

**“ANALISIS DE LAS METODOLOGIAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN
PROCESOS DE MANUFACTURA”**

**MONICA TATIANA DUARTE BRICEÑO
MARIA FERNANDA RODRIGUEZ ARENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO- MECANICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2011

**“ANALISIS DE LAS METODOLOGIAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN
PROCESOS DE MANUFACTURA”**

**MONICA TATIANA DUARTE BRICEÑO
MARIA FERNANDA RODRIGUEZ ARENAS**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Industrial**

**Director
NESTOR RAUL ORTIZ
Ingeniero Industrial**

**Codirector
EDWIN ALBERTO GARAVITO
Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2011

Doy gracias principalmente a Dios, por haberme dado la oportunidad y la fortaleza para alcanzar este sueño tan importante en mi vida.

A mis padres y mis hermanos, por su amor y comprensión, por la confianza que depositaron en mí, por su apoyo incondicional durante este proceso de formación; y su compañía en los momentos de dificultad y de alegría, ya que fueron el motor que me impulsó para llegar hasta la meta y ser la persona y profesional que hoy en día soy.

A Mafe, por su amistad, por todos los momentos compartidos durante estos 5 años de vida universitaria. Y a todas aquellas personas que forman parte de mi vida y quienes de una u otra forma, me apoyaron, confiaron en mí, me brindaron sus consejos, y aportaron su granito de arena para hacer de este sueño hoy, una realidad.

Mónica Tatiana

A Dios y la Virgencita María por haberme dado la oportunidad de vivir nuevas experiencias y de poder cumplir con esta meta que tiene una gran importancia en mi desarrollo como ser humano.

A mis padres Alfonso y Josefina y a mi hermana Marce, por su esfuerzo y por su apoyo incondicional, por la confianza que depositaron en mí, por estar conmigo y por ser mi sostén para poder superar todas y cada una de las barreras que se presentaron durante mi camino, sin ellos no habría sido posible culminar esta etapa.

A Monik, por estos cinco años compartidos, por haber sido mi compañera incondicional durante mi vida universitaria, y por tantos momentos de felicidad o de dificultad por los que pasamos.

A Rodrigo, por haberme acompañado en este último año de mi vida, por todos los momentos compartidos y vividos, y porque gracias a él cada día su lado aprendo a ser mejor persona

María Fernanda

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de estudios industriales y empresariales, y a todo su cuerpo docente, que nos acompañaron en nuestro proceso de formación y que contribuyeron con un granito de arena en nuestra formación como ingenieras industriales

A nuestro director de proyecto, el ingeniero Néstor Raúl Ortiz, por creer en nuestras capacidades, por guiarnos durante esta etapa de nuestras vidas y darnos la oportunidad de aprender y crecer como profesionales.

A todos nuestros compañeros de la Universidad que nos acompañaron durante nuestra vida universitaria, por todos los momentos compartidos, por estar compartiendo ratos de estudio o de diversión, y lo más importante por haber hecho parte de nuestras vidas.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	18
1. GENERALIDADES	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 ALCANCE DEL TRABAJO	21
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 DESARROLLO METODOLOGICO	22
2. METODOLOGIAS ENFOCADAS AL CONTROL DE CALIDAD.....	24
2.1 INTRODUCCION	24
2.2 LA RUTA DE LA CALIDAD.....	26
2.3 SEIS SIGMA	31
2.3.1 Introducción	31
2.3.2 Niveles de desempeño en sigma.	32
2.3.3 Principios seis sigma.	33
2.3.4 Modelo de mejora seis sigma.....	34
2.3.5 Actores de la metodología seis sigma.....	37
3. LOS GRÁFICOS DE CONTROL.....	39
3.1 INTRODUCCION	39
3.2 VARIACION DE LOS PROCESOS	40
3.3 FORMA Y USO DE UN GRAFICO DE CONTROL.....	41
3.4 GRÁFICOS DE CONTROL UNIVARIANTES.....	44
3.4.1 Gráficos de control por variables.	44
3.4.2 Gráficos de control por atributos.	48
3.4.3 Gráficos de control con memoria.	51

3.5	INDICES DE CAPACIDAD DE LOS PROCESOS.....	61
4.	NUEVOS APORTES A LOS GRÁFICOS DE CONTROL.....	63
4.1	INTRODUCCION	63
4.2	CARTA DE CONTROL AN	64
4.3	CARTA CONTROL MNP.....	66
4.3.1	Definición del estadístico.	66
4.3.2	Determinación de los límites de control.	68
4.4	CARTA DE CONTROL r BASADA EN LA PROFUNDIDAD DE MAHALANOBIS.	68
4.4.1	Definición del estadístico.	69
4.4.2	Determinación de los limites de control.	70
4.5	GRAFICO MEWMA(EWMA MULTIVARIANTE).....	70
4.6	GRAFICO MCUSUM (CUSUM MULTIVARIANTE).....	72
4.7	TRATAMIENTO DE LA AUTOCORRELACION EN LOS GRAFICOS DE CONTROL	74
4.7.1	Modelos ARIMA.....	75
5.	ANALISIS DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL Y SUS NUEVOS APORTES	79
6.	PROPUESTA METODOLOGICA.....	90
7.	EJEMPLO DIDACTICO	98
7.1	DESCRIPCION DEL EJEMPLO	98
7.2	HERRAMIENTA DE APLICACIÓN E INSTRUCCIONES A SEGUIR PARA SU UTILIZACION.....	99
7.2.1	Elaboración de los gráficos de control de prueba.	100
7.2.2	Modelo ARIMA para los datos.	103
7.2.3	Elaboración de los gráficos de control del proceso.....	106
7.3	RESULTADOS OBTENIDOS	107
8.	CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	112
	CONCLUSIONES.....	114
	RECOMENDACIONES	117
	BIBLIOGRAFIA.....	118

ANEXOS..... 122

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de un gráfico de control.....	42
Figura 2. Diagrama de flujo para mejorar un proceso productivo.....	43
Figura 3. Representacion de la máscara en V.....	55
Figura 4. Gráfico de control de Hotelling.....	65
Figura 5. Flujograma para seleccionar gráficos de control univariantes.	81
Figura 6. Representación de la propuesta metodológica.....	91
Figura 7. Modelo diagrama causa-efecto	96
Figura 8. Interfaz del programa Statgraphics al introducir datos	100
Figura 9. Primer cuadro de dialogo gráficos individuales.	101
Figura 10. Opciones para realizar el grafico de control.....	101
Figura 11. Tablas y gráficos que realizará el programa	102
Figura 12. Statreporter gráficos de control de prueba.	103
Figura 13. Opciones de grafico ARIMA para valores individuales.....	104
Figura 14. Tablas y gráficos modelo ARIMA.....	105
Figura 15. Statreporter gráficos modelo ARIMA.....	105
Figura 16. Opciones para elaboración del grafico de control del proceso.	106
Figura 17. Gráfico de control para característica E.....	108
Figura 18. Gráfico de residuos ARIMA para característica E.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de desempeño en Sigma.....	33
Tabla 2. Comparación entre causas comunes y causas especiales.....	41
Tabla 3. Constantes para determinar los límites de control de los gráficos $X - S$ y $X - R$	49
Tabla 4. Gráficos de control por atributos	50
Tabla 5. Síntesis índices de capacidad de los procesos.....	61
Tabla 6. Técnicas para encontrar el mejor modelo ARIMA que se ajuste a los datos.	76
Tabla 7. Gráfico de control de Shewhart a partir de modelos ARIMA.....	78
Tabla 8. Recorrido medio de racha gráfico CUSUM (ARL).....	83
Tabla 9. Recorrido medio de racha gráfico EWMA (ARL).....	84
Tabla 10. ARL (δ) para gráficos EWMA, CUSUM y Shewhart comparables	85
Tabla 11. Parámetros gráfico de control de prueba.	107
Tabla 12. Parámetros gráfico ARIMA	109
Tabla 13. Cumplimiento de objetivos	112

