estudio del Potencial y Habilidad de un proceso son el Teorema de Tchebysheff y el Teorema Central del Límite, los cuales se presentan a continuación:

#### 2.5.1.1 Teorema de Tchebysheff:

Dado un número  $K$  mayor o igual que uno ( $K \geq 1$ ) y un conjunto de observaciones  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , al menos  $(1 - (1/K^2))$  de las observaciones caen dentro de  $K$  desviaciones estándar de la media.

El Teorema anteriormente expuesto, es aplicable a cualquier distribución de frecuencias para cualquier conjunto de observaciones, ya sean muestrales o poblacionales.

Del teorema de Tchebysheff se deriva la siguiente regla empírica:

Dada una distribución de frecuencias aproximada a la normal su curva representativa en:

El intervalo  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  contiene aproximadamente al 68% de las lecturas u observaciones.

El intervalo  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$  contiene aproximadamente al 95% de las lecturas u observaciones.

El intervalo  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  contiene aproximadamente al 99.7% de las lecturas u observaciones.

#### 2.5.1.2 Teorema del Límite Central

Otro fundamento del Control Estadístico de Procesos, de hecho el más importante, es el Teorema del Límite Central, que a continuación se explica.

En condiciones generalizadas, las sumas y medias resultantes de mediciones aleatorias repetitivas tienden a adoptar una distribución de frecuencias cercana a la normal.

Si se extraen muestras de tamaño  $n$  de una población con media finita  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  siendo  $n$  grande, la media muestral tiene una distribución de probabilidad (distribución de frecuencias) aproximadamente normal con media  $\mu$  y desviación estándar  $S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  la aproximación es mejor a medida que  $n$  crece.

La interpretación y aplicación del teorema anterior se da a continuación:

Si se desea estudiar un proceso se puede tomar como base una cantidad de grupos de piezas (grupos de piezas = muestras, cantidad de grupos = población) y en función de ellas establecer factores que permitan predecir el comportamiento de nuevos grupos de piezas y consecuentemente del proceso.

En el caso de un proceso se establecen parámetros de predicción en función de una población pasada, para el comportamiento de intervalos de producción futuros, comprendidos entre la toma de muestras sucesivas, suponiendo que las causas de variación del proceso serán comunes entre la población pasada y los nuevos intervalos. La suposición se fundamenta en la eliminación de las causas especiales de variación en la población pasada, que permita la sola presencia de los factores inherentes al proceso y permanentes. Lo mencionado anteriormente es muy importante, puesto que la distribución normal es descriptiva del comportamiento de un gran número de datos.

### 2.5.2 ÍNDICE DE CAPACIDAD DE PROCESO

En los últimos años se ha estado generalizando, en el medio industrial y comercial, el uso de un indicador conocido como *Índice de Capacidad de Proceso*. La adopción de ésta unidad de medida ha simplificado mucho la comunicación dado que es una medida universal, y basta conocer el índice de un determinado proceso para saber si éste tiene o no capacidad para cumplir con los requisitos establecidos.

El concepto de Capacidad de Proceso se puede analizar en aspectos que son:

- Índice de Capacidad Potencial del Proceso ( $C_p$ ).
- Índice de Capacidad real del proceso ( $C_{pk}$ ).

El *Índice de Capacidad Potencial ( $C_p$ )* nos dice si el rango de variación con que opera un proceso es mayor o menor al rango de variación permitido por especificaciones.

Es decir,

$$C_p = \frac{\text{Variación especificada}}{\text{Variación del proceso}}$$

ó

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6}$$

Cuando el  $C_p > 1$ , se dice que el proceso es potencialmente capaz de cumplir con las especificaciones y cuando el  $C_p < 1$  significa que el proceso no es potencialmente capaz de cumplir y para transformarlo en un proceso capaz es necesario eliminar las causas comunes de variación (reducir variabilidad) lo cual implica modificar el proceso en algún aspecto.

### 2.5.2.1 Valores de $C_p$ y su interpretación:

|                  | <b>Clase o categoría de proceso</b> | <b>Decisión (si el proceso esta centrado)</b>   |
|------------------|-------------------------------------|---|
| $C_p \geq 2$     | Clase mundial                       | Se tiene calidad Seis Sigma   |
| $C_p > 1.33$     | 1                                   | Adecuado  |
| $1 < C_p < 1.33$ | 2                                   | Parcialmente adecuado. Requiere de un control estricto.   |
| $0.67 < C_p < 1$ | 3                                   | No adecuado para el trabajo. Un análisis del proceso es necesario. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria. |
| $C_p < 0.67$     | 4                                   | No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias.   |

**TABLA 2.5.2.1 Valores e interpretación del  $C_p$**

Notas:

1. Si el  $C_{pk} < C_p$ , entonces una vez que se centre el proceso se tendrá la clase de proceso que se señala.
2. Véase la tabla 5.2 para una interpretación del  $C_p$  en términos de piezas defectuosas fuera de especificaciones.
3. Para procesos con una sola especificación, el valor mínimo de  $C_p$  o  $C_{ps}$  debe ser mayor que 1.25 en lugar de 1.33, para considerar el proceso adecuado.
4. Si se utiliza el índice  $Z$  como índice de capacidad, entonces los valores mínimos que éste debe tomar para cada una de las categorías indicadas del proceso se obtienen multiplicando el correspondiente valor por 3; así, para tener procesos con categoría adecuada se requiere que tanto  $Z_s$  como  $Z_i$  sean mayores que  $4(3 \cdot 1.33)$  y para 6 Sigma mayores que seis.

### 2.5.2.2 Índice $C_r$

Un índice que se conoce como razón de capacidad, el cual está definido por

$$C_r = \frac{6\sigma}{ES - EI}$$

Este compara la variación real contra la variación tolerada, se requiere que el numerador sea menor que el denominador, es decir, lo deseable son valores de  $C_r$  pequeños (menores que 1).

La ventaja de este índice es que tiene una interpretación un poco más intuitiva, a saber: el valor del índice  $C_r$  representa la proporción de la banda de especificaciones que es ocupada por el proceso. Por ejemplo, si el  $C_r = 0.60$ , querrá decir que la variación del proceso abarca o cubre sólo 60% de la banda de especificaciones, por lo que su capacidad potencial es satisfactoria. En cambio, si el  $C_r = 1.20$ , eso indica una capacidad pobre, ya que la variación del proceso cubre 120% de la banda de especificaciones.

### 2.5.2.3 Índices $C_{pk}$ , $C_{pi}$ , $C_{ps}$

Para calcular los índices  $C_{pk}$ ,  $C_{pi}$ ,  $C_{ps}$  hay varias formas equivalentes; una de ellas consiste en calcular un índice de capacidad para la especificación inferior,  $C_{pi}$  y otro para la superior,  $C_{ps}$ , como se muestra:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} \text{ y } C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3\sigma}$$

Como se observa, estos índices sí toman en cuenta la media del proceso y evalúan la capacidad para cumplir con la especificación inferior y superior. La distancia de la media del proceso a una de las especificaciones representa la variación tolerada para el proceso de un solo lado de la media. Por eso se divide entre  $3\sigma$ .

De aquí el  $C_{pk}$  está definido por:

$$C_{pk} = \text{Al valor más pequeño de entre } C_{pi} \text{ y } C_{ps}$$

Es decir, el índice  $C_{pk}$  es igual al índice unilateral más malo, por lo que el valor del  $C_{pk}$  es satisfactorio, eso indicará que el proceso en realidad es capaz. Si no es satisfactorio, no cumple con por lo menos una de las especificaciones. Algunos elementos adicionales para la interpretación del índice  $C_{pk}$  son los siguientes:

- El índice  $C_{pk}$  siempre va a ser menor o igual que el índice  $C_p$ . Cuando sean muy próximos, eso indicará que la media del proceso está muy cerca del punto medio de las especificaciones.
- Si el valor del índice  $C_{pk}$  es mucho más pequeño que el  $C_p$ , nos indicará que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones.
- Cuando los valores de  $C_{pk}$  sean mayores a 1.25 o 1.45, se considerará que se tiene un proceso con capacidad satisfactoria.
- Valores del  $C_{pk}$  igual a cero o negativos, indican que la media del proceso está fuera de las especificaciones.

### 2.5.2.4 Índices $C_{pm}$ (Índice de Taguchi)

La mejora de un proceso según Taguchi debe estar orientada a reducir su variabilidad alrededor del valor nominal,  $N$ , y no sólo orientada a cumplir con especificaciones.

Taguchi (1986) propone una definición alternativa de los índices de capacidad del proceso, la cual se fundamenta en lo que denomina función pérdida.

Este índice que propone Taguchi toma en cuenta el centrado y la variabilidad del proceso. El índice  $C_{pm}$  está definido por:

$$C_{pm} = \frac{ES - EI}{6\tau}$$

Donde

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}$$

Se puede decir que el índice  $C_{pm}$  compara el ancho de las especificaciones con  $6\tau$ ; pero  $\tau$  no sólo toma en cuenta la variabilidad del proceso, a través de  $\sigma^2$ , sino que también toma en cuenta el centrado a través de  $(\mu - N)^2$ .

La interpretación del índice  $C_{pm}$  es mayor que uno, entonces eso quiere decir que el proceso cumple con especificaciones, y en particular que la media del proceso está dentro de la tercera parte media de la banda de las especificaciones. Si  $C_{pm}$  es mayor que 1.33, entonces el proceso cumple con especificaciones, pero además la media del proceso está dentro de la quinta parte media del rango de especificaciones.

#### 2.5.2.5 Índices de Capacidad de Largo Plazo: $P_p$ y $P_{pk}$

Cuando hablamos de capacidad podemos tener una perspectiva de corto y largo plazo. La capacidad de corto plazo es calculada a partir de muchos datos tomados durante un periodo suficientemente corto para que no haya influencias externas sobre el proceso y esta capacidad representa el potencial del proceso, lo mejor que se puede esperar del mismo, mientras que la capacidad de largo plazo se calcula con muchos datos tomados de un periodo de tiempo suficientemente largo para que los factores externos puedan influir en el desempeño del proceso.

Se debe de considerar que para calcular los índices de capacidad debemos calcular la desviación estándar de un muestreo y se puede considerar sólo la variación dentro de las muestras a través del rango de las muestras (ver en los anexos). Esta forma de calcular la desviación estándar no considera los desplazamientos del proceso a través del tiempo que también influyen en la variación total del proceso, por lo que suele llamársele *variación de corto plazo del proceso*. Normalmente los índices de capacidad se calculan sólo considerando la variación de corto plazo, por lo que se habla de capacidad de corto plazo.

La otra manera de calcular la desviación estándar del proceso es considerando la variación entre muestras y dentro de muestras, lo que se hace calculando la desviación estándar directamente de todos los datos obtenidos a lo largo del tiempo; de esta forma, si se tienen en muchos datos de un tiempo suficientemente amplio entonces se tendrá una idea de la capacidad del proceso a largo plazo.

Para designar a los índices calculados con la desviación estándar de largo plazo se les designa con  $P_p$  y así con los demás índices cuya letra inicial es C se sustituye por la P.

La capacidad de corto plazo evaluada a través de  $C_p$  y por el índice Z representa la tecnología del proceso. Mientras que la capacidad de largo plazo medida por  $P_p$  y por el estadístico Z representa la tecnología del proceso combinada con el control de la tecnología.

La diferencia entre la capacidad de corto y largo plazo se conoce como desplazamiento del proceso y se puede medir a través del índice Z, de la manera siguiente:

$$Z_{mov} = Z_{ct} - Z_{lt}$$

El índice  $Z_{mov}$  representa la habilidad para controlar la tecnología.

# **CAPÍTULO III.**

## **USO DE MINITAB EN EL CEP**

**E**n los últimos años, el uso de Internet -la red de redes- ha causado una revolución en lo que a transmisión de datos e información se refiere, creando además un nuevo paradigma comunicativo.

Por ello, con cada vez mayor frecuencia, nos encontraremos con la necesidad de analizar estadísticamente grandes volúmenes de datos, con la finalidad de obtener información y, eventualmente, conocimiento.

En dicho análisis, el uso de un paquete estadístico -como Minitab, SAS, SPSS, S-Plus, Statgraphics, Statistica, etc.- resulta fundamental.

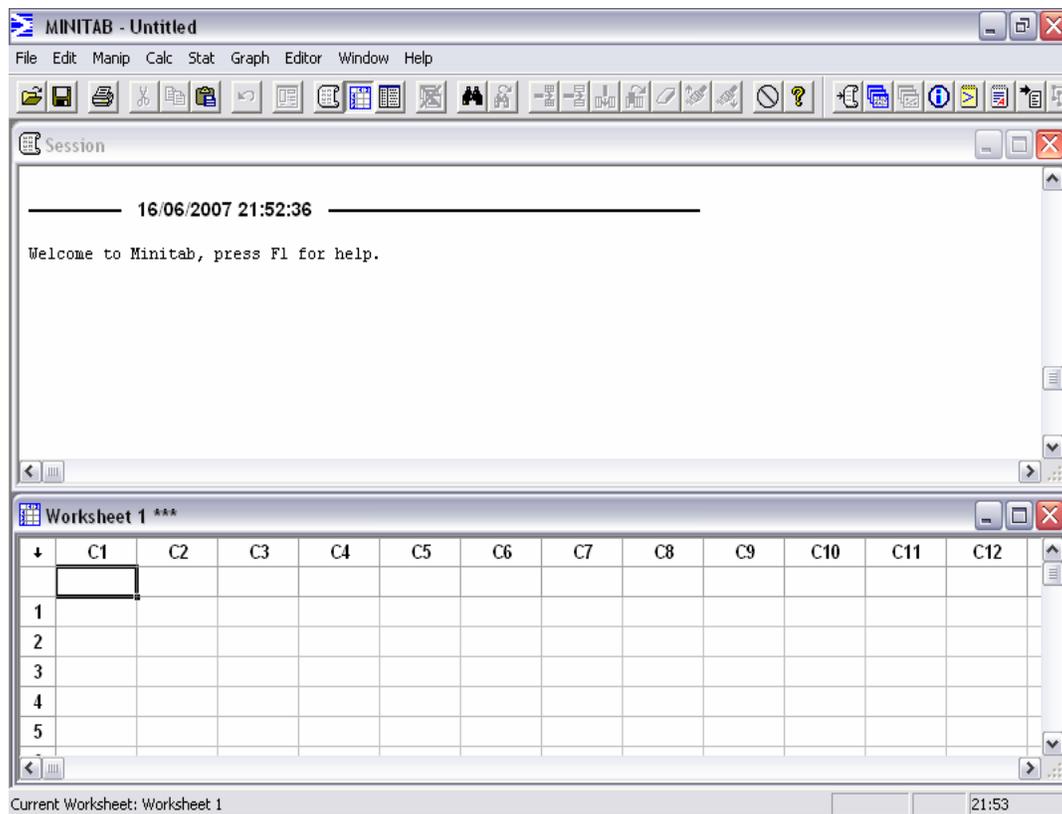
### CAPÍTULO III. USO DE MINITAB EN EL CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO

En el presente trabajo utilizaremos **Minitab**, el cual es un paquete estadístico que abarca todos los aspectos necesarios para el aprendizaje y aplicación de la Estadística en general.