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: DESPLIEGUE DE LA FUNCION DE CALIDAD

ANEXO B: DATOS ORIGINALES CARACTERISTICA E

ANEXO C: RESIDUOS OBTENIDOS DE LA MODELIZACION ARIMA

RESUMEN

TITULO: ANALISIS DE LAS METODOLOGIAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN PROCESOS DE MANUFACTURA*

AUTORES: MÓNICA TATIANA DUARTE BRICEÑO
MARIA FERNANDA RODRIGUEZ ARENAS*

PALABRAS CLAVES: CALIDAD, CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS, GRAFICOS DE CONTROL, MODELO ARIMA, AUTOCORRELACIÓN.

DESCRIPCION

En este proyecto se presenta un análisis de las metodologías existentes en la literatura para el mejoramiento de la calidad en los procesos de producción. Se partió desde el análisis de metodologías como la ruta de la calidad, el modelo Seis Sigma, y se terminó con el análisis de todo lo referente al control estadístico de procesos, centrandolo en el proyecto de investigación en los gráficos de control, en los nuevos aportes que estos han tenido y en un concepto nuevo como lo es el modelamiento ARIMA. Todo el análisis anterior se hizo con el fin de desarrollar una metodología que involucre entre si las ya existentes, con el fin de obtener productos más confiables y por ende clientes más satisfechos.

Para el desarrollo del trabajo, se llevó a cabo una extensa revisión bibliográfica, cada una de las metodologías se explicaron a partir de los conceptos básicos y sus características más generales. La metodología desarrollada se dividió en dos fases y se centró principalmente en la utilización de los gráficos de control y en controlar la autocorrelación que se da entre los datos. Una vez desarrollada la metodología, se procedió a hacer una aplicación práctica, en la cual se explicó de manera didáctica el software utilizado en la generación de los gráficos y así mismo se llevó a cabo un análisis estadístico del proceso presentado para este ejemplo.

Finalmente, el libro contiene la metodología de trabajo utilizada por las autoras para el desarrollo del tema mediante la modalidad de trabajo de investigación.

* proyecto de grado bajo la modalidad de trabajo de investigación.

* facultad de ingenierías fisicomecánicas, escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Dirigido por Ing. Néstor Raúl Ortiz.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR QUALITY CONTROL IN MANUFACTURING PROCESSES*

AUTHORS: MONICA TATIANA DUARTE BRICEÑO
MARIA FERNANDA RODRIGUEZ ARENAS*

KEY WORDS: QUALITY, STATISTICAL PROCESS CONTROL, CONTROL CHART, ARIMA MODELS, AUTOCORRELATION.

DESCRIPTION

This project presents an analysis of the existing methodologies in the literature for quality improvement in production processes. We started from the methodologies analysis as the Quality course (QC), Six Sigma model, and finished with the analysis of all matters relating to statistical process control, research project was focused on control charts, in the new contributions that these have had and a new concepts such as ARIMA modeling. All the previous analysis was made to develop a methodology that involves each one with the existing in order to obtain more reliable products and therefore more satisfied customers.

For development job was carried out an extensive literature review, each of the methodologies were explained from the basic concepts and its general features. The methodology was divided into two phases and focused primarily on the use of control charts and control the autocorrelation that exists between the data. Once developed the methodology, we proceeded to make a practical application, which was explained in a didactic way the software used in the generating graphs and thus was carried out a statistical analysis of the process presented in this example.

Finally, the book contains the job methodology used by the authors to develop the theme using the method of research.

* Grade Project in the research modality work.

* Physics Mechanical faculty, School of industrial studies and management. Directed by Nestor Raul Ortiz.

INTRODUCCION

El mundo empresarial se ha desarrollado a un ritmo acelerado en los últimos tiempos, propiciando una fuerte competitividad entre las empresas, influenciada principalmente por factores como la globalización, la liberalización de las economías, la libre competencia y los rápidos cambios de las tecnologías. Este hecho ha propiciado un sistema competitivo en el que la competencia mediante las variables económicas tradicionales, como el precio, es cada vez más complicada, puesto que un creciente número de empresas las tienen en cuenta y las ajustan de tal manera que anulan en la práctica las posibilidades de actuar a través de las mismas.

Aunque la situación es ideal para el consumidor, que puede darse el lujo de elegir entre un amplio abanico de posibilidades la opción más adecuada a sus necesidades, no deja de ser compleja para la empresa, quien debe diseñar nuevas estrategias que vayan de la mano con las expectativas de los consumidores y las necesidades de la empresa, de modo que puedan ser empleadas como fuente de ventaja competitiva.

Es así como la calidad se ha constituido en el elemento clave que permite surgir dicha ventaja; y esta es la razón fundamental que ha justificado el diseño de filosofías y metodologías encaminadas a la búsqueda del éxito empresarial a través de la satisfacción del cliente al menor costo posible, gracias a la producción de bienes y servicios de alta calidad, que permitan mantenerse en el mercado, generando importantes beneficios al interior de las organizaciones.

Indiscutiblemente, las metodologías enfocadas al control y mejoramiento de la calidad en los procesos productivos, se han convertido en una estrategia de solución a los problemas que enfrentan actualmente las empresas, pues permiten

no solo satisfacer a plenitud las necesidades de sus clientes, sino además, autoevaluar continuamente los factores claves competitivos e identificar oportunidades de mejora; lo que a su vez contribuye al incremento de los resultados financieros y operativos para las empresas.

Por medio de este trabajo se analizaran las principales metodologías para control de calidad en procesos de manufactura, tomando como foco o referencia el control estadístico de procesos y en especial su herramienta básica: los gráficos de control; ya que para mantener un alto nivel de calidad en los productos, no hay forma más fácil de lograrlo que tomando medidas desde las etapas iniciales del proceso productivo; esto es lo que se logra con el empleo de estos gráficos que permiten monitorear las características de calidad relacionadas con el proceso, detectando y corrigiendo los problemas a medida que se originan, y no cuando el proceso productivo haya finalizado.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las empresas hoy conciben el mercado con todos los movimientos rápidos desencadenados, entre otras razones, por la propia globalización y competencia. Se compete e incluso se sobrevive en un mercado de ágiles cambios, donde ocupar un segmento no es un logro contundente, el desafío está en hacer fieles los clientes a partir de soluciones creativas que se conviertan en ventajas competitivas.