Incluye análisis descriptivo, contrastes de hipótesis, regresión lineal y no lineal, series temporales, análisis de tiempos de fallo, **control de calidad**, análisis factorial, ANOVA, análisis cluster, etc.

A continuación presentamos una introducción al paquete MINITAB y los procedimientos que se deben llevar a cabo para obtener el análisis de control estadístico de calidad.

#### 3.1 PANTALLA PRINCIPAL DE MINITAB:



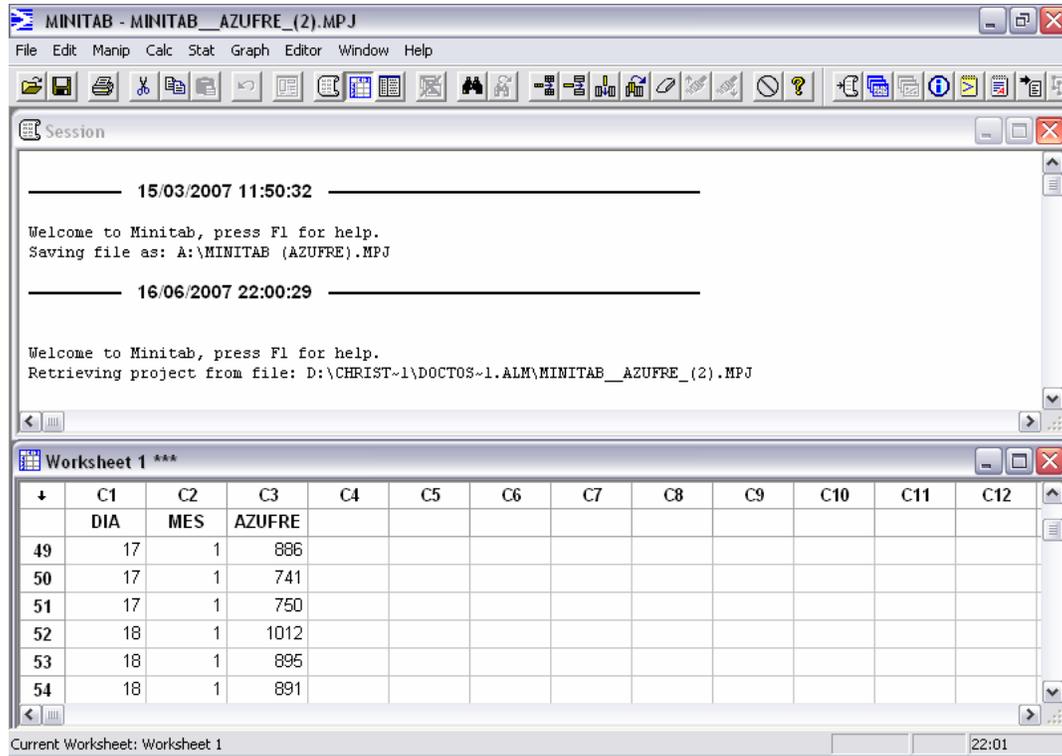
Los datos se introducen en la parte donde están situadas las columnas: cada columna es una variable y su respectiva fila corresponde a una observación.

El contenido de los submenús depende de cuál es la ventana activa (sesión, hoja de datos, gráficos.....). Se activa una u otra haciendo clic sobre la misma.

### 3.2 INTRODUCIR DATOS:

Los datos pueden ser introducidos directamente a través del teclado o recuperarlos de un archivo guardado previamente.

Ejemplo:



#### 3.2.1 CÓMO ABRIR, GUARDAR Y CERRAR UNA TABLA DE DATOS ( WORKSHEET )

Para abrir un nuevo worksheet, debemos escoger la opción *File > New* y escoger la opción *Minitab Worksheet*.

Para abrir un worksheet ya guardado escogemos *File > Open Worksheet*.

Para guardar un worksheet, elige *File > Save Current Worksheet*.

Para cerrar un worksheet es suficiente con escoger *File > Close Worksheet*.

#### 3.2.2 CÓMO ABRIR, GUARDAR Y CERRAR UN PROYECTO...

Para abrir un nuevo proyecto, debemos escoger la opción *File > New* y elegir *Minitab Project*.

Para abrir un proyecto *ya guardado* escogemos *File > Open Project*.

Para guardar un proyecto, elige *File > Save Project*.

Para cerrar un proyecto es suficiente con escoger *File > Exit*.

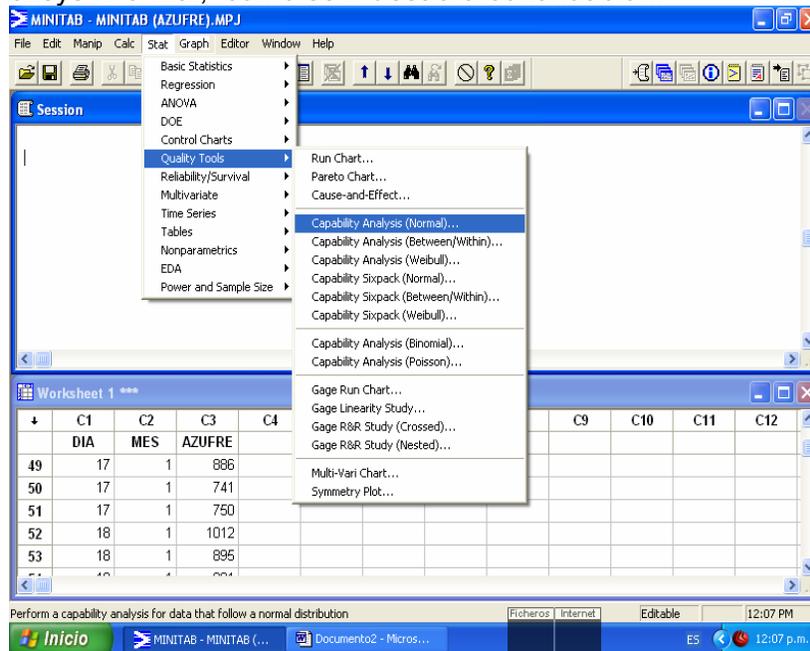
#### 3.2.3 PARA SALIR DEL PROGRAMA. . .

De la barra de herramientas, escogeremos *File > Exit*

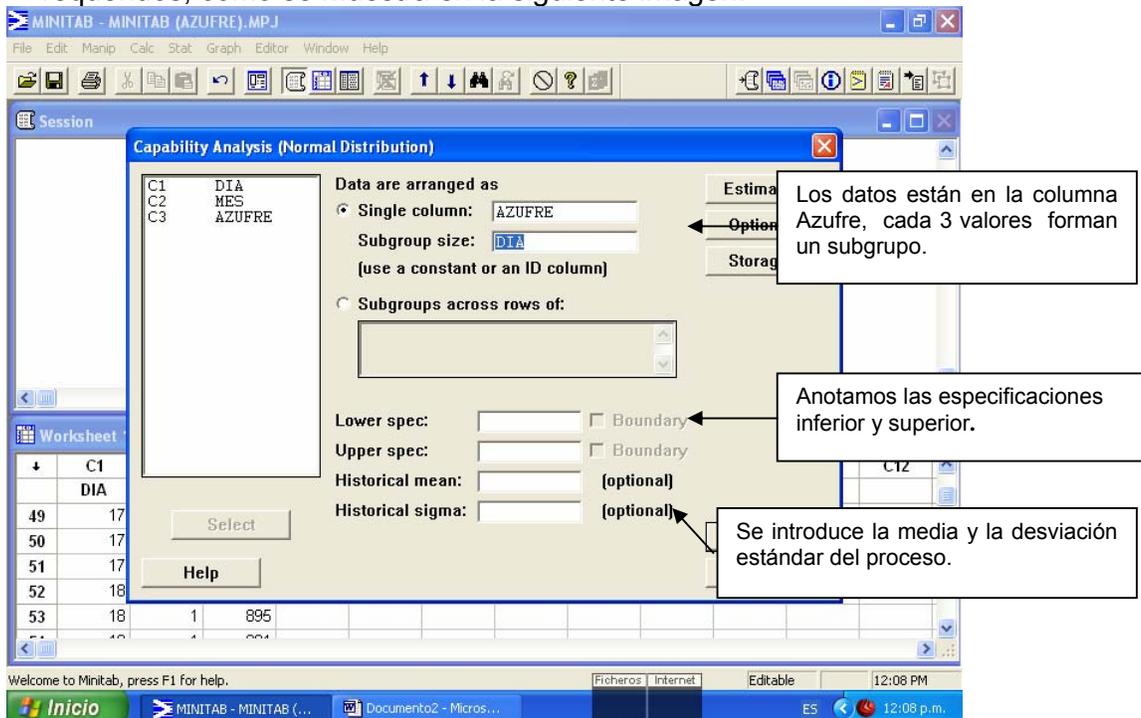
### 3.3 ESTUDIOS DE CAPACIDAD DEL PROCESO PARA VARIABLES QUE SIGUEN UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL:

A continuación se presenta el procedimiento para obtener un análisis de capacidad en MINITAB.

1.-Seleccionar las siguientes opciones Stat> Quality Tools> Capability Analysis>Normal, como se muestra a continuación:

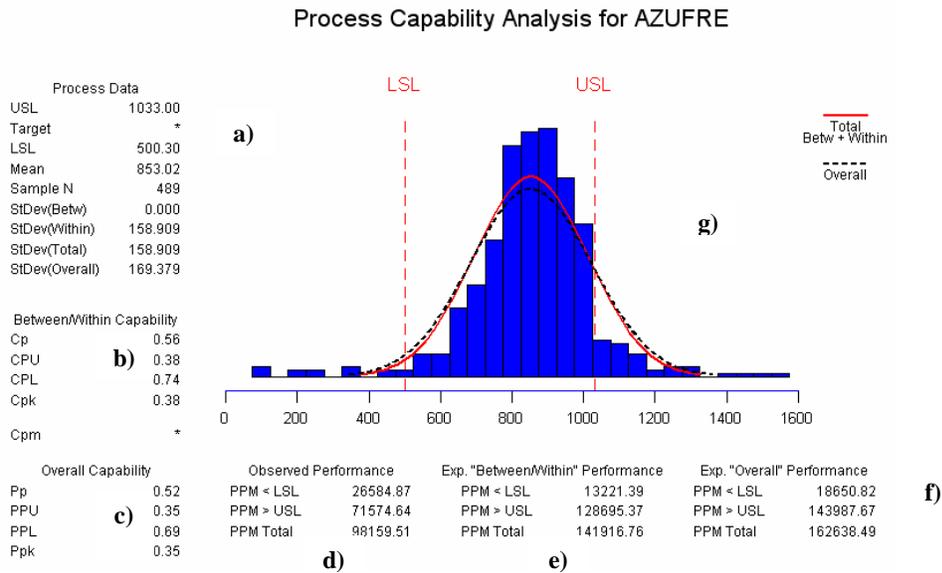


2.-En la ventana de Análisis de capacidad se introducen de los datos requeridos, como se muestra en la siguiente imagen:



## CAPÍTULO III. USO DE MINITAB EN EL CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO

3.-Posteriormente obtenemos la gráfica de Capacidad del Proceso como se muestra:



**FIGURA 3.3.1 Gráfica de capacidad del proceso**

- a) Datos del proceso:
  - Límites superior e inferior de especificaciones (USL y LSL**, como mínimo hay que introducir uno).
  - Valor objetivo (Target):** Lo muestra si se ha introducido (es opcional).
  - Media (Sample Mean)**, número total de valores introducidos (Sample N).
  - Desviaciones** tipo estimadas a partir de la variabilidad dentro de los **subgrupos** (StDev Within).
  - Desviaciones** estimadas a partir de la variabilidad **global** (StDev Overall).
  
- b) Muestra los Índices de capacidad a corto plazo: son índices calculados a partir de la variabilidad dentro de los subgrupos.
  
- c) Muestra los Índices de capacidad a largo plazo basándose en la variabilidad global.
  
- d) Muestra las Partes por millón (PPM) observadas por debajo y por encima de los límites de tolerancias, es decir, cuantos valores en ppm de los que tenemos están por debajo o por encima de los límites de tolerancias.
  
- e) Muestra las PPM esperadas fuera de tolerancias basándose en la variabilidad dentro de las muestras. Es un cálculo teórico a partir de la distribución normal que refleja esta variabilidad, centrada en el valor medio de los datos.

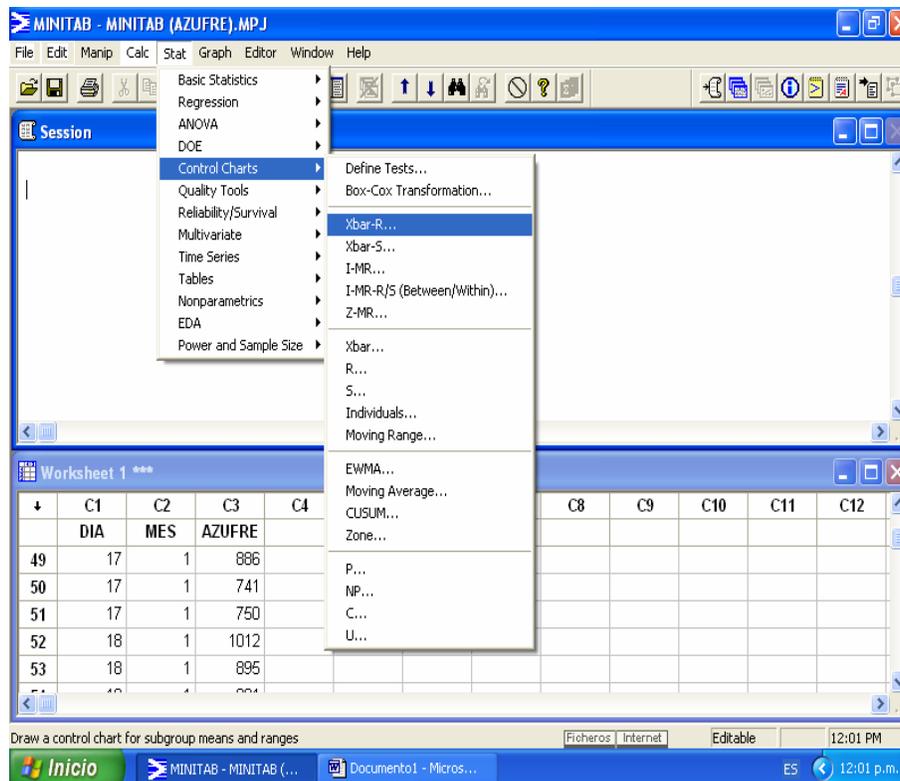
### CAPÍTULO III. USO DE MINITAB EN EL CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO

- f) Muestra las PPM esperadas fuera de tolerancias basándose en la variabilidad total. Es un cálculo teórico a partir de la distribución normal que refleja esta variabilidad, centrada en el valor medio de los datos.
- g) Muestra los Histograma de los datos y campanas que representan la variabilidad teórica global (overall, campana a trazos) y una supuesta variabilidad mínima alcanzable (within, línea de trazo continuo) si el proceso se mantiene estable en el tiempo.