Así, las características propias del mercado actual, en donde nadie puede estar tranquilo sobre el trono que en un momento dado pudo construirse, implican la necesidad de producir bienes con altos estándares de calidad, que puedan satisfacer a cabalidad las necesidades de clientes cada vez más exigentes; es por esto, que se ha estimulado el estudio de los procesos productivos, donde se pueden encontrar soluciones que aporten directamente y con mayor control a las estrategias trazadas de cualquier organización.

Sin embargo, aunque la teoría y la práctica confirman la necesidad de mantener una alta calidad en los procesos productivos, esta condición es en muchos casos poco lograda, pues casi siempre a falta de control sobre estos muchos se hacen obsoletos, dejan de agregar valor y de ser competitivos, no adaptándose a los cambios que experimentan las necesidades de los clientes; hecho que en gran medida se atribuye a que las empresas emplean enfoques de mejora de la calidad de sus procesos poco estructurados y que no conducen a los resultados deseados.

1.2 ALCANCE DEL TRABAJO

Al finalizar la presente investigación se habrá elaborado un documento con los diferentes temas tratados, el cual será organizado de forma sistemática de tal manera que pueda servir como referencia o texto guía tanto para las nuevas generaciones de estudiantes de la escuela de estudios industriales y empresariales, que deseen profundizar un poco más acerca del tema de control de calidad en procesos de manufactura; así como para las organizaciones que buscan fabricar productos de alta calidad, para mejorar su participación en el mercado y ser mucho más rentables y competitivas; ya que además de analizar las principales metodologías para el control de calidad en procesos de manufactura, en este trabajo se propone una nueva metodología que complemente las ya existentes y que contenga elementos y herramientas no solo de tipo cualitativo sino cuantitativo; que pueda emplear técnicas estadísticas y de gestión de procesos para alinear las estrategias planteadas con la gestión del día a día (procesos); una metodología más confiable y estructurada, de tal forma que sea fácil de implementar en cualquier organización.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una metodología de control de la calidad en procesos de manufactura, enfocada en la reducción de la variabilidad de los mismos, para contribuir de forma positiva a la calidad de los productos y por ende aumentar el grado de satisfacción de los clientes.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar y presentar la ruta de la calidad y seis sigma como dos de las principales metodologías enfocadas al control de calidad en procesos de manufactura.
- Presentar la base teórica y práctica de los gráficos de control como métodos estadísticos de control de calidad en procesos de manufactura.
- Analizar los nuevos aportes desarrollados para los gráficos de control, desde el punto de vista univariante y multivariante.
- Diseñar una metodología de control de calidad, que complemente las ya existentes y que sea fácil de aplicar en cualquier organización.
- Realizar un ejemplo didáctico en el que se compruebe la validez de la metodología desarrollada.

1.4 DESARROLLO METODOLOGICO

La realización del proyecto se llevó a cabo en tres fases: búsqueda de información bibliográfica, selección y documentación de los temas centrales para el desarrollo de la metodología, y por último el desarrollo de la propuesta metodológica. En cada una de las fases se realizaron reuniones con el director de proyecto, para establecer funciones, para evaluar y aprobar el trabajo realizado, así como para establecer correcciones en caso que se presentaran con la documentación que se daba a conocer al director del proyecto de grado.

1.7.1 Revisión bibliográfica. Se inició con una búsqueda intensa de bibliografía correspondiente a metodologías enfocadas a mejorar el control de calidad de los productos de carácter cualitativo o cuantitativo. Seguidamente se dio paso a centrar la búsqueda en el control estadístico de procesos, focalizando la

investigación en los gráficos de control así como en los nuevos aportes que se le habían hecho a los mismos. Se analizaron cada una de las metodologías y técnicas propuestas en el proyecto y finalmente se documentaron todos los aportes encontrados.

1.7.2 Selección y documentación de los temas centrales. Una vez finalizada la etapa de revisión bibliográfica, se dio paso a seleccionar las técnicas o metodologías en las que se iba a hacer énfasis en el proyecto, y todo esto se llevó a un documento que recopila de forma clara y precisa las diferentes técnicas, así como la metodología desarrollada en el proyecto.

1.7.3 Desarrollo de la propuesta metodológica. A partir de la información obtenida, se dio paso a elaborar una propuesta metodológica que combinara el control estadístico de procesos y que tuviese en cuenta la autocorrelación que se da entre los datos; y a partir de esta propuesta se elaboró un ejemplo didáctico en donde se pudiese demostrar su funcionamiento.

2. METODOLOGIAS ENFOCADAS AL CONTROL DE CALIDAD

2.1 INTRODUCCION

La calidad de los productos, ha sido un tema de interés desde hace muchos años, antiguamente cuando el tamaño de la producción era la unidad, la calidad estaba presente, cuando se comparaba el artículo que se producía con el prototipo inicial que se tenía del mismo, en base a estas comparaciones era que se podían detectar las variaciones que existían en el proceso productivo. La calidad era controlada por el artesano, quien fabricaba los productos a mano y tenía la visión global de todos los procesos que estaban involucrados en el producto final, y que por ende influían en la satisfacción del consumidor.

La industrialización y el incremento en la producción masiva supuso la introducción plena de la producción mediante el ensamblaje de piezas más simples fabricadas de forma independiente; lo que condujo a la especialización dentro de las compañías, pues cada persona se concentraba en su pequeña sección de la empresa, por lo cual no era posible tener una visión global de esta y se volvió imposible confiar en el conocimiento y la capacidad del empleado para evitar que los productos defectuosos salieran al mercado; de esta forma la inspección se hizo necesaria y la ideología de fabricación continuó siendo, durante un tiempo, la de producción exacta, atribuyendo la variabilidad a defectos en el proceso productivo. [10]

Durante la segunda guerra mundial se dio un incremento en la producción, debido a esto, fue necesario que el trabajo de inspección fuera más eficiente¹. Es por esto que se empezó a tomar conciencia de que las piezas fabricadas no necesariamente debían ser exactamente iguales, pero si lo suficientemente

¹Evans, James R.; Administración y control de Calidad, Editorial Thompson, sexta edición, 2005.

parecidas como para ser consideradas válidas. Este hecho, introdujo el concepto de variabilidad en la producción, dando paso a la aplicación de métodos estadísticos en el control de calidad.

Durante la década de los años cincuenta, los japoneses hacen suyas las ideas del control de calidad para mejorar la tan golpeada economía nipona de la postguerra. El estadounidense Deming desarrolla uno de los primeros modelos gerenciales básicos de la calidad, conocido en un principio como ciclo Shewhart, pero después cuando lo llevo a Japón fue denominado ciclo Deming; en la actualidad se le conoce como ciclo PHVA correspondiendo a las iniciales P de “planificar” los mejoramientos en las practicas actuales; H de “hacer” lo que se ha planificado; V de “verificar” los resultados y A de “actuar” de acuerdo con dichos resultados para mejorar el proceso. De esta forma, la rueda gira y gira incesantemente para producir nuevos estándares de desempeño.