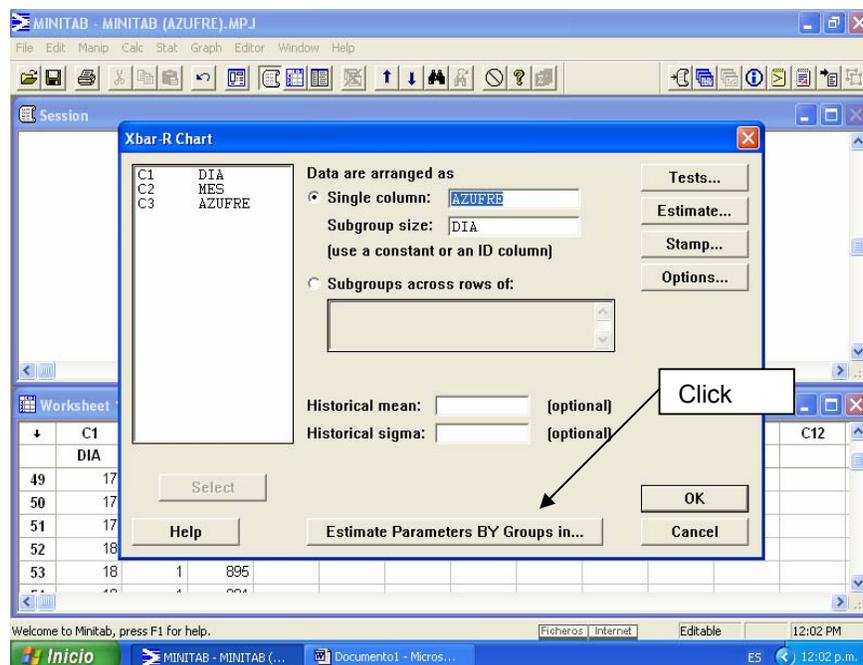
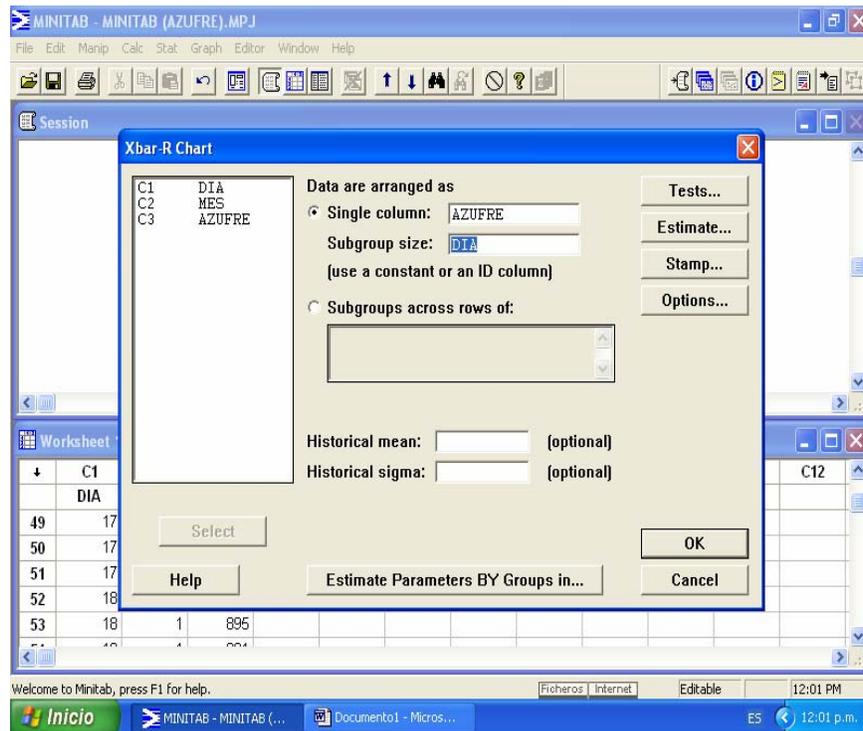
### 3.4 GRÁFICOS DE CONTROL PARA VARIABLES MEDIAS Y RANGOS:

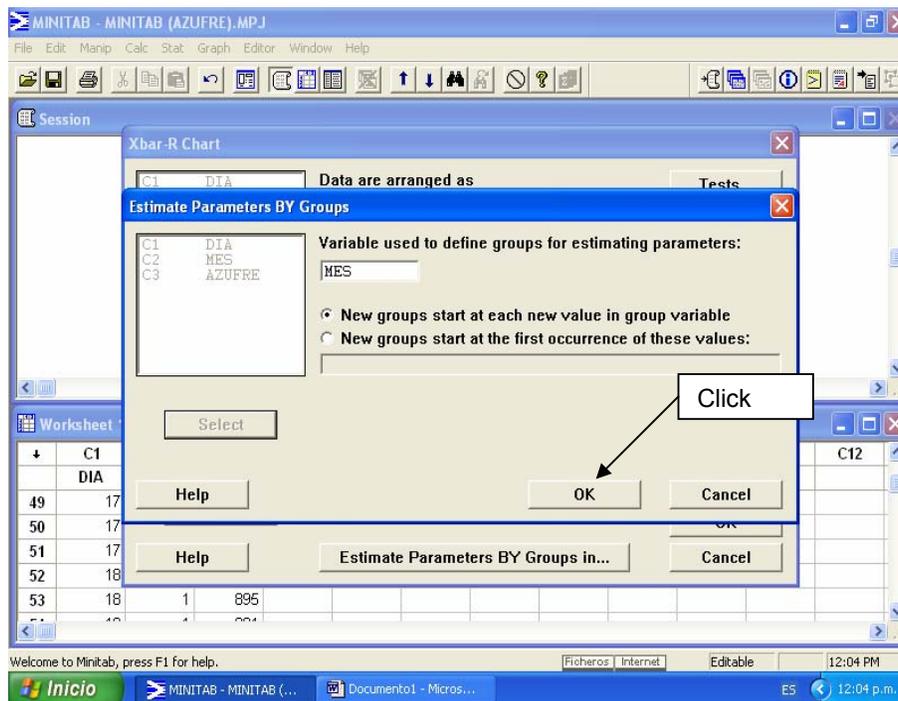
Ahora se presenta el procedimiento para el estudio de Gráficos de control para variables en MINITAB.

- 1.-Seleccionando las siguientes opciones Stat> Control Charts> Variables Charts for Subgrupos>  $\bar{X}$ -R aparece la siguiente ventana:



2.-Estando en la ventana de  $\bar{X}$ -R se introducen los datos requeridos, como se muestra a continuación:





3.-Para finalizar se obtiene una gráfica de control para variables  $\bar{X}$ -R como se muestra:

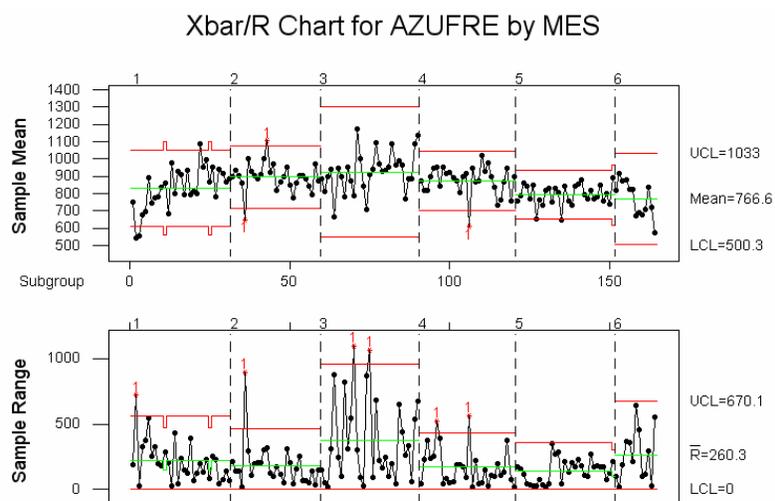


FIGURA 3.4.1 Gráfica de control para variables  $\bar{X}$ -R

# **CAPÍTULO IV.**

## **OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE**

### **4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS.**

**T**omando como referencia la teoría estadística, en especial el **Control Estadístico de Procesos**, metodología que utilizando fundamentalmente gráficos permite monitorizar la estabilidad (calidad) de un proceso de producción o de suministro de un servicio, de forma que se detecte, cuanto antes, cualquier situación inadecuada; lo que permitirá eliminar las causas especiales de variabilidad en la obtención del resultado final. Se trata de un lenguaje matemático con el cual los administradores y operadores pueden entender "lo que las máquinas dicen".

#### CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE

Es una técnica estadística, de uso muy extendido, para asegurar que los procesos cumplen con los estándares. Todos los procesos están sujetos a ciertos grados de variabilidad, por tal motivo es necesario distinguir entre las variaciones por causas *naturales* y por causas *imputables*, desarrollando una herramienta simple pero eficaz para separarlas: **el gráfico de control**.

Para obtener las lecturas que se ocuparon para el análisis de datos del contenido de Azufre de la muestra de gasolina Magna resto del país se siguió la siguiente metodología utilizando el Procedimiento SQ-LA-1225 y aplicando el método de prueba ASTM D-4294 que menciona lo siguiente:

- Este método de prueba cubre la medida del Azufre en Hidrocarburos, tales como: Diesel, Nafta, Keroseno, Residuales, Lubricantes a base de aceite, aceites hidráulicos, gas-avión, petróleo crudo, **gasolina** (todo lo relacionado), y otros destilados.
- Provee rápido y preciso medidas del Azufre total en los Productos del Petróleo con un mínimo de preparación de muestra. Un análisis típico lleva entre 2 y 4 minutos por muestra.
- La calidad de muchos productos petrolíferos esta relacionada a la cantidad de Azufre presente. Saber la concentración de Azufre es necesario para el objetivo del tratamiento.
- Provee una media de conformidad con las especificaciones o límites establecidos por las reglas para el contenido de Azufre en los Productos del Petróleo.
- Comparado a los otros métodos de prueba para determinar el Azufre, el Método de Prueba D-4294 tiene importancia de alto rendimiento, preparación de muestra mínima, buena precisión y es capaz de determinar Azufre sobre un rango amplio de concentraciones. El equipo especificado es en la mayoría de los casos menos costoso que los requeridos por los métodos alternativos.

En el Laboratorio de Control de la Superintendencia de Química de la Refinería, es donde se ejecuta el Método de Prueba ASTM D-4294 “Procedimiento para determinar bajas concentraciones de Azufre en destilados del Petróleo”, el cual tiene como objetivo de Cubrir la medida de Azufre en Hidrocarburos.

**4.1.1 EQUIPO, MATERIAL Y REACTIVOS.**

- ❖ Analizador de Energía Fluorescente dispersa por Rayos X, “HORIBA”

FIGURA 1. ANALIZADOR HORIBA



- ❖ Celda para colocar la muestra, mínimo 4 mm de profunda.
- ❖ Filtro de plástico transparente.



## CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE

- ❖ Azufre Butílico Di-n (DBS), un estándar de la pureza elevada con un análisis certificado para el contenido del Azufre. Utilizar el contenido certificado del Azufre al calcular las concentraciones exactas de la calibración estándar.



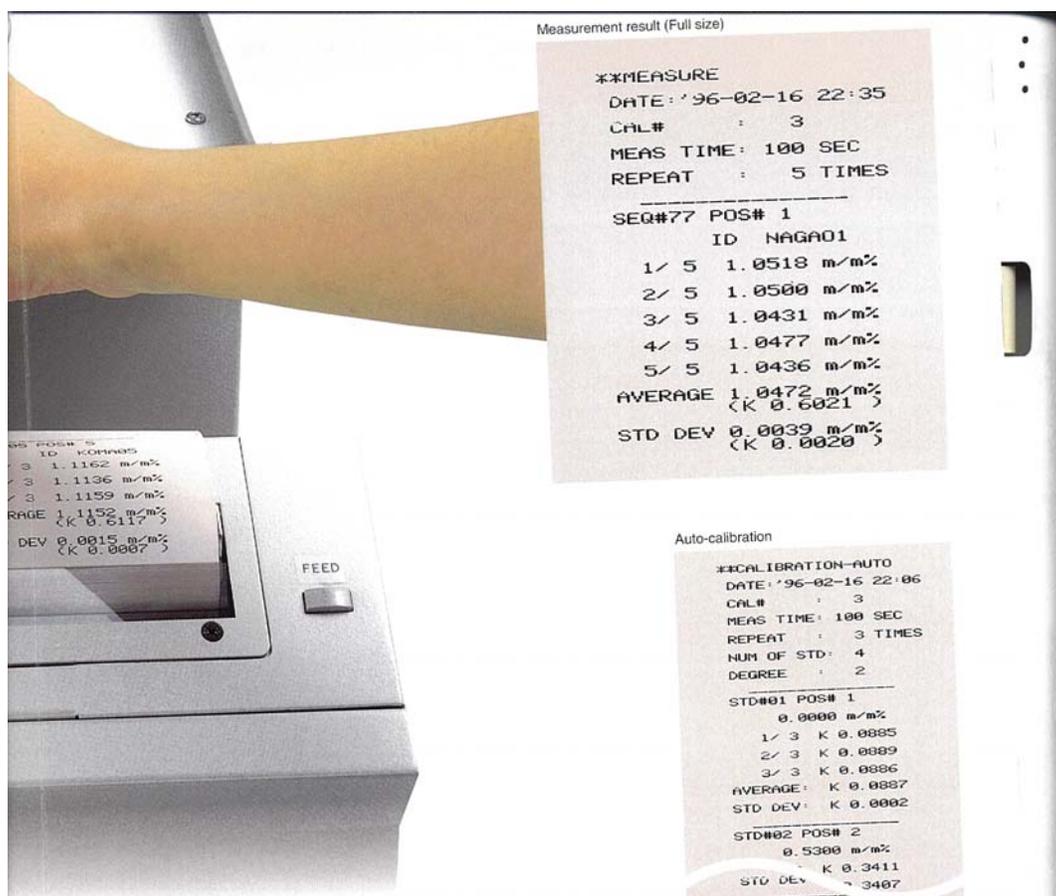
Measurement condition menu

|                |           |       |
|----------------|-----------|-------|
| CONDITION      |           | %/PPm |
| MEAS TIME(SEC) |           |       |
| 10             | 30        | 100   |
| 300            | 600       |       |
| REPEAT TIMES   |           | REP   |
| 1              | 3         | 5     |
| 10             | 99        |       |
| CALIB No.      |           | UNIT  |
| 1              | 2 3 4 5 A | m/m%  |
|                |           | EXIT  |

## CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE

- ❖ Representación o Impresor, muestra que las lecturas están dentro del porcentaje de masa del Azufre.