Ya para el siglo XX, la calidad se constituyó como un elemento clave para cualquier organización, ya que se publican las normas ISO 9001, que son consideradas como un factor competitivo a la hora de hacer comparaciones de eficiencia entre las empresas. [10]

Hoy en día, la administración y control de la calidad se reconocen como los cimientos de la competitividad. El gran problema que presentan las organizaciones y que las hace incurrir en grandes pérdidas y realizar elevadas inversiones, es la variabilidad que se da en cualquier proceso de producción, que afecta la calidad de los productos y que solo puede describirse y controlarse mediante métodos estadísticos. Es por esto, que estas herramientas son consideradas como un elemento fundamental a la hora de realizar control de la calidad. Más concretamente los gráficos de control, se centran en reducir esta variabilidad y son un soporte importante para controlar los procesos; por esto se consideran como el tema fundamental a desarrollar en este trabajo de investigación.

Dentro del marco teórico propuesto en este trabajo, se introducirán explicaciones de algunas de las metodologías más reconocidas que se enfocan en el control de calidad de los procesos mediante la solución de problemas, a continuación se mencionará la ruta de la calidad, la metodología seis sigma y los gráficos de control. Esta última metodología se considerará como el tema central del desarrollo metodológico que se propondrá como resultado en el presente proyecto.

2.2 LA RUTA DE LA CALIDAD

Es una metodología de solución de problemas para la mejora de la calidad. En los términos usados en ella, un problema se define de la siguiente manera: "Un problema es el resultado no deseado de una tarea". Las causas de los problemas se investigan desde el punto de vista de los hechos y se analiza con procesión la relación causa efecto. Se evitan estrictamente las decisiones sin fundamento basadas en la imaginación o en la teoría desde un escritorio, debido a que los intentos de solucionar los problemas con base en decisiones orientan en direcciones equivocadas, lo cual lleva al fracaso o a demorar la mejora. Se diseñan y se implementan medidas que contrarresten el problema para evitar que los factores causales vuelvan a presentarse. Este procedimiento es una especie de recuento o representación de las actividades del aseguramiento de la calidad, y por eso la gente la llama "la ruta de la calidad".

De acuerdo a esta metodología, un problema se soluciona de acuerdo con los siguientes siete pasos:

2.2.1 Problema: identificar el problema. Un problema es el resultado no deseado de una tarea, pero a su vez es una mina de oro de oportunidades para

las mejoras. En primer lugar hay que identificar el problema con claridad y definirlo de manera correcta, ya que todas las etapas siguientes dependerán de ello y también es de gran utilidad para ajustar la inversión de tiempo y dinero necesario para llevar a cabo las mejoras.

Actividades:

- Mostrar que el problema que se está tratando es mucho más importante que cualquier otro. (Para esto se puede utilizar el principio de Pareto).
- Mostrar cuál es el contexto del problema y que curso ha seguido hasta el momento.
- Plantear un tema y una meta y, si es necesario subtemas.
- Proponer una persona para que se haga cargo de la tarea oficialmente. Cuando la tarea va a ser realizada por un equipo, se debe nombrar a los miembros y el líder, definiendo roles y responsabilidades.
- Presentar un presupuesto estimado para la mejora.
- Hacer un cronograma de la mejora.

2.2.2 Observación: reconocimiento de las características del problema. En este paso se busca conocer las características del problema. Las claves para resolver un problema se encuentran en el mismo problema.

Actividades:

- Definir la situación actual, observando el problema desde diversas perspectivas y recolectando la mayor información posible acerca del mismo. Una buena alternativa es ir a la raíz del problema y hablar con las personas que están familiarizadas con él. Los supervisores y trabajadores resultan ser una buena fuente, igual que la retroalimentación de clientes.
- Describir el problema considerando aspectos como: tiempo y/o frecuencia de ocurrencia, ubicación, tipo de defecto o falla y síntomas presentados.

2.2.3 Análisis: búsqueda de las principales causas. La mayor parte de los efectos, son resultado de sólo unas cuantas causas, por lo tanto, las acciones remediables deben emprenderse contra los factores de mayor causalidad, y los elementos que no correspondan a la variación de los resultados deberán descartarse.

Actividades:

- Plantear hipótesis de causas (seleccionando los candidatos más importantes como causas). Para esto se puede realizar una lluvia de ideas. Sin embargo, una de las dificultades en esta tarea es el instinto natural de prejuzgar las ideas antes de evaluarlas. También es posible evidenciar una causa, reproduciendo intencionalmente el problema, es decir activando la causa.

El diagrama de causa y efecto es también, una herramienta importante, que ayuda a la generación de ideas relacionadas con las causas del problema, y a su vez sirve de base para la determinación de la solución. El diagrama es un método gráfico simple de presentar una cadena de causas y efectos y de organizar las relaciones entre las variables; permite identificar las causas más probables de un problema, de manera que se pueda llevar a cabo una recolección posterior de datos y análisis.

- Someter a prueba las hipótesis: las pruebas de las hipótesis deberán estar fundamentadas en datos obtenidos con experimentación y encuestas. Es decir, se busca investigar si realmente existe una relación entre las causas posibles y los resultados, a fin de poder deducir las principales causas entre las señaladas.

2.2.4 Acción: realizar acciones para eliminar las principales causas. El logro de los objetivos planteados depende de que tan bien se apliquen las acciones planteadas, por lo tanto es importante seguir fielmente las acciones planificadas y además, llevar un registro de los resultados que se obtengan.

Para implementar una solución, la responsabilidad debe asignarse a una persona o a un grupo que hará seguimiento de lo que debe hacerse, dónde deberá hacerse, cuándo deberá hacerse y la forma en que deberá hacerse. A menudo se necesitan planes para capacitar al personal sobre nuevos métodos, junto con un mecanismo de control, para supervisar el proceso.

Actividades:

- Distinguir entre acciones para remediar el problema (a corto plazo), y acciones para eliminar los factores causales (prevención de recurrencia).
- Asegurar que las acciones no generan otros problemas (efectos secundarios).
- Diseñar varias propuestas de acción. Analizar ventajas y desventajas de cada una de ellas y seleccionar aquellas que sean aceptadas por las personas involucradas.

2.2.5 Verificación: confirmación de la efectividad de la acción. Hay que medir el efecto de la actividad de mejoramiento, estudiando la medición del rendimiento. ¿Se cumplió con el objetivo? Si no es así, ¿el alcance de los resultados está en la dirección correcta?

Actividades:

- Comparar los datos obtenidos sobre el problema, utilizando los mismos índices, parámetros y herramientas (tablas, gráficos, esquemas, etc.) considerados antes y después de llevar a cabo las acciones.
- Convertir los efectos a términos monetarios y comparar los resultados con la meta propuesta o valor objetivo.
- Incluir todo efecto adicional, bueno o malo, como parte de los resultados obtenidos. Si el resultado no es tan satisfactorio como se esperaba, es importante asegurarse que las acciones planteadas se hayan implementado de acuerdo a lo establecido.

2.2.6 Estandarización: eliminar permanentemente las causas del problema.

Eliminar las causas del problema de tal forma que este no vuelva a ocurrir y asegurar el seguimiento del nuevo procedimiento establecido. Sin estándares establecidos, el sistema retornará gradualmente a la situación anterior lo que conducirá a la recurrencia del problema. Por otra parte, sin estándares claros es muy probable que el problema ocurra nuevamente cuando se involucre nuevo personal. Los estándares deben convertirse en una parte de la forma de pensar y en hábito de trabajo de los empleados. Algunos de los beneficios que acarrea la estandarización son:

- Garantizar que al pasar el tiempo no vuelvan a aparecer las causas que ocasionaron el problema y/o impedir que los beneficios logrados con la implantación de un proyecto se pierdan.
- Contar con el material apropiado para entrenar a las personas en sus nuevos puestos.
- Tener un sistema de comunicaciones único entre áreas, procesos y personas

Actividades:

- Identificar claramente: quién, cuándo, dónde, qué, por qué y cómo, y usarse como un estándar (documentar la mejora).
- Las preparaciones y comunicaciones necesarias respecto a los estándares deben realizarse correctamente.
- Diseñar un sistema de responsabilidad para verificar si los estándares se están observando (auditorías internas).

2.2.7 Conclusión: revisión de las actividades y planeación del trabajo futuro.

Es probable que la investigación y análisis realizado hayan revelado problemas adicionales, cuya solución podría elevar el nivel de mejora alcanzado.

Actividades:

- Hacer una lista de los problemas que permanecen.
- Planear que hay que hacer para solucionar esos problemas.
- Establecer lo que ha funcionado bien y lo que no ha funcionado en las actividades de mejoramiento. [10]

2.3 SEIS SIGMA

2.3.1 Introducción. Seis Sigma, es una filosofía de trabajo y una estrategia de negocios, la cual se basa en el enfoque hacia el cliente, en un manejo eficiente de los datos y metodologías, que permite eliminar la variabilidad en los procesos y alcanzar un nivel de defectos menor o igual a 3,4 defectos por millón. Adicionalmente, otros efectos obtenidos son: reducción de los tiempos de ciclo, reducción de los costos, alta satisfacción de los clientes y más importante aún, efectos dramáticos en el desempeño financiero de la organización. Es una manera inteligente de mejorar un negocio o un departamento. Seis Sigma pone en primer plano el consumidor y usa los hechos y los datos para conducir las actividades a mejores soluciones. [3]

Los esfuerzos en Seis Sigma se enfocan a tres áreas principales:

- Mejorar la satisfacción del cliente.
- Reducir los tiempos de ciclo.
- Reducir los defectos.

Las mejoras aquí representan ahorros dramáticos de costos a los negocios así como las oportunidades para mantener a los clientes, capturar nuevos mercados y construir una reputación para incrementar los productos y servicios. Seis Sigma no es simplemente una iniciativa de calidad, es una iniciativa de negocios. En

términos estadísticos “Reaching Six Sigma²” significa que su proceso o producto será transformado con casi nada de defectos.

Tres características claves separan Seis Sigma de los programas de calidad del pasado y por eso la hacen ser diferente:

- Está enfocada en el cliente.
- Produce altos retornos de la inversión.
- Cambia el modo de operar de la gerencia. Pone en práctica las nociones de trabajar inteligente y no duramente.

Desde el punto de vista matemático y analítico, Seis sigma representa:

- Una medida estadística del funcionamiento de un proceso o un producto.
 - Una meta que los lleve tan cerca de la perfección para el mejoramiento de las funciones.
 - Un sistema de gerencia que permite el éxito, continuando el liderazgo del negocio y el funcionamiento de clase mundial (World – Class Performance).
- [23]

2.3.2 Niveles de desempeño en sigma. La letra griega Sigma - σ – representa la desviación estándar. La desviación estándar es una forma estadística para describir cuanta variación existe en una selección de información, un grupo de elementos o un proceso. Se usa la medida en sigma para observar qué tan bien o mal operan los procesos, y darles a todos una manera común de expresar dicha medida. [16]

² Alcanzando Seis Sigma.

Tabla 1. Niveles de desempeño en Sigma.

Rendimiento	DPMO	Sigma
30.9%	690.000	1
69,2	308.000	2
93,3	66.800	3
99,4	6210	4
99,98	320	5
99,9997	3,4	6

2.3.3 Principios seis sigma. Son considerados seis principios básicos para la metodología seis sigma, a continuación se dará mención a cada uno de ellos.

- Auténtica orientación al cliente: las medidas de rendimiento seis sigma empiezan con el cliente. Las mejoras seis sigma se definen por su impacto en la satisfacción del cliente y por su valor.
- Gestión orientada a datos y hechos: seis sigma ayuda a responder dos preguntas básicas: ¿Qué datos/información necesito realmente? ¿Cómo puedo utilizar esa información para obtener un máximo beneficio? El proceso Seis Sigma se inicia estableciendo cuáles son las medidas claves a medir, pasando luego a la recolección de los datos para su posterior análisis. De tal forma, los problemas pueden ser definidos, analizados y resueltos de una forma más efectiva y permanente, atacando las causas raíces o fundamentales que los originan, y no sus síntomas.
- Orientación a procesos, gestión por procesos y mejora de procesos: el vehículo clave del éxito de seis sigma es la acción centrada en los procesos. Uno de los logros más notables de los esfuerzos seis sigma es convencer a los líderes y directivos que el dominar los procesos no es un mal necesario, sino

realmente una forma de construir ventajas competitivas en la entrega de valor a los clientes.

- Gestión proactiva, es decir anticiparse a los acontecimientos. “hacer un hábito el tener en cuenta una serie de prácticas empresariales que muy a menudo son ignoradas”, es decir definir objetivos ambiciosos y revisarlos frecuentemente, establecer las prioridades de forma clara, centrarse en la prevención de problemas en vez de apagar fuegos.
- Colaboración sin fronteras: propender por trabajar en equipos.
- Búsqueda perfección³: la idea fundamental, es que cualquier empresa que haga de seis sigma su objetivo tendrá que impulsarse constantemente para ser cada vez más perfecta, al mismo tiempo estar dispuesta a aceptar y gestionar errores ocasionales. [23]

2.3.4 Modelo de mejora seis sigma. Seis Sigma es una metodología rigurosa que utiliza herramientas y métodos estadísticos, para *Definir* los problemas y situaciones a mejorar, *Medir* para obtener la información y los datos, *Analizar* la información recolectada, *mejorar* y emprender acciones hacia los procesos y finalmente, *Controlar* o rediseñar los procesos o productos existentes, con la finalidad de alcanzar etapas óptimas, lo que a su vez genera un ciclo de mejoramiento continuo, la cual es conocida como la metodología DMAMC⁴. A continuación se presentaran las características de cada una de las etapas:

- **Definir el problema:** Debe definirse claramente en qué problema se ha de trabajar, por qué se trabaja en ese problema en particular, quién es el cliente, cuáles son los requerimientos del cliente, cómo se lleva a cabo el trabajo en la actualidad, cuáles son los beneficios de realizar una mejora. Siempre debe

³ Conocido también como tolerancia a los errores

⁴ LOWENTHAL, Jeffrey N.; Guía para la aplicación de un proyecto Seis Sigma. Madrid, Fundación confemetal, 2002.

tenerse en cuenta que definir correctamente un problema implica tener un 50% de su solución. Un problema mal definido llevará a desarrollar soluciones para falsos problemas.