#### 4.1.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- ❖ La muestra que se analiza de la gasolina Magna resto del país es una mezcla de 3 pequeñas muestras tomadas de un tanque de almacenamiento (en el fondo, a la mitad y el nivel máximo del tanque) y posteriormente es colocada en una botella tequilera de un litro.
- ❖ La muestra se transporta con ayuda de un carrito al Laboratorio de Control o también llamado Laboratorio Experimental, esto obviamente lo realiza el encargado de repartir las muestras en las diferentes áreas.
- ❖ Ya en el laboratorio la muestra es analizado por el Probador Físico, el cual debe tomar las medidas de seguridad pertinentes, tales como usar lentes contra impacto, guantes, botas de seguridad y ropa adecuada como camisola y pantalón de algodón.

Estando en el Laboratorio:

- ❖ El Probador Físico debe verificar que la muestra vaya bien tapada y libre de humedad, en caso de no cumplir esto tiene que pasarla por papel filtro para eliminársela, o bien volver a tomar otra muestra.
- ❖ Corroborar que las celdas estén limpias y secas antes de uso.

- ❖ Evitar tocar el interior de la celda que va a ser expuesta a los Rayos X ya que el aceite de las huellas digitales puede afectar la lectura al analizar los niveles de Azufre.
- ❖ La muestra debe ser analizada inmediatamente después de verter dentro de la celda, teniendo en cuenta el escape de las burbujas de aire causadas por el revoloteo.
- ❖ Cubrir perfectamente la celda con el filtro transparente evitando que pueda arrugarse, de modo que es esencial que el filtro este tenso y limpio para asegurar resultados confiables. El analizador necesitará la recalibración si el tipo o el grueso del filtro se cambia.
- ❖ Posteriormente se introduce la muestra en el analizador Horiba, verificando que en la máquina se registre que se trata de Gasolina Magna de igual forma marcando el tiempo establecido para el análisis.
- ❖ Ya realizado el análisis de Azufre la Máquina Horiba nos imprime el resultado automáticamente, muestra que las lecturas están dentro del porcentaje de masa del Azufre, claro, también muestra los casos contrarios.
  - Quando el valor del contenido de Azufre en la gasolina esté fuera de la especificación se le informará al ingeniero de calidad de área, quien dará aviso al personal de operación del sector IV.
- ❖ Inmediatamente el analizador registra los datos en la bitácora y posteriormente en el SICOLAB.
- ❖ Cuando las pruebas han concluido, el remanente de las muestras es vertido en tambores de 200 L, para posteriormente ser transportados al área de efluentes para su desecho.

### 4.1.3 RECOLECCIÓN DE DATOS

Como se ha dicho anteriormente, es importante controlar el contenido de Azufre en la gasolina, ya que es fundamental que estos niveles sean bajos para que la calidad de la misma sea buena.

De igual forma, sabemos que para verificar el rango de Azufre aplicamos el método de prueba ASTM D-4294, descrito en el Capítulo III, el cual parte de la **NOM-086-ECOL-2006**, para corroborar que las lecturas del Contenido de Azufre en la Gasolina Magna resto del país cumplan las especificaciones marcadas por la misma.

El Laboratorio de Control de la Superintendencia de Química de la Refinería Miguel Hidalgo, proporciona periódicamente los resultados obtenidos por este método de prueba, realizando 3 pruebas al día, regularmente una prueba por turno, el probador físico es el encargado de ejecutar este método con los lineamientos correspondientes. Las lecturas obtenidas por el analizador Horiba son registradas en la bitácora y posteriormente en el SICOLAB.

SICOLAB es un sistema de control del Laboratorio en el cual se registran todas las pruebas realizadas a los diferentes productos intermedios y terminados elaborados por las 6 Refinerías de PEMEX y que ayuda para que todas estas áreas estén enteradas de cuales propiedades no cubren las especificaciones establecidas por la norma y puedan tomar las acciones correspondientes.

#### CAPÍTULO IV. OBTENCIÓN DE LAS LECTURAS DEL CONTENIDO DE AZUFRE

En este sistema podemos observar por categoría del producto, las cuales están divididas de la siguiente manera:

- Por producto
- Por zona
- Por planta
- Por sector
- Fecha que se indique

Toda la información que es reportada en el SICOLAB es interpretada y procesada por el laboratorio de control para ajustar las condiciones de operación, si es necesario.

Para este estudio se recolectaron directamente del software SICOLAB lecturas de la Refinería Miguel Hidalgo, de la categoría *por producto terminado* de la Gasolina Magna resto del país y se tomaron 164 subgrupos cada uno de 3 lecturas, las cuales corresponden del día 1° de Enero hasta el día 13 de Junio de 2006.

Esta información se recolecto con la finalidad de presentar un seguimiento completo durante 6 meses y predecir el comportamiento de este proceso para los primeros 6 meses del año 2007.

En consecuencia, la variable a estudiar es el contenido de Azufre establecido en ppm (partes por millón).

# CAPÍTULO V.

## APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

**C**on la finalidad de ahorrar tiempo y aprovechar los programas computacionales que permiten realizar los cálculos tediosos del control estadístico del proceso con poca o ninguna dificultad, se escogió el programa MINITAB para: el análisis del estudio de capacidad, la detección de posibles variaciones en el valor medio, medir la variación y detectar la posible existencia de causas especiales, del contenido de azufre en la gasolina.

En esta investigación como ya se menciona en el capítulo IV la variable de salida a controlar es el contenido de Azufre en ppm y sobre el cual se aplicó el control estadístico de calidad para corroborar que cumpla con las especificaciones establecidas por la NOM-086.

Primeramente se obtuvo el desempeño actual del Contenido de Azufre (ppm), mediante el análisis de su capacidad, utilizando histogramas, obteniendo índices de capacidad y desempeño observado (porcentaje en partes por millón de los datos fuera de especificación) con el fin de encontrar variaciones que se producen en los datos.

En la gráfica 5.1 se muestra el estudio de capacidad para el contenido de Azufre obtenido con ayuda del software MINITAB.

MINITAB nos arroja la siguiente información, iniciando con los Datos del Proceso (Process Data):

**USL** (Especificación o tolerancia Superior del contenido de Azufre) la cual es de 1033 ppm.

**LSL** (Especificación o tolerancia Inferior del contenido de Azufre) la cual es de 500.30 ppm.

**Mean** (Media del Proceso) esta medida de tendencia central nos indica que la distribución de los datos de la muestra tienden a acumularse en 853.02, se obtuvo de la ecuación  $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{492} X_i}{492}$  y de los datos que se encuentran en el apéndice 1.

**Sample N** (tamaño de la muestra) es el número de datos que se tomaron para realizar el estudio de Capacidad del contenido de azufre los cuales fueron 492.

**StDev Overall** (Desviación estándar a largo plazo) indica la variabilidad total del proceso, incluye la variación entre subgrupos esta dada por el valor de 169.379, se obtuvo de la ecuación  $S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{492} (x_i - \bar{x})^2}}{492}$  y de los datos que se encuentran en el apéndice 1.

**StDev Within** (Desviación estándar a corto plazo) se refiere a la variabilidad dentro de los subgrupos la cual resulto de 158.909 y se obtuvo de la siguiente ecuación:  $S_{within} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{492} (S_i^2)}{492}}$  y de los datos que se encuentran en el apéndice 1.

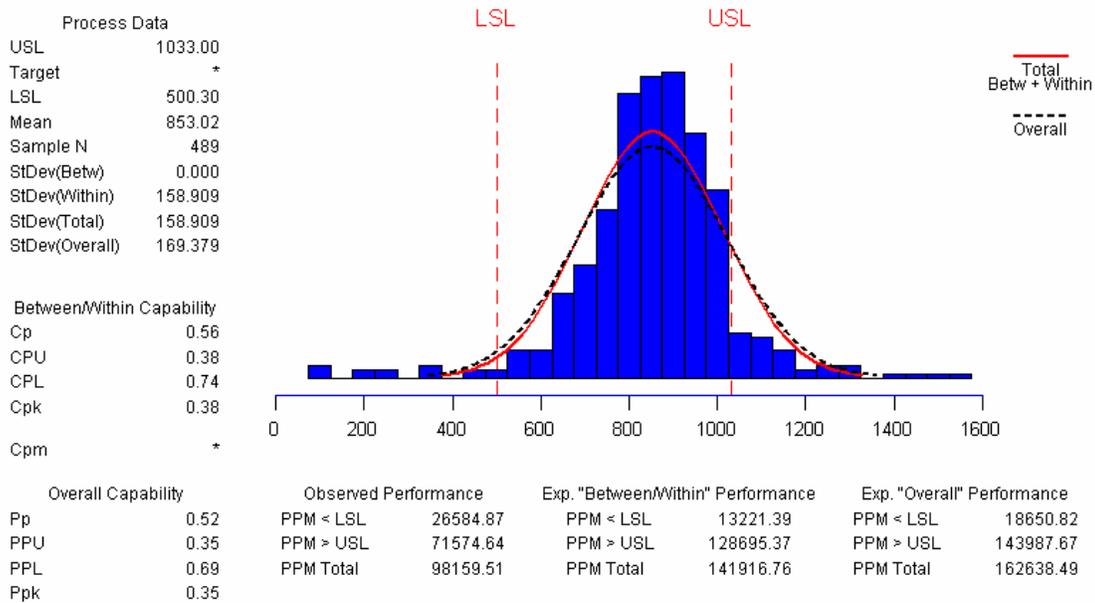
Del histograma de la figura 5.1 observamos que algunas lecturas de azufre están fuera de ambas especificaciones (superior e inferior). La curva gruesa es la distribución potencial (variación de corto plazo) que se tendría si se reduce la variabilidad entre subgrupos a los niveles de la variación dentro de subgrupos. La curva punteada y más amplia es la variación actual que tiene el azufre.

Ahora, la capacidad del contenido de azufre a corto plazo esta dada por el índice de capacidad  $C_{pk}$ , el cual tiene un valor de 0.38 que es pequeño comparado con el valor de 1.25 (mencionado en la tabla 2.5.2.1), lo que indica que el proceso es incapaz de cumplir con las especificaciones, así mismo la

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

capacidad a largo plazo no garantiza el cumplimiento de la especificación superior notando que el valor de  $P_{pk}$  es 0.35, menor que 1.25, el cual sirve para considerar si el proceso es adecuado. Esto lleva a que 162038 PPM están fuera de especificaciones. Los índices de capacidad  $C_{pk}$  y  $P_{pk}$  se calcularon con la fórmula 10 para el primero y para el segundo con la fórmula 13 que se encuentran en el apartado 2.7.3.

**Análisis de Capacidad de Proceso para el Azufre**



GRÁFICA 5.1 Análisis de Capacidad

En base a los índices de capacidad real a largo plazo el proceso es incapaz de cumplir con la especificación y además se puede observar que los extremos de la campana que representa la variabilidad teórica global de este proceso quedan fuera de ambos límites, lo que significa que no hay suficiente control en este proceso, por lo tanto realizamos un estudio de estabilidad para conocer el estado inicial del proceso, de igual forma encontrar las causas especiales de este proceso, esto mediante una gráfica de control  $\bar{X} - R$ .

Recordando lo que se dijo en el CEP a cerca de los gráficos por variables, nos sirven para controlar una característica de calidad de algún producto o de igual forma conocida como variable de salida de un proceso. Por lo tanto se realizó la gráfica de control  $\bar{X} - R$  para detectar posibles variaciones en el valor medio, en este caso, el contenido de azufre, para medir la variación del proceso y detectar la posible existencia de causas especiales.

La gráfica de control  $\bar{X}$ -R se elaboró con subgrupos de tamaño tres, los cuales se formaron de acuerdo al tiempo de producción, y las lecturas se tomaron consecutivamente desde el 1er día del mes de Enero hasta el día 13 del mes de Junio.

En la gráfica 5.2 se muestra la gráfica de control  $\bar{X}$ -R del contenido de Azufre por meses obtenido con ayuda del software MINITAB, con la cual podemos apreciar que si hay control en el proceso, ya que en la gráfica  $\bar{X}$  aparecen sólo 3 puntos o subgrupos que quedan fuera de los límites de control establecidos en cada mes (36, 43 y 106). Los puntos están ubicados en los meses de febrero y abril.

También podemos observar que en la gráfica de rangos ( R ) hay 6 subgrupos fuera de los límites de control establecidos por mes (2, 36, 70, 75, 96 y 106), pero lo que nos provoca inquietud en el proceso es la variación que existe en el mes de marzo, la cual nos hace pensar en las posibles causas de esta situación; algunas de ellas podrían ser: la mala capacitación que tuvo el probador físico o simplemente el descuido que pudo haber tenido al tomar la lectura, el desgaste del equipo, mala calibración, etc.

Este hecho indica la presencia de causas especiales, es decir, existen factores que producen variaciones de calidad que es posible identificar y corregir. Estos factores como anteriormente se menciona pueden ser mano de obra, materia prima, laboratorio, equipo ó metodología.

Si aplicamos el criterio de puntos fuera de los límites por mes en la gráfica  $\bar{X}$ , podemos observar que de 28 puntos del mes de Febrero sólo 2 están fuera de los límites de control y de 31 de Marzo 1 está fuera de los límites de control.

Considerando los puntos fuera, realizamos una estimación del índice de inestabilidad para cada mes:

$$S_i \text{ febrero} = \frac{2}{28} \times 100 = 7\%$$

$$S_i \text{ marzo} = \frac{1}{31} \times 100 = 3\%$$

De igual forma para la gráfica R vemos que en los meses de Enero y Febrero, 1 punto está fuera de los límites de control y en los meses de Marzo y Abril 2 puntos son los que están fuera correspondientes a cada mes, de la misma manera obtenemos el índice de inestabilidad para cada mes:

$$S_i \text{ enero} = \frac{1}{31} \times 100 = 3\%$$

$$S_i \text{ febrero} = \frac{1}{28} \times 100 = 3\%$$

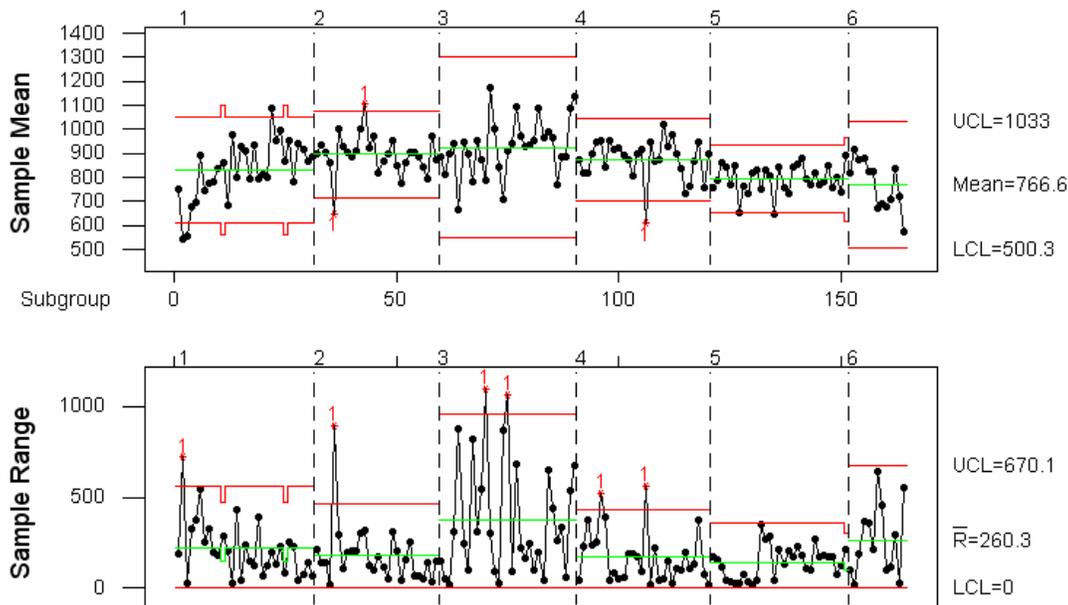
$$S_i \text{ marzo} = \frac{2}{31} \times 100 = 6\%$$

$$S_i \text{ abril} = \frac{2}{30} \times 100 = 6\%$$

Sólo el índice de inestabilidad del mes de Febrero en la gráfica  $\bar{X}$  muestra un porcentaje grande con respecto al 5%, el cual teóricamente representa un proceso con estabilidad regular, por lo que el proceso puede considerarse regularmente estable en cuanto a tendencia central. De igual forma los índices

de inestabilidad del mes de Marzo y Abril en la gráfica R indican un porcentaje mayor a 5%, en consecuencia el proceso se considera inestable hablando de dispersión.

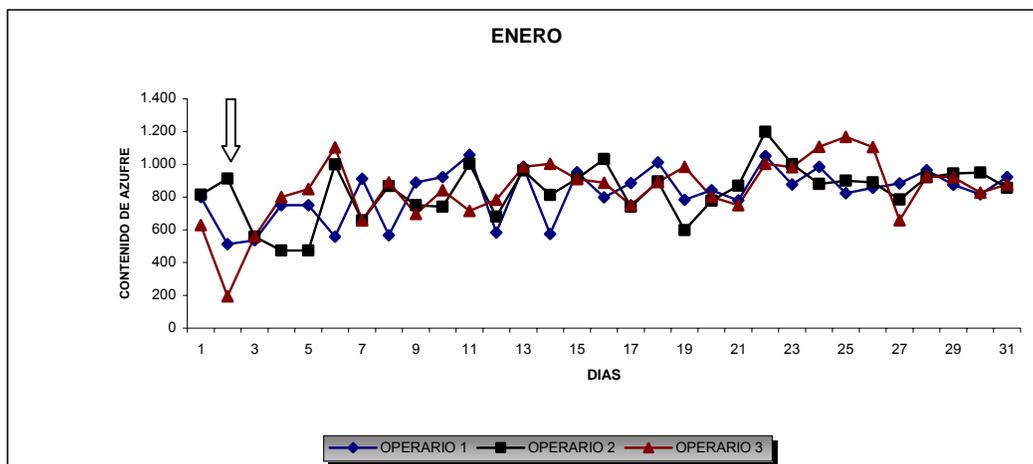
### Gráfica Xbar/R para el Azufre por Mes



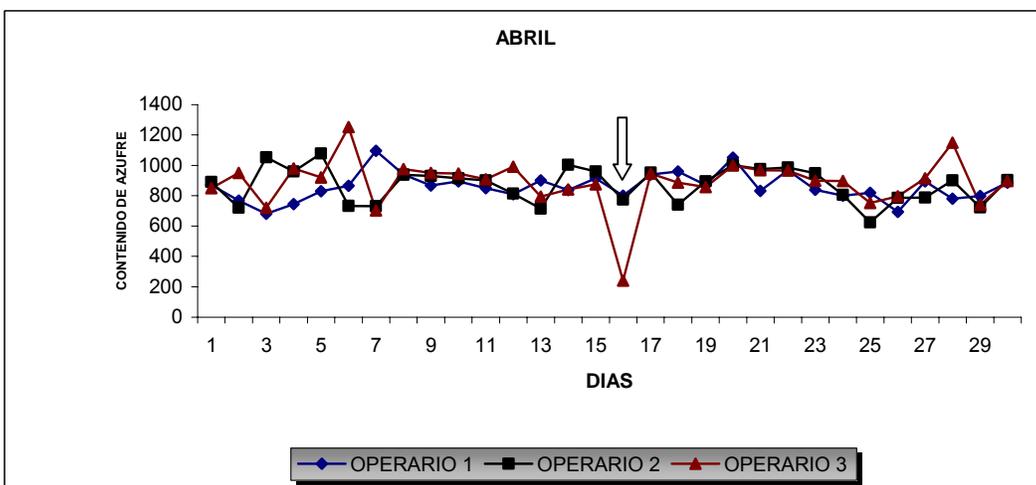
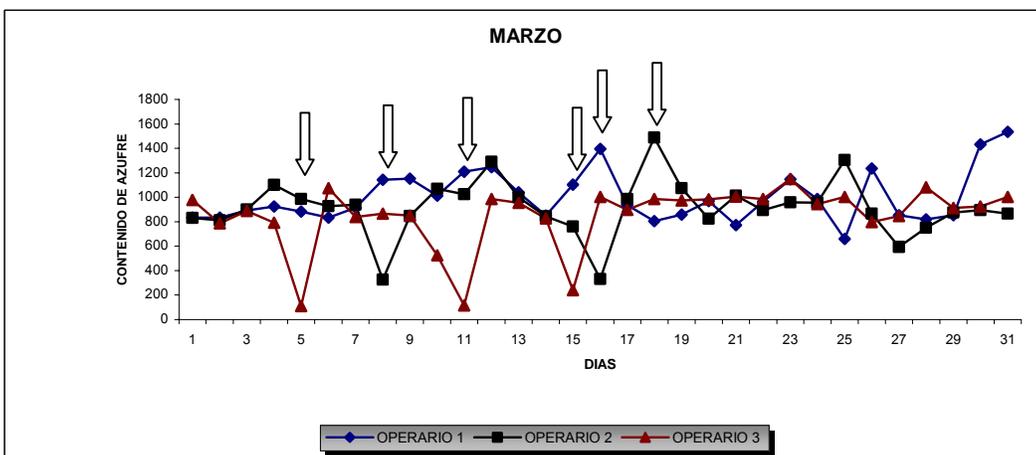
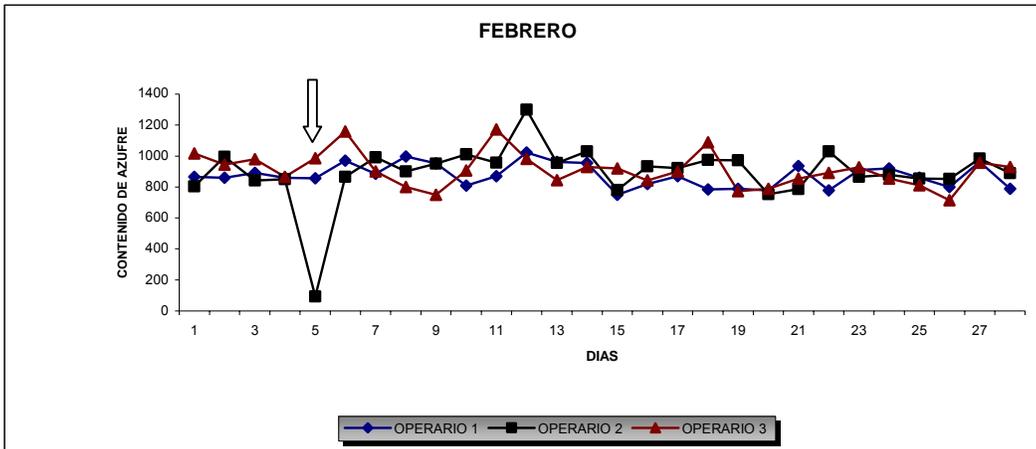
GRÁFICA 5.2 Control  $\bar{X}$ -R

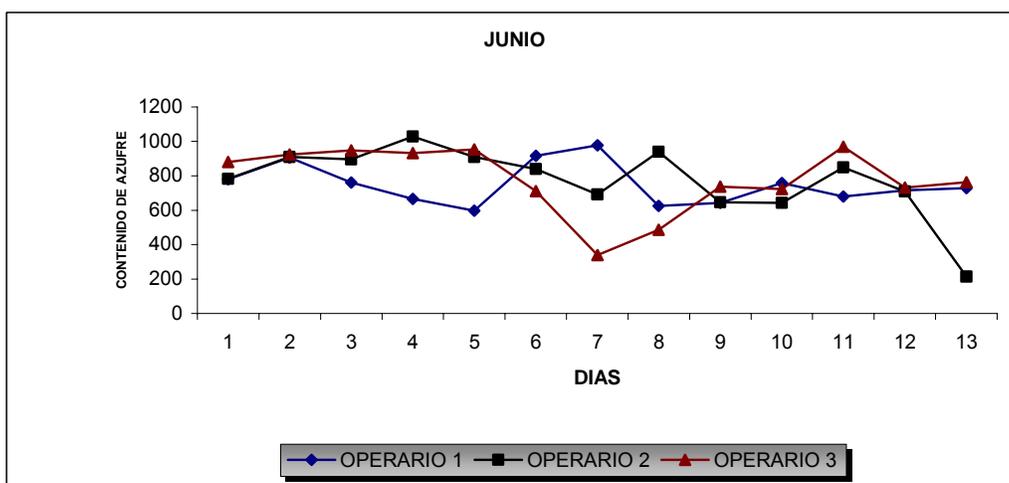
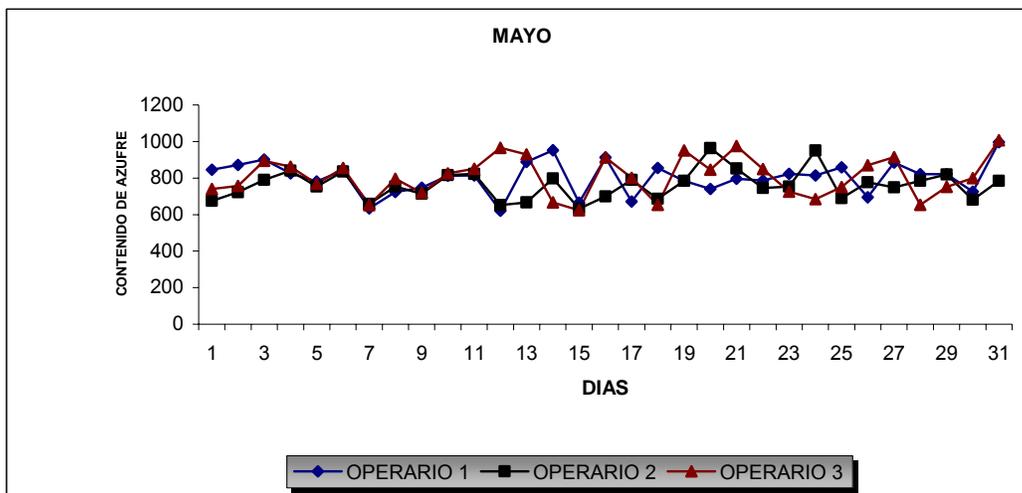
Por lo tanto el proceso observado es inestable e incapaz, esto indica que en el proceso existen causas especiales, es decir, factores que producen variaciones de calidad, las cuales son posibles identificar y corregir

Realizamos una gráfica para el Contenido de Azufre por mes para observar el desempeño del Método ASTM D-4294, con el propósito de encontrar las causas de inestabilidad e incapacidad del proceso.



CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS





De las figuras anteriores se puede observar que en las lecturas señaladas existe un rango fuera de los límites de control, por lo que se observó que los operarios 2 y 3 obtienen lecturas muy elevadas o bajas dependiendo el mes, al realizar una inspección en el laboratorio para analizar los resultados y encontrar una posible causa de inestabilidad, primeramente revisamos la bitácora, la cual mostró que las lecturas fueron introducidas correctamente al Sicolab, sin embargo se encontró mediante el registro de los trabajadores que realizaron las pruebas, que las personas indicadas en tomar las lecturas del 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> turno, una no se presentó y la otra estaba de vacaciones, respectivamente, por lo que otras personas ajenas a la operación tuvieron que realizar sus actividades, las cuales no estaban capacitadas para llevar a cabo este método de prueba. Se corroboraron los datos con el encargado del laboratorio y se confirmó que la gasolina magna esos días en el 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> turno no estaba dentro de la categoría de producto terminado y los datos no se debieron introducir al Sicolab, esto se comprobó con la bitácora de registro por categoría de producto terminado.