- **Medir:** El medir persigue dos objetivos fundamentales: Tomar datos para validar y cuantificar el problema o la oportunidad. (Esta es una información crítica para refinar y completar el desarrollo del plan de mejora) y por otra parte, permite y facilita identificar las causas reales del problema. El conocimiento de estadística se hace fundamental. “La calidad no se mejora, a no ser que se le mida”.
- **Analizar:** El análisis permite descubrir la causa raíz. Para ello se hará uso de las distintas herramientas de gestión de la calidad. Ellas son las siete herramientas estadísticas clásicas y las nuevas siete herramientas. Las herramientas de análisis deben emplearse para determinar dónde estamos, no para justificar los errores.

Al respecto cabe acotar que el Diagrama de Pareto es a los efectos de darle prioridad a los factores que mayor importancia tienen en la generación de fallos o errores, pero no debe significar dejar de atender las demás causas. Al respecto Crosby señala que “a los numerosos pero triviales ni siquiera les hacen caso; les dejan que envenenen el producto o servicio para el consumidor. Consideran que no vale la pena dedicar tiempo a solucionarlos. En cambio para un auténtico enfoque de cero defectos, todos los elementos son importantes”.

- **Mejorar:** En esta etapa asume una preponderancia fundamental la participación de todos los colaboradores del proceso, como así también la

capacidad creativa, entre los cuales se encuentran el uso de nuevas herramientas como el Pensamiento Lateral y la Programación Neuro-Lingüística (PNL). La fase de mejora implica tanto el diseño como la implementación. En esta fase de diseño es muy importante la actividad de benchmarking a los efectos de detectar en otras unidades de la misma empresa o en otras empresas (competidoras o no) formas más efectivas de llevar a cabo un proceso.

- **Controlar:** Es necesario confirmar los resultados de las mejoras realizadas. Debe por tanto definirse claramente unos indicadores que permitan visualizar la evolución del proyecto. Los indicadores son necesarios, pues no se puede basar una decisión en la simple intuición. Los indicadores nos mostrarán los puntos problemáticos de nuestro negocio y nos ayudarán a caracterizar, comprender y confirmar nuestros procesos. Mediante el control de resultados lograremos saber si estamos cubriendo las necesidades y expectativas de nuestros clientes.

Es además primordial verificar mediante el control la estabilidad de los procesos. Distintos indicadores vinculados a Seis Sigma pueden y deben ser articulados en los Tableros de Comandos o Cuadros de Mando Integral a los efectos de permitir un monitoreo constante en la evolución de los mismos por parte de los diferentes funcionarios y responsables de los procesos productivos y de mejoras.

Entre los indicadores a monitorear se tienen:

- ✓ Indicadores relacionados con el costo: los mismos incluyen costos correspondientes a las operaciones, las materias primas, de despilfarro y reciclaje, de comercialización, de desarrollo de productos.

- ✓ Indicadores relacionados con el tiempo de: los ciclos (productivos, comerciales, de respuestas) y de cumplimiento de las etapas de los procesos de implementación de mejoras.
- ✓ Indicadores relacionados con las prestaciones: tales como cuota de mercado, cotización de las acciones, imagen de la empresa, niveles de satisfacción de los clientes y consumidores, y participación de los empleados (cantidades de sugerencias por período de tiempo y niveles de ahorros o beneficios subsecuentes). [17]

A manera de resumen se puede decir que en primer lugar se define el problema, valorándose o midiéndose posteriormente el punto en el cual se encuentra la empresa. Seguidamente se estudia la causa raíz del problema, procediéndose a diseñar y poner en práctica las respectivas mejoras. Y en última instancia se da paso a controlar los resultados obtenidos para verificar la efectividad y eficiencia de los cambios realizados.

2.3.5 Actores de la metodología seis sigma. Entre los roles y las responsabilidades se encuentran los siguientes:

- **Gerencia:** Son personas que incluyen Seis Sigma en la Planeación Estratégica. Promueven cambios mayores en la cadena de valor y remueven barreras frente al cambio.
- **Patrocinadores y champions:** Miembros de la Gerencia que promueven el cambio, identifican proyectos y proporcionan recursos específicos.
- **Master Black Belts:** Proveen liderazgo técnico al programa. Asisten a los Black Belts en soluciones estadísticas inusuales. Entrenan a Black Belts y Green Belts.

- **Black Belts:** Individuos con orientación técnica y habilidades matemáticas. Desarrollan e implementan proyectos asignados en tiempo, calidad y costo. Involucrados con la administración de cambio como agentes de cambio.
- **Green Belts:** Facilitan y forman equipos de trabajo para desarrollar proyectos de principio a fin. Se apoyan en los Black Belts en estadística y manejo del cambio. [3]

La calidad es considerada como un concepto multidimensional, y por tanto en su análisis se deberían considerar varias facetas. En este trabajo se hará énfasis en el concepto de que la calidad se relaciona de forma inversa con la variabilidad⁵, es decir que se enfocará en mejorar la calidad a través de la reducción de la variabilidad, gracias a la aplicación de métodos estadísticos, más concretamente los gráficos de control. Por lo anterior solo se cubre uno de los tantos aspectos relacionados con la calidad, pero, de esta forma se podrá contribuir al éxito de las empresas, y por ende se logrará que los clientes estén más satisfechos con los productos que están adquiriendo.

⁵Definición adoptada por Montgomery

3. LOS GRÁFICOS DE CONTROL

3.1 INTRODUCCION

La tediosa tarea de inspeccionar las unidades finales y eliminar aquellas que no cumplan con las especificaciones una vez terminado el proceso, puede ser reemplazada por una alternativa mucho más económica y eficiente de prevención antes y durante el proceso productivo, gracias al empleo de los gráficos de control, herramienta fundamental del control estadístico de procesos, los cuales además de expresar el desempeño de una variable en algún momento del tiempo, permiten realizar un seguimiento o rastreo en aras de encontrar problemas presentes en el proceso y monitorearlos una vez implementada la solución; todo esto con el fin de lograr que los productos finales lleguen a las manos del cliente o consumidor con un óptimo nivel de calidad.

Los gráficos de control fueron desarrollados en los años 20 por Walter Shewhart, con el objetivo de aprovechar la estadística para supervisar los procesos y reducir la variabilidad en la producción. Estos gráficos representan la evolución en el tiempo de una variable (característica de calidad) con relación a su promedio y a ciertos límites de control, dibujados como rectas limitantes sobre la gráfica.

Es importante resaltar que aunque lo que se inspecciona es el artículo o producto se hace énfasis en el promedio generado por el proceso, ya que si el proceso está controlado, el artículo poseerá características de calidad estandarizadas con poca variación; en otras palabras, las medidas obtenidas estarán muy cercanas al promedio global (promedio generado por el proceso).