Se hicieron los cálculos manualmente para poder elaborar las gráficas de control  $\bar{X}$ -R por mes para el contenido de azufre, con el fin de corroborar que el software utilizado es confiable al brindarnos los resultados.

A continuación se presentan los cálculos:

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE ENERO |                |                |                |               |                |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| DIA                    | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | $\bar{X}_i$   | R <sub>i</sub> |
| 1                      | 800            | 814            | 629            | 747.67        | 185            |
| 2                      | 512            | 913            | 194            | 539.67        | 719            |
| 3                      | 536            | 559            | 559            | 551.33        | 23             |
| 4                      | 751            | 474            | 800            | 675.00        | 326            |
| 5                      | 751            | 474            | 850            | 691.67        | 376            |
| 6                      | 559            | 1,000          | 1,104          | 887.67        | 545            |
| 7                      | 911            | 657            | 657            | 741.67        | 254            |
| 8                      | 567            | 867            | 890            | 774.67        | 323            |
| 9                      | 890            | 750            | 697            | 779.00        | 193            |
| 10                     | 923            | 742            | 842            | 835.67        | 181            |
| 11                     | 1,058          | 1,002          | 716            | 925.33        | 342            |
| 12                     | 584            | 680            | 784            | 682.67        | 200            |
| 13                     | 985            | 963            | 984            | 977.33        | 22             |
| 14                     | 574            | 812            | 1,002          | 796.00        | 428            |
| 15                     | 951            | 912            | 909            | 924.00        | 42             |
| 16                     | 797            | 1,032          | 887            | 905.33        | 235            |
| 17                     | 886            | 741            | 750            | 792.33        | 145            |
| 18                     | 1,012          | 895            | 891            | 932.67        | 121            |
| 19                     | 784            | 598            | 985            | 789.00        | 387            |
| 20                     | 842            | 778            | 802            | 807.33        | 64             |
| 21                     | 780            | 869            | 750            | 799.67        | 119            |
| 22                     | 1,050          | 1,199          | 1,002          | 1083.67       | 197            |
| 23                     | 876            | 1,001          | 982            | 953.00        | 125            |
| 24                     | 985            | 880            | 1,108          | 991.00        | 228            |
| 25                     | 824            | 900            | 1,168          | 964.00        | 344            |
| 26                     | 856            | 890            | 1,105          | 950.33        | 249            |
| 27                     | 884            | 785            | 658            | 775.67        | 226            |
| 28                     | 964            | 921            | 927            | 937.33        | 43             |
| 29                     | 874            | 945            | 921            | 913.33        | 71             |
| 30                     | 817            | 950            | 827            | 864.67        | 133            |
| 31                     | 923            | 856            | 876            | 885.00        | 67             |
|                        |                |                |                | $\bar{X}$     | $\bar{R}$      |
|                        |                |                |                | <b>834.63</b> | <b>223</b>     |

□ **Para el mes de Enero:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{25863.68}{31} = 834.312$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{223}{1.693} = 131.72$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{131.72}{\sqrt{31}} = 76.05$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 834.312 + (1.023)(223) = 1062.441$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 834.312 - (1.023)(223) = 606.183$$

$$LCS = 1062.441$$

$$\bar{x} = 834.312$$

$$LCI = 606.183$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(223) = 573.8905$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 223$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(223) = 0$$

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE FEBRERO |       |       |       |               |               |
|--------------------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|
| DIA                      | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\bar{X}_i$   | $R_i$         |
| 1                        | 865   | 804   | 1017  | 895,33        | 213           |
| 2                        | 860   | 995   | 944   | 933,00        | 135           |
| 3                        | 890   | 842   | 980   | 904,00        | 138           |
| 4                        | 860   | 850   | 865   | 858,33        | 15            |
| 5                        | 855   | 92    | 985   | 644,00        | 893           |
| 6                        | 970   | 865   | 1157  | 997,33        | 292           |
| 7                        | 884   | 991   | 900   | 925,00        | 107           |
| 8                        | 997   | 900   | 800   | 899,00        | 197           |
| 9                        | 953   | 950   | 750   | 884,33        | 203           |
| 10                       | 809   | 1011  | 907   | 909,00        | 202           |
| 11                       | 869   | 956   | 1172  | 999,00        | 303           |
| 12                       | 1023  | 1300  | 982   | 1101,67       | 318           |
| 13                       | 963   | 954   | 844   | 920,33        | 119           |
| 14                       | 954   | 1030  | 930   | 971,33        | 100           |
| 15                       | 750   | 780   | 920   | 816,67        | 170           |
| 16                       | 820   | 934   | 843   | 865,67        | 114           |
| 17                       | 870   | 921   | 900   | 897,00        | 51            |
| 18                       | 785   | 974   | 1089  | 949,33        | 304           |
| 19                       | 789   | 973   | 773   | 845,00        | 200           |
| 20                       | 778   | 753   | 789   | 773,33        | 36            |
| 21                       | 935   | 786   | 854   | 858,33        | 149           |
| 22                       | 778   | 1030  | 890   | 899,33        | 252           |
| 23                       | 911   | 865   | 927   | 901,00        | 62            |
| 24                       | 919   | 879   | 854   | 884,00        | 65            |
| 25                       | 859   | 853   | 811   | 841,00        | 48            |
| 26                       | 800   | 852   | 714   | 788,67        | 138           |
| 27                       | 962   | 984   | 956   | 967,33        | 28            |
| 28                       | 789   | 889   | 930   | 869,33        | 141           |
|                          |       |       |       | $\bar{X}$     | $\bar{R}$     |
|                          |       |       |       | <b>892,77</b> | <b>178,32</b> |

□ **Para el mes de Febrero:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{24995.47}{28} = 892.71$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{178.32}{1.693} = 105.33$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{105.33}{\sqrt{28}} = 60.81$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 892.71 + (1.023)(178.32) = 1075.73$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 892.71 - (1.023)(178.32) = 710.29$$

$$LCS = 1075.73$$

$$\bar{x} = 892.71$$

$$LCI = 710.29$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(178.32) = 458.90652$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 178.32$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(178.32) = 0$$

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE MARZO |       |       |       |               |            |
|------------------------|-------|-------|-------|---------------|------------|
| DIA                    | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\bar{X}_i$   | $R_i$      |
| 1                      | 834   | 832   | 979   | 881,67        | 147        |
| 2                      | 835   | 811   | 787   | 811,00        | 48         |
| 3                      | 893   | 901   | 887   | 893,67        | 14         |
| 4                      | 925   | 1100  | 792   | 939,00        | 308        |
| 5                      | 884   | 986   | 111   | 660,33        | 875        |
| 6                      | 835   | 928   | 1074  | 945,67        | 239        |
| 7                      | 915   | 939   | 839   | 897,67        | 100        |
| 8                      | 1143  | 325   | 865   | 777,67        | 818        |
| 9                      | 1152  | 846   | 850   | 949,33        | 306        |
| 10                     | 1014  | 1070  | 525   | 869,67        | 545        |
| 11                     | 1209  | 1025  | 115   | 783,00        | 1094       |
| 12                     | 1245  | 1289  | 987   | 1173,67       | 302        |
| 13                     | 1040  | 1000  | 954   | 998,00        | 86         |
| 14                     | 851   | 843   | 827   | 840,33        | 24         |
| 15                     | 1104  | 761   | 240   | 701,67        | 864        |
| 16                     | 1395  | 331   | 1002  | 909,33        | 1064       |
| 17                     | 936   | 985   | 898   | 939,67        | 87         |
| 18                     | 805   | 1489  | 985   | 1093,00       | 684        |
| 19                     | 858   | 1075  | 974   | 969,00        | 217        |
| 20                     | 968   | 823   | 984   | 925,00        | 161        |
| 21                     | 773   | 1014  | 1006  | 931,00        | 241        |
| 22                     | 964   | 895   | 987   | 948,67        | 92         |
| 23                     | 1148  | 958   | 1151  | 1085,67       | 193        |
| 24                     | 985   | 956   | 945   | 962,00        | 40         |
| 25                     | 660   | 1305  | 1004  | 989,67        | 645        |
| 26                     | 1235  | 865   | 798   | 966,00        | 437        |
| 27                     | 854   | 594   | 845   | 764,33        | 260        |
| 28                     | 820   | 750   | 1082  | 884,00        | 332        |
| 29                     | 854   | 876   | 912   | 880,67        | 58         |
| 30                     | 1431  | 896   | 924   | 1083,67       | 535        |
| 31                     | 1535  | 865   | 1002  | 1134,00       | 670        |
|                        |       |       |       | $\bar{X}$     | $\bar{R}$  |
|                        |       |       |       | <b>922,19</b> | <b>371</b> |

□ **Para el mes de Marzo:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{28578.03}{31} = 921.87$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{370.42}{1.693} = 218.80$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{218.88}{\sqrt{31}} = 126.32$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 921.87 + (1.023)(370.42) = 1300.81$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 921.87 - (1.023)(370.42) = 542.93$$

$$LCS = 1300.81$$

$$\bar{x} = 921.87$$

$$LCI = 542.93$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(370.42) = 953.27587$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 370.42$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(370.42) = 0$$

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE ABRIL |       |       |       |               |               |
|------------------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|
| DIA                    | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\bar{X}_i$   | $R_i$         |
| 1                      | 870   | 891   | 850   | 870,33        | 41            |
| 2                      | 769   | 720   | 950   | 813,00        | 230           |
| 3                      | 682   | 1053  | 720   | 818,33        | 371           |
| 4                      | 745   | 960   | 980   | 895,00        | 235           |
| 5                      | 830   | 1079  | 920   | 943,00        | 249           |
| 6                      | 865   | 732   | 1252  | 949,67        | 520           |
| 7                      | 1095  | 730   | 703   | 842,67        | 392           |
| 8                      | 940   | 937   | 976   | 951,00        | 39            |
| 9                      | 867   | 930   | 950   | 915,67        | 83            |
| 10                     | 894   | 914   | 945   | 917,67        | 51            |
| 11                     | 850   | 900   | 909   | 886,33        | 59            |
| 12                     | 809   | 813   | 991   | 871,00        | 182           |
| 13                     | 900   | 715   | 794   | 803,00        | 185           |
| 14                     | 837   | 1004  | 841   | 894,00        | 167           |
| 15                     | 915   | 959   | 874   | 916,00        | 85            |
| 16                     | 799   | 774   | 241   | 604,67        | 558           |
| 17                     | 940   | 952   | 945   | 945,67        | 12            |
| 18                     | 960   | 740   | 887   | 862,33        | 220           |
| 19                     | 870   | 894   | 856   | 873,33        | 38            |
| 20                     | 1050  | 1002  | 1000  | 1017,33       | 50            |
| 21                     | 832   | 975   | 968   | 925,00        | 143           |
| 22                     | 968   | 985   | 965   | 972,67        | 20            |
| 23                     | 839   | 947   | 899   | 895,00        | 108           |
| 24                     | 800   | 806   | 897   | 834,33        | 97            |
| 25                     | 820   | 624   | 752   | 732,00        | 196           |
| 26                     | 693   | 785   | 796   | 758,00        | 103           |
| 27                     | 894   | 787   | 914   | 865,00        | 127           |
| 28                     | 780   | 900   | 1150  | 943,33        | 370           |
| 29                     | 798   | 723   | 741   | 754,00        | 75            |
| 30                     | 887   | 903   | 897   | 895,67        | 16            |
|                        |       |       |       | $\bar{X}$     | $\bar{R}$     |
|                        |       |       |       | <b>872,17</b> | <b>167,40</b> |

□ **Para el mes de Abril:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{25322.33}{30} = 844.08$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{167.4}{1.693} = 98.88$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{98.88}{\sqrt{30}} = 57.09$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 844.08 + (1.023)(167.4) = 1015.33$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 844.08 - (1.023)(167.4) = 672.83$$

$$LCS = 1015.33$$

$$\bar{x} = 844.08$$

$$LCI = 672.83$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(167.4) = 430.8039$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 167.4$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(167.4) = 0$$

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE MAYO |       |       |       |               |            |
|-----------------------|-------|-------|-------|---------------|------------|
| DIA                   | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\bar{X}_i$   | $R_i$      |
| 1                     | 846   | 675   | 741   | 754,00        | 171        |
| 2                     | 871   | 722   | 756   | 783,00        | 149        |
| 3                     | 901   | 789   | 894   | 861,33        | 112        |
| 4                     | 825   | 841   | 862   | 842,67        | 37         |
| 5                     | 781   | 754   | 768   | 767,67        | 27         |
| 6                     | 842   | 835   | 856   | 844,33        | 21         |
| 7                     | 634   | 659   | 651   | 648,00        | 25         |
| 8                     | 724   | 754   | 796   | 758,00        | 72         |
| 9                     | 747   | 714   | 719   | 726,67        | 33         |
| 10                    | 812   | 816   | 825   | 817,67        | 13         |
| 11                    | 814   | 823   | 851   | 829,33        | 37         |
| 12                    | 620   | 652   | 966   | 746,00        | 346        |
| 13                    | 888   | 666   | 929   | 827,67        | 263        |
| 14                    | 952   | 797   | 667   | 805,33        | 285        |
| 15                    | 665   | 632   | 624   | 640,33        | 41         |
| 16                    | 913   | 700   | 912   | 841,67        | 213        |
| 17                    | 671   | 789   | 801   | 753,67        | 130        |
| 18                    | 855   | 686   | 654   | 731,67        | 201        |
| 19                    | 785   | 784   | 951   | 840,00        | 167        |
| 20                    | 741   | 963   | 845   | 849,67        | 222        |
| 21                    | 796   | 852   | 975   | 874,33        | 179        |
| 22                    | 786   | 746   | 849   | 793,67        | 103        |
| 23                    | 822   | 753   | 725   | 766,67        | 97         |
| 24                    | 814   | 951   | 684   | 816,33        | 267        |
| 25                    | 859   | 689   | 750   | 766,00        | 170        |
| 26                    | 695   | 777   | 870   | 780,67        | 175        |
| 27                    | 884   | 748   | 915   | 849,00        | 167        |
| 28                    | 821   | 785   | 654   | 753,33        | 167        |
| 29                    | 821   | 819   | 752   | 797,33        | 69         |
| 30                    | 725   | 681   | 800   | 735,33        | 119        |
| 31                    | 996   | 785   | 1007  | 929,33        | 222        |
|                       |       |       |       | $\bar{X}$     | $\bar{R}$  |
|                       |       |       |       | <b>791,31</b> | <b>139</b> |

□ **Para el mes de Mayo:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{24530.66}{31} = 791.31$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{134.23}{1.693} = 79.29$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{79.29}{\sqrt{31}} = 45.78$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 791.31 + (1.023)(134.23) = 928.63$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 791.31 - (1.023)(134.23) = 653.99$$

$$LCS = 928.63$$

$$\bar{x} = 791.31$$

$$LCI = 653.99$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(134.23) = 345.440905$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 134.23$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(134.23) = 0$$

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL CEP EN LA GASOLINA MAGNA RESTO DEL PAÍS  
Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

| DATOS DEL MES DE JUNIO |       |       |       |               |               |
|------------------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|
| DIA                    | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\bar{X}_i$   | $R_i$         |
| 1                      | 780   | 782   | 880   | 814,00        | 100           |
| 2                      | 905   | 909   | 923   | 912,33        | 18            |
| 3                      | 761   | 895   | 947   | 867,67        | 186           |
| 4                      | 666   | 1028  | 932   | 875,33        | 362           |
| 5                      | 597   | 909   | 953   | 819,67        | 356           |
| 6                      | 916   | 840   | 710   | 822,00        | 206           |
| 7                      | 977   | 692   | 340   | 669,67        | 637           |
| 8                      | 626   | 938   | 486   | 683,33        | 452           |
| 9                      | 643   | 647   | 736   | 675,33        | 93            |
| 10                     | 758   | 642   | 722   | 707,33        | 116           |
| 11                     | 680   | 849   | 968   | 832,33        | 288           |
| 12                     | 715   | 709   | 731   | 718,33        | 22            |
| 13                     | 728   | 214   | 762   | 568,00        | 548           |
|                        |       |       |       | $\bar{X}$     | $\bar{R}$     |
|                        |       |       |       | <b>766,56</b> | <b>260,31</b> |

□ **Para el mes de Junio:**

$$\mu_{\bar{x}} = \bar{x} = \frac{9965.32}{13} = 766.56$$

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{260.31}{1.693} = 153.76$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{153.73}{\sqrt{13}} = 88.78$$

Los límites de control para la carta de control  $\bar{x}$ , son:

$$LCS = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 766.56 + (1.023)(260.31) = 1032.86$$

$$LCI = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 766.56 - (1.023)(260.31) = 500.26$$

$$LCS = 1032.86$$

$$\bar{x} = 766.56$$

$$LCI = 500.26$$

Límites de Control para la Gráfica R:

$$LCS = D_4 \bar{R} = (2.5735)(260.31) = 669.907785$$

$$\text{Línea central} = \bar{R} = 260.31$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = (0)(260.31) = 0$$

Donde:

$\bar{\bar{X}}$  es la media de las medias de los subgrupos y esta dada por la ec.,

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{X}_i$$

donde  $\bar{X}_i$  es la media de cada subgrupo y esta dada por la ec.,

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij}$$

$R_i$  es el rango de cada subgrupo y esta dado por

$$R_i = \text{Max}\{X_{ij} / 1 \leq j \leq n\} - \text{Min}\{X_{ij} / 1 \leq j \leq n\}$$

$\bar{R}$  es el promedio de los  $R_i$  y esta dado por

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i$$

Los resultados que se obtuvieron realizando las operaciones manualmente fueron aproximados a los que el programa arrojó, por lo que se puede decir que es un programa confiable.

Nota:  $A_2$ ,  $D_4$  y  $D_3$  se obtuvieron del anexo tomando como tamaño de muestra  $n$  igual a 3 para el contenido de Azufre.

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El estudio realizado demuestra, que al aplicar un sistema de **Control Estadístico de Proceso**, podemos obtener grandes beneficios en el proceso de producción de una empresa cumpliendo con las especificaciones establecidas por norma y de igual forma la demanda del cliente es cubierta sin ningún problema.

A continuación mencionaremos algunos beneficios:

- Se detecta la fuente de cualquier error y se aplica su corrección.
- Se busca la constante capacitación del probador físico.
- Minimizamos desperdicios para la empresa y rechazos por parte del cliente.
- Confiabilidad del producto y consecuentemente mayor mercado.
- Reducción de costos y aumento de calidad.
- Entregas puntuales y seguras.

El objetivo de aplicar el método de Control Estadístico de Proceso fue determinar si el proceso, en este caso, que la gasolina tenga concentraciones bajas de azufre, era o no capaz de cumplir con las especificaciones, éstas ya establecidas por norma, las cuales son, lecturas de azufre dentro de los límites, como especificación inferior 0 ppm y especificación superior 1000 ppm; como resultado obtuvimos que el proceso no es capaz de cumplir con las especificaciones, lo que lleva a indagar las causas que provocan esto y realizar los ajustes y comentarios necesarios para alcanzar el objetivo primordial: **calidad en el producto**.

Además encontramos las causas especiales de variación e inestabilidad en el rango de contenido de Azufre en la gasolina Magna, las cuales deben tomarse en cuenta para el próximo periodo en el que se elabore la gasolina mencionada.

Como recomendación para la empresa, únicamente, que tenga cuidado en la elaboración de la gasolina, empezando desde las personas que realizan la mezcla de la misma, esto dentro de cada proceso ya que hay que tener en cuenta que cada uno debe cumplir con determinadas especificaciones, de igual forma mantener en constante capacitación a los probadores físicos que realizan las pruebas y toman las lecturas de Azufre porque cualquier descuido por insignificante que parezca puede influir en las variaciones y en consecuencia afectar la calidad del producto.

No olvidemos que algo importante es darle mantenimiento y tener calibrados los instrumentos y el equipo utilizado (automático y manual).

Aplicando correctamente el Control Estadístico de Proceso, las personas indicadas, en este caso Calidad, se dan cuenta de inmediato de la irregularidad del proceso y en caso que la hubiera proceden rápidamente a la corrección, logrando que el producto final cubra las especificaciones señaladas.

Por lo tanto el objetivo propuesto inicialmente se cumplió, al aplicar control estadístico de calidad, además se encontraron irregularidades en el proceso y se dieron propuestas para solucionarlas.

# BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Control Total de la Calidad  
Figenbaum, Armand V.  
Ed. CECSA, 6ta edición.  
México, D.F. 1989.
- 2.- Calidad, Productividad y Competitividad  
Deming, Edwards W.  
Ed. Díaz de Santos, S.A.  
Madrid 1990.
- 3.- Estadística  
Richard C. Weimer.  
Ed. CECSA 1era edición.  
México, 1996.
- 4.- TESIS "Control de Calidad. Control Estadístico de Proceso en la obtención del Dodecibencensulfonato de sodio como base para la elaboración detergente en Polvo"  
González Carmona Alberto  
México, D.F. 1993.
- 5.- Estadística Práctica con Minitab  
Pere Grima Cintas. etc.  
Esc. Técnica Superior de Ing. Industrial de Barcelona  
Ed. Pearson Prentice Hall
- 6.- Control Estadístico de la Calidad  
Cesar Pérez  
Ed. Alfaomega
- 7.- Control Estadístico de Calidad  
Av. Douglas C. Montgomery  
Ed. Iberoamérica

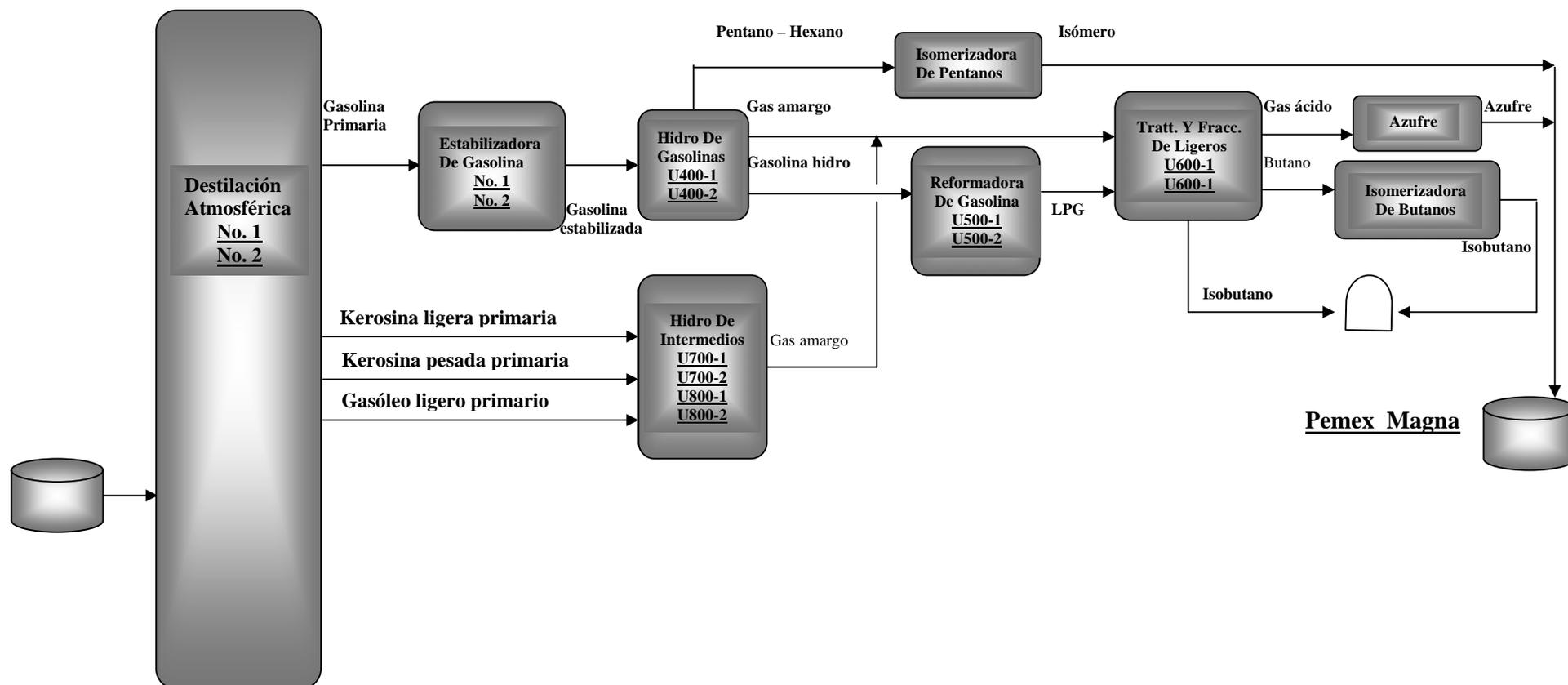


TABLA 1

## Factores para la construcción de las cartas de control

| Tamaño de muestra, n | Carta $\bar{X}$<br>A2 | d3    | Carta R<br>D3 | D4     | Carta S<br>c4 | Estimación de $\sigma$<br>d2 |
|----------------------|-----------------------|-------|---------------|--------|---------------|------------------------------|
|                      |                       |       |               |        |               |                              |
| 2                    | 1.880                 | 0.853 | 0.0000        | 3.2686 | 0.7979        | 1.128                        |
| 3                    | 1.023                 | 0.888 | 0.0000        | 2.5735 | 0.8862        | 1.693                        |
| 4                    | 0.729                 | 0.880 | 0.0000        | 2.2822 | 0.9213        | 2.059                        |
| 5                    | 0.577                 | 0.864 | 0.0000        | 2.1144 | 0.9400        | 2.326                        |
|                      |                       |       |               |        |               |                              |
| 6                    | 0.483                 | 0.848 | 0.0000        | 2.0039 | 0.9515        | 2.534                        |
| 7                    | 0.419                 | 0.833 | 0.0758        | 1.9242 | 0.9594        | 2.704                        |
| 8                    | 0.373                 | 0.820 | 0.1359        | 1.8641 | 0.9650        | 2.847                        |
| 9                    | 0.337                 | 0.808 | 0.1838        | 1.8162 | 0.9693        | 2.970                        |
| 10                   | 0.308                 | 0.797 | 0.2232        | 1.7768 | 0.9727        | 3.078                        |
|                      |                       |       |               |        |               |                              |
| 11                   | 0.285                 | 0.787 | 0.2559        | 1.7441 | 0.9754        | 3.173                        |
| 12                   | 0.266                 | 0.778 | 0.2836        | 1.7164 | 0.9776        | 3.258                        |
| 13                   | 0.249                 | 0.770 | 0.3076        | 1.6924 | 0.9794        | 3.336                        |
| 14                   | 0.235                 | 0.763 | 0.3281        | 1.6719 | 0.9810        | 3.407                        |
| 15                   | 0.223                 | 0.756 | 0.3468        | 1.6532 | 0.9823        | 3.472                        |
|                      |                       |       |               |        |               |                              |
| 16                   | 0.212                 | 0.750 | 0.3630        | 1.6370 | 0.9835        | 3.535                        |
| 17                   | 0.203                 | 0.744 | 0.3779        | 1.6221 | 0.9845        | 3.588                        |
| 18                   | 0.194                 | 0.739 | 0.3909        | 1.6091 | 0.9854        | 3.640                        |
| 19                   | 0.187                 | 0.734 | 0.4031        | 1.5969 | 0.9862        | 3.689                        |
| 20                   | 0.180                 | 0.729 | 0.4145        | 1.5855 | 0.9869        | 3.7535                       |
|                      |                       |       |               |        |               |                              |
| 21                   | 0.173                 | 0.724 | 0.4251        | 1.5749 | 0.9876        | 3.778                        |
| 22                   | 0.167                 | 0.720 | 0.4344        | 1.5656 | 0.9882        | 3.819                        |
| 23                   | 0.162                 | 0.716 | 0.4432        | 1.5568 | 0.9887        | 3.858                        |
| 24                   | 0.157                 | 0.712 | 0.4516        | 1.5484 | 0.9892        | 3.895                        |
| 25                   | 0.153                 | 0.708 | 0.4597        | 1.5403 | 0.9896        | 3.931                        |

Tabla de lecturas del Contenido de Azufre en la Gasolina Magna

| LECTURAS | MES | LECTURAS | MES | LECTURAS | MES        |
|----------|-----|----------|-----|----------|------------|
| 800      |     | 598      | 19  | 1157     |            |
| 814      | 1   | 985      |     | 884      | FEBRERO    |
| 629      |     | 842      |     | 991      | 7 FEBRERO  |
| 512      |     | 778      | 20  | 900      | FEBRERO    |
| 913      | 2   | 802      |     | 997      | FEBRERO    |
| 194      |     | 780      |     | 900      | 8 FEBRERO  |
| 536      |     | 869      | 21  | 800      | FEBRERO    |
| 559      | 3   | 750      |     | 953      | FEBRERO    |
| 559      |     | 1050     |     | 950      | 9 FEBRERO  |
| 751      |     | 1199     | 22  | 750      | FEBRERO    |
| 474      | 4   | 1002     |     | 809      | FEBRERO    |
| 800      |     | 876      |     | 1011     | 10 FEBRERO |
| 751      |     | 1001     | 23  | 907      | FEBRERO    |
| 474      | 5   | 982      |     | 869      | FEBRERO    |
| 850      |     | 985      |     | 956      | 11 FEBRERO |
| 559      |     | 880      | 24  | 1172     | FEBRERO    |
| 1000     | 6   | 1108     |     | 1023     | FEBRERO    |
| 1104     |     | 824      |     | 1300     | 12 FEBRERO |
| 911      |     | 900      | 25  | 982      | FEBRERO    |
| 657      | 7   | 1,168    |     | 963      | FEBRERO    |
| 657      |     | 856      |     | 954      | 13 FEBRERO |
| 567      |     | 890      | 26  | 844      | FEBRERO    |
| 867      | 8   | 1105     |     | 954      | FEBRERO    |
| 890      |     | 884      |     | 1030     | 14 FEBRERO |
| 890      |     | 785      | 27  | 930      | FEBRERO    |
| 750      | 9   | 658      |     | 750      | FEBRERO    |
| 697      |     | 964      |     | 780      | 15 FEBRERO |
| 923      |     | 921      | 28  | 920      | FEBRERO    |
| 742      | 10  | 927      |     | 820      | FEBRERO    |
| 842      |     | 874      |     | 934      | 16 FEBRERO |
| 1,058    |     | 945      | 29  | 843      | FEBRERO    |
| 1002     | 11  | 921      |     | 870      | FEBRERO    |
| 716      |     | 817      |     | 921      | 17 FEBRERO |
| 584      |     | 950      | 30  | 900      | FEBRERO    |
| 680      | 12  | 827      |     | 785      | FEBRERO    |
| 784      |     | 923      |     | 974      | 18 FEBRERO |
| 985      |     | 856      | 31  | 1089     | FEBRERO    |
| 963      | 13  | 876      |     | 789      | FEBRERO    |
| 984      |     | 865      |     | 973      | 19 FEBRERO |
| 574      |     | 804      | 1   | 773      | FEBRERO    |
| 812      | 14  | 1017     |     | 778      | FEBRERO    |
| 1002     |     | 860      |     | 753      | 20 FEBRERO |
| 951      |     | 995      | 2   | 789      | FEBRERO    |
| 912      | 15  | 944      |     | 935      | FEBRERO    |
| 909      |     | 890      |     | 786      | 21 FEBRERO |
| 797      |     | 842      | 3   | 854      | FEBRERO    |
| 1032     | 16  | 980      |     | 778      | FEBRERO    |
| 887      |     | 860      |     | 1030     | 22 FEBRERO |
| 886      |     | 850      | 4   | 890      | FEBRERO    |
| 741      | 17  | 865      |     | 911      | FEBRERO    |
| 750      |     | 855      |     | 865      | 23 FEBRERO |
| 1012     |     | 92       | 5   | 927      | FEBRERO    |
| 895      | 18  | 985      |     | 919      | FEBRERO    |
| 891      |     | 970      |     | 879      | 24 FEBRERO |
| 784      |     | 865      | 6   | 854      | FEBRERO    |

|      |    |         |  |      |    |       |  |      |    |       |
|------|----|---------|--|------|----|-------|--|------|----|-------|
| 859  |    | FEBRERO |  | 240  |    | MARZO |  | 1053 | 3  | ABRIL |
| 853  | 25 | FEBRERO |  | 1395 |    | MARZO |  | 720  |    | ABRIL |
| 811  |    | FEBRERO |  | 331  | 16 | MARZO |  | 745  |    | ABRIL |
| 800  |    | FEBRERO |  | 1002 |    | MARZO |  | 960  | 4  | ABRIL |
| 852  | 26 | FEBRERO |  | 936  |    | MARZO |  | 980  |    | ABRIL |
| 714  |    | FEBRERO |  | 985  | 17 | MARZO |  | 830  |    | ABRIL |
| 962  |    | FEBRERO |  | 898  |    | MARZO |  | 1079 | 5  | ABRIL |
| 984  | 27 | FEBRERO |  | 805  |    | MARZO |  | 920  |    | ABRIL |
| 956  |    | FEBRERO |  | 1489 | 18 | MARZO |  | 865  |    | ABRIL |
| 789  |    | FEBRERO |  | 985  |    | MARZO |  | 732  | 6  | ABRIL |
| 889  | 28 | FEBRERO |  | 858  |    | MARZO |  | 1252 |    | ABRIL |
| 930  |    | FEBRERO |  | 1075 | 19 | MARZO |  | 1095 |    | ABRIL |
| 834  |    | MARZO   |  | 974  |    | MARZO |  | 730  | 7  | ABRIL |
| 832  | 1  | MARZO   |  | 968  |    | MARZO |  | 703  |    | ABRIL |
| 979  |    | MARZO   |  | 823  | 20 | MARZO |  | 940  |    | ABRIL |
| 835  |    | MARZO   |  | 984  |    | MARZO |  | 937  | 8  | ABRIL |
| 811  | 2  | MARZO   |  | 773  |    | MARZO |  | 976  |    | ABRIL |
| 787  |    | MARZO   |  | 1014 | 21 | MARZO |  | 867  |    | ABRIL |
| 893  |    | MARZO   |  | 1006 |    | MARZO |  | 930  | 9  | ABRIL |
| 901  | 3  | MARZO   |  | 964  |    | MARZO |  | 950  |    | ABRIL |
| 887  |    | MARZO   |  | 895  | 22 | MARZO |  | 894  |    | ABRIL |
| 925  |    | MARZO   |  | 987  |    | MARZO |  | 914  | 10 | ABRIL |
| 1100 | 4  | MARZO   |  | 1148 |    | MARZO |  | 945  |    | ABRIL |
| 792  |    | MARZO   |  | 958  | 23 | MARZO |  | 850  |    | ABRIL |
| 884  |    | MARZO   |  | 1151 |    | MARZO |  | 900  | 11 | ABRIL |
| 986  | 5  | MARZO   |  | 985  |    | MARZO |  | 909  |    | ABRIL |
| 111  |    | MARZO   |  | 956  | 24 | MARZO |  | 809  |    | ABRIL |
| 835  |    | MARZO   |  | 945  |    | MARZO |  | 813  | 12 | ABRIL |
| 928  | 6  | MARZO   |  | 660  |    | MARZO |  | 991  |    | ABRIL |
| 1074 |    | MARZO   |  | 1305 | 25 | MARZO |  | 900  |    | ABRIL |
| 915  |    | MARZO   |  | 1004 |    | MARZO |  | 715  | 13 | ABRIL |
| 939  | 7  | MARZO   |  | 1235 |    | MARZO |  | 794  |    | ABRIL |
| 839  |    | MARZO   |  | 865  | 26 | MARZO |  | 837  |    | ABRIL |
| 1143 |    | MARZO   |  | 798  |    | MARZO |  | 1004 | 14 | ABRIL |
| 325  | 8  | MARZO   |  | 854  |    | MARZO |  | 841  |    | ABRIL |
| 865  |    | MARZO   |  | 594  | 27 | MARZO |  | 915  |    | ABRIL |
| 1152 |    | MARZO   |  | 845  |    | MARZO |  | 959  | 15 | ABRIL |
| 846  | 9  | MARZO   |  | 820  |    | MARZO |  | 874  |    | ABRIL |
| 850  |    | MARZO   |  | 750  | 28 | MARZO |  | 799  |    | ABRIL |
| 1014 |    | MARZO   |  | 1082 |    | MARZO |  | 774  | 16 | ABRIL |
| 1070 | 10 | MARZO   |  | 854  |    | MARZO |  | 241  |    | ABRIL |
| 525  |    | MARZO   |  | 876  | 29 | MARZO |  | 940  |    | ABRIL |
| 1209 |    | MARZO   |  | 912  |    | MARZO |  | 952  | 17 | ABRIL |
| 1025 | 11 | MARZO   |  | 1431 |    | MARZO |  | 945  |    | ABRIL |
| 115  |    | MARZO   |  | 896  | 30 | MARZO |  | 960  |    | ABRIL |
| 1245 |    | MARZO   |  | 924  |    | MARZO |  | 740  | 18 | ABRIL |
| 1289 | 12 | MARZO   |  | 1535 |    | MARZO |  | 887  |    | ABRIL |
| 987  |    | MARZO   |  | 865  | 31 | MARZO |  | 870  |    | ABRIL |
| 1040 |    | MARZO   |  | 1002 |    | MARZO |  | 894  | 19 | ABRIL |
| 1000 | 13 | MARZO   |  | 870  |    | ABRIL |  | 856  |    | ABRIL |
| 954  |    | MARZO   |  | 891  | 1  | ABRIL |  | 1050 |    | ABRIL |
| 851  |    | MARZO   |  | 850  |    | ABRIL |  | 1002 | 20 | ABRIL |
| 843  | 14 | MARZO   |  | 769  |    | ABRIL |  | 1000 |    | ABRIL |
| 827  |    | MARZO   |  | 720  | 2  | ABRIL |  | 832  |    | ABRIL |
| 1104 |    | MARZO   |  | 950  |    | ABRIL |  | 975  | 21 | ABRIL |
| 761  | 15 | MARZO   |  | 682  |    | ABRIL |  | 968  |    | ABRIL |

|      |    |       |     |    |      |       |    |       |
|------|----|-------|-----|----|------|-------|----|-------|
| 968  |    | ABRIL | 814 |    | MAYO | 752   |    | MAYO  |
| 985  | 22 | ABRIL | 823 | 11 | MAYO | 725   |    | MAYO  |
| 965  |    | ABRIL | 851 |    | MAYO | 681   | 30 | MAYO  |
| 839  |    | ABRIL | 620 |    | MAYO | 800   |    | MAYO  |
| 947  | 23 | ABRIL | 652 | 12 | MAYO | 996   |    | MAYO  |
| 899  |    | ABRIL | 966 |    | MAYO | 785   | 31 | MAYO  |
| 800  |    | ABRIL | 888 |    | MAYO | 1,007 |    | MAYO  |
| 806  | 24 | ABRIL | 666 | 13 | MAYO | 780   |    | JUNIO |
| 897  |    | ABRIL | 929 |    | MAYO | 782   | 1  | JUNIO |
| 820  |    | ABRIL | 952 |    | MAYO | 880   |    | JUNIO |
| 624  | 25 | ABRIL | 797 | 14 | MAYO | 905   |    | JUNIO |
| 752  |    | ABRIL | 667 |    | MAYO | 909   | 2  | JUNIO |
| 693  |    | ABRIL | 665 |    | MAYO | 923   |    | JUNIO |
| 785  | 26 | ABRIL | 632 | 15 | MAYO | 761   |    | JUNIO |
| 796  |    | ABRIL | 624 |    | MAYO | 895   | 3  | JUNIO |
| 894  |    | ABRIL | 913 |    | MAYO | 947   |    | JUNIO |
| 787  | 27 | ABRIL | 700 | 16 | MAYO | 666   |    | JUNIO |
| 914  |    | ABRIL | 912 |    | MAYO | 1028  | 4  | JUNIO |
| 780  |    | ABRIL | 671 |    | MAYO | 932   |    | JUNIO |
| 900  | 28 | ABRIL | 789 | 17 | MAYO | 597   |    | JUNIO |
| 1150 |    | ABRIL | 801 |    | MAYO | 909   | 5  | JUNIO |
| 798  |    | ABRIL | 855 |    | MAYO | 953   |    | JUNIO |
| 723  | 29 | ABRIL | 686 | 18 | MAYO | 916   |    | JUNIO |
| 741  |    | ABRIL | 654 |    | MAYO | 840   | 6  | JUNIO |
| 887  |    | ABRIL | 785 |    | MAYO | 710   |    | JUNIO |
| 903  | 30 | ABRIL | 784 | 19 | MAYO | 977   |    | JUNIO |
| 897  |    | ABRIL | 951 |    | MAYO | 692   | 7  | JUNIO |
| 846  |    | MAYO  | 741 |    | MAYO | 340   |    | JUNIO |
| 675  | 1  | MAYO  | 963 | 20 | MAYO | 626   |    | JUNIO |
| 741  |    | MAYO  | 845 |    | MAYO | 938   | 8  | JUNIO |
| 871  |    | MAYO  | 796 |    | MAYO | 486   |    | JUNIO |
| 722  | 2  | MAYO  | 852 | 21 | MAYO | 643   |    | JUNIO |
| 756  |    | MAYO  | 975 |    | MAYO | 647   | 9  | JUNIO |
| 901  |    | MAYO  | 786 |    | MAYO | 736   |    | JUNIO |
| 789  | 3  | MAYO  | 746 | 22 | MAYO | 758   |    | JUNIO |
| 894  |    | MAYO  | 849 |    | MAYO | 642   | 10 | JUNIO |
| 825  |    | MAYO  | 822 |    | MAYO | 722   |    | JUNIO |
| 841  | 4  | MAYO  | 753 | 23 | MAYO | 680   |    | JUNIO |
| 862  |    | MAYO  | 725 |    | MAYO | 849   | 11 | JUNIO |
| 781  |    | MAYO  | 814 |    | MAYO | 968   |    | JUNIO |
| 754  | 5  | MAYO  | 951 | 24 | MAYO | 715   |    | JUNIO |
| 768  |    | MAYO  | 684 |    | MAYO | 709   | 12 | JUNIO |
| 842  |    | MAYO  | 859 |    | MAYO | 731   |    | JUNIO |
| 835  | 6  | MAYO  | 689 | 25 | MAYO | 728   |    | JUNIO |
| 634  |    | MAYO  | 750 |    | MAYO | 214   | 13 | JUNIO |
| 659  | 7  | MAYO  | 695 |    | MAYO | 762   |    | JUNIO |
| 651  |    | MAYO  | 777 | 26 | MAYO |       |    |       |
| 724  |    | MAYO  | 870 |    | MAYO |       |    |       |
| 754  | 8  | MAYO  | 884 |    | MAYO |       |    |       |
| 796  |    | MAYO  | 748 | 27 | MAYO |       |    |       |
| 747  |    | MAYO  | 915 |    | MAYO |       |    |       |
| 714  | 9  | MAYO  | 821 |    | MAYO |       |    |       |
| 719  |    | MAYO  | 785 | 28 | MAYO |       |    |       |
| 812  |    | MAYO  | 654 |    | MAYO |       |    |       |
| 816  | 10 | MAYO  | 821 |    | MAYO |       |    |       |
| 825  |    | MAYO  | 819 | 29 | MAYO |       |    |       |