Este capítulo se centrará en conocer las características fundamentales de los gráficos de control, así como los tipos tradicionales de gráficos de control utilizados para el control de la variabilidad en los procesos industriales. [21]

3.2 VARIACION DE LOS PROCESOS

Debido a que los diferentes elementos o variables que intervienen a lo largo de un proceso productivo, no necesariamente funcionan de forma exacta; no siempre van a originar los mismos efectos o resultados, introduciendo por lo tanto cierto grado de variabilidad, que puede estar asociado a diversas causas las cuales deben ser investigadas si se desea comprender mejor el proceso y controlarlo, en aras de producir artículos con altos estándares de calidad, que conlleven a beneficios tanto para el cliente como para la organización.

En este sentido, se distinguen dos tipos de causas principales de variación que pueden aparecer en el proceso: causas de variaciones comunes (no asignables) y especiales (asignables).

Las causas de variación comunes, también conocidas como no asignables o aleatorias, constituyen una variación inherente o propia del proceso, es decir tienen carácter permanente o aparecen de forma frecuente; el efecto conjunto de estas causas se puede predecir en base a la experiencia pasada. Algunos ejemplos de estas causas son: variabilidad de las materias primas, variabilidad de la maquinaria, distinta eficacia de la mano de obra.

Por su parte, las causas de variación especiales, también conocidas como asignables, no son parte del proceso; tienen carácter puntual e irregular, es decir ocurren de forma accidental; por lo que dan lugar a variaciones no predecibles que suelen tener un impacto considerable en el proceso productivo, determinando así que este se encuentre bajo control.

De esta forma, cuando se consigue que en el proceso productivo sólo se presenten causas comunes de variación se dice que el proceso está bajo control y es predecible dentro de unos límites estadísticos.

Tabla 2. Comparación entre causas comunes y causas especiales.

Causas comunes	Causas especiales
Originadas por muchas fuentes de poca importancia.	Originadas por pocas fuentes individualmente importantes.
Tienen carácter permanente.	Tienen carácter puntual e irregular.
Dan lugar a una distribución estable y por tanto, previsible.	Modifican la distribución de la producción. Proceso imprevisible.
Son las únicas presentes cuando el proceso está bajo control.	Determinan que el proceso este fuera de control.
Su corrección exige actuaciones a nivel de dirección.	Se corrigen mediante actuaciones locales.

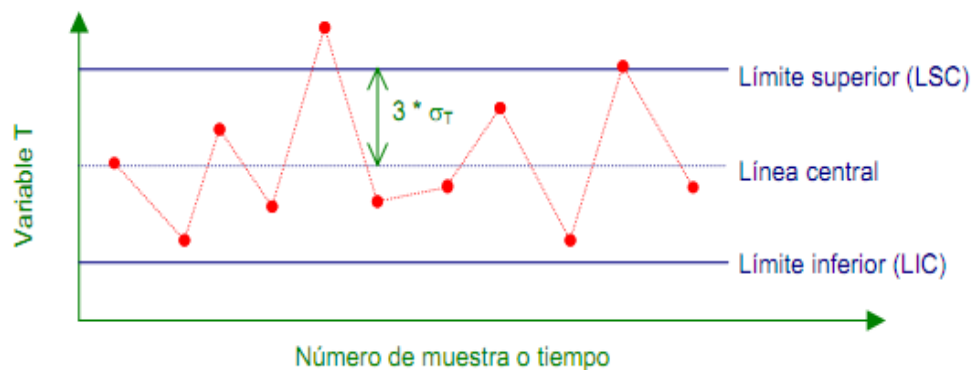
3.3 FORMA Y USO DE UN GRAFICO DE CONTROL

Aunque hay distintos tipos de gráficos de control referidos a distintas pautas de variabilidad, todos tienen unas características comunes y se interpretan de la misma manera. En términos generales, los gráficos de control son una representación a lo largo del tiempo de la información disponible del proceso; dicha información, puede proceder de observaciones individuales, o de un estadístico resumen en el caso de tener observaciones agrupadas en subgrupos.

Así pues, se trata de una representación en el plano cartesiano, donde el eje horizontal, indica el número de la muestra o el tiempo en que se obtiene y el eje vertical indica el valor observado en la muestra. Estos valores son comparados con unos límites de control superior e inferior, representados mediante rectas horizontales situadas por encima y debajo de la línea central, que constituye el valor esperado del proceso productivo. Dichos límites de control, representan una

banda de variación en el comportamiento del proceso como consecuencia de la presencia de causas comunes. Por ende, un punto fuera de estos límites se considera como una evidencia de que el proceso está fuera de control, lo que indica que existe más variación que la esperada si sólo existieran causas comunes de variación.

Figura 1. Ejemplo de un gráfico de control.



Fuente: PROYECTO E-MATH, “capítulo IV: gráficos de control por atributos” [online]. Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Disponible en: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/SPC_4.pdf. [Citado el 3 de Febrero de 2003].

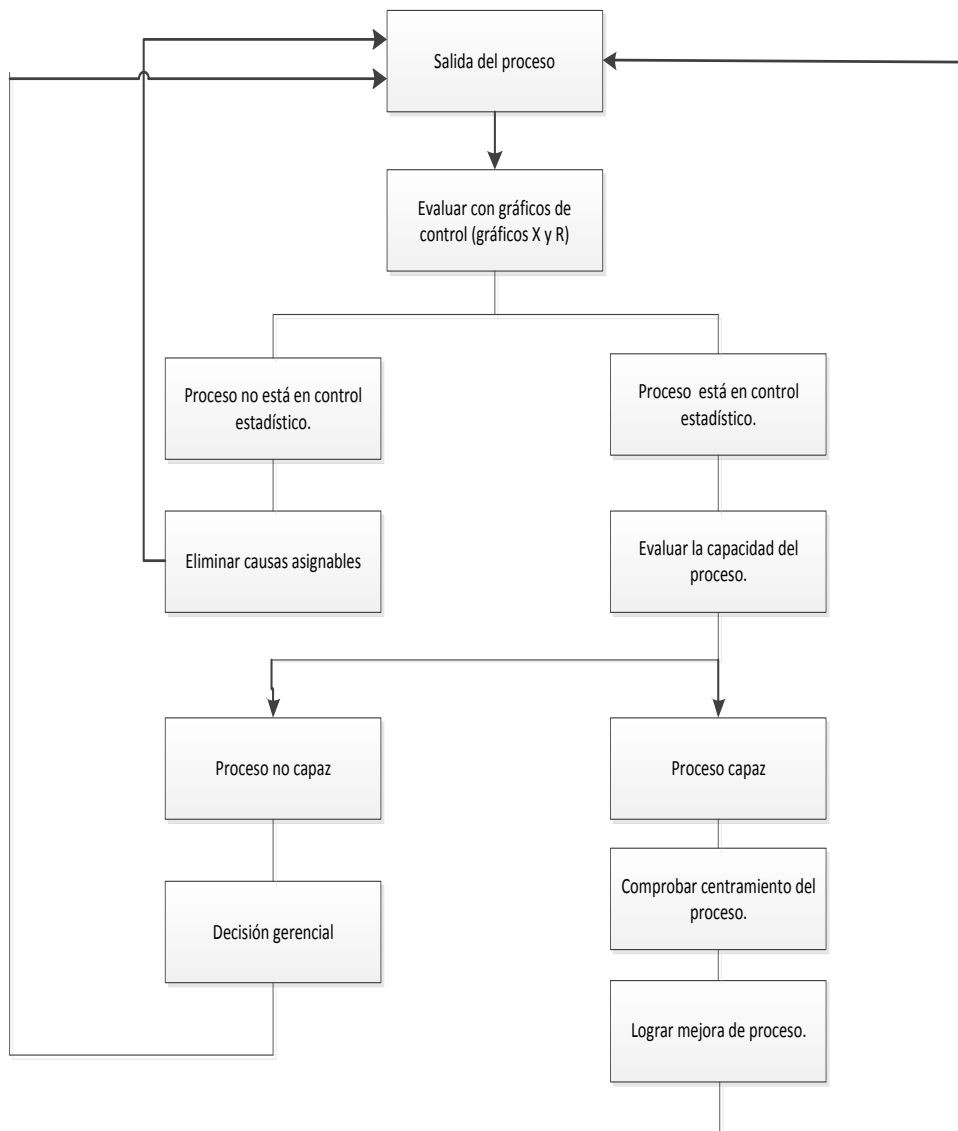
Por otra parte, en la elaboración de un gráfico de control se diferencian dos etapas fundamentales: un período base y un período de vigilancia. En el periodo base se estiman los parámetros necesarios para la construcción del gráfico, basándose en un contraste de hipótesis sobre los valores de los parámetros:

H_0 : el proceso se encuentra bajo control estadístico

H_1 : el proceso se encuentra fuera de control estadístico

Una vez estimados los parámetros en la primera fase, se construye el gráfico de control y se analiza si, a medida que se producen nuevas observaciones, el proceso sigue bajo control, lo que constituye la segunda fase, también conocida como periodo de vigilancia. Las etapas que deben tomarse en cuenta para mejorar el proceso, y por ende la calidad del producto, están esquematizadas en la figura 2. [1]

Figura 2. Diagrama de flujo para mejorar un proceso productivo.



3.4 GRÁFICOS DE CONTROL UNIVARIANTES

Como su nombre lo indica, los gráficos de control univariantes, analizan solamente una variable o característica de calidad; y a su vez dependiendo de dicha característica estos gráficos se pueden clasificar en dos grandes grupos: gráficos de control por variables cuando la característica sea cuantitativa, y gráficos de control por atributos en caso de que sea cualitativa.

Adicionalmente, existen otros gráficos de control univariantes conocidos como gráficos de control con memoria, entre los que se destacan el gráfico CUSUM y el EWMA, los cuales constituyen una alternativa a los gráficos Shewhart, en los que solo se emplea la información obtenida de la última muestra. A continuación se explica con más detalle cada uno de estos gráficos:

3.4.1 Gráficos de control por variables. Los gráficos de control fueron diseñados para controlar la variabilidad del proceso, por lo tanto, si el proceso está bajo control, se espera que las observaciones tomen valores en torno a la media. Según Shewhart la forma de un gráfico de control desde un punto de vista analítico es la siguiente:

$$LSC = E[T_x] + k \cdot D.T.[T_x]$$

$$LC = E[T_x]$$

$$LIC = E[T_x] - k \cdot D.T.[T_x]$$

Donde T_x es un estimador de la característica de calidad en estudio y k es la constante que indica la distancia entre los límites de control y la línea central, expresada en unidades de la desviación típica del estimador, cuyo valor normalmente es tres (3).

En otras palabras la posición de los límites de control se determina a partir de la constante k así como de la probabilidad de cometer un error tipo I o “falsa alarma” (considerar que el proceso está bajo control sin ser cierto) o tipo II (considerar que el proceso está fuera de control sin ser cierto).

Cuando la variable que se está analizando sigue una distribución normal, existe una probabilidad de error tipo I $\alpha = 0,0027$, la cual es muy pequeña y por ende implica que la presencia de una observación fuera de los límites de control es una situación poco probable, que debe ser investigada, para poder determinar si el proceso se encuentra o no bajo control.

Generalmente la información se maneja mediante subgrupos racionales, concepto introducido por Shewhart. Una vez determinados los estadísticos de cada uno de estos, la media global del proceso se estima mediante la media de las medias muestrales de cada subgrupo ($\bar{\bar{x}}$), e igualmente la dispersión se estima como la media de las medidas de dispersión en cada subgrupo. Esto puede generar sesgos en la medición de la variabilidad, de ahí la importancia del tamaño muestral para poder obtener una estimación apropiada de la varianza. Lo ideal es que los subgrupos sean homogéneos de tal forma que si se presentan causas especiales o asignables en el proceso, estas se puedan evidenciar como diferencias entre los subgrupos racionales, y no como diferencias dentro del subgrupo.

Los gráficos de control por variables más conocidos son: el gráfico media - desviación típica, y el gráfico media - rango. La diferencia entre estos gráficos radica básicamente en la medida de dispersión utilizada (rango vs desviación típica), para la estimación de los parámetros. [1]

Gráfico media - desviación típica. Este tipo de grafico se utiliza para controlar dos parámetros básicos de un proceso:

- La media μ , cuyo valor estimado se obtiene promediando las medias muestrales disponibles, es decir mediante \bar{X} .

$$\hat{\mu} = \bar{X} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m}$$

- Y la dispersión, cuya estimación se obtiene a partir de la desviación típica, de la siguiente forma:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{C_4}$$

Donde C_4 es un factor utilizado para obtener una estimación de la desviación típica poblacional y \bar{S} representa la media de las desviaciones típicas de las distintas submuestras.

A partir de la información anterior se establece que la forma analítica del gráfico para la variabilidad es:

$$LSC = \bar{S} \cdot B_4$$

$$LC = \bar{S}$$

$$LIC = \bar{S} \cdot B_3$$

Como se puede observar para establecer los límites de control de este gráfico, se pondera la media de las desviaciones típicas por dos valores, B_4 y B_3 , estas constantes, dependen del número de observaciones en cada submuestra, de la distancia a la que están situados los límites de control (tres desviaciones típicas) y del factor C_4 . Cuando el tamaño muestral es pequeño, el límite inferior de control calculado de esta forma puede llegar a tomar valores negativos; en ese caso, el

límite se sitúa en cero, ya que la medida de dispersión no adopta valores negativos.

En cuanto al gráfico de control de la media del proceso, se establece la siguiente expresión operativa:

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_3 \cdot \bar{S}$$

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_3 \cdot \bar{S}$$

Donde el factor A_3 , también tabulado frente al tamaño de las submuestras, recoge el efecto conjunto de la desviación típica de la media muestral y de factores de corrección del sesgo para situar los límites de control a tres desviaciones típicas.

Gráfico media – rango. El funcionamiento de este grafico es similar al del grafico media – desviación típica, pero cambia el procedimiento para estimar la dispersión, ya que su estimación se obtiene a partir del rango de la siguiente forma:

$$\hat{\sigma}_x = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Donde d_2 es una constante que depende del tamaño de las muestras y \bar{R} representa la media de los rangos de las distintas submuestras. A partir de esta información el gráfico de control de la dispersión tendrá la siguiente forma:

$$LSC = D_4 \cdot \bar{R}$$

$$LC = \bar{R}$$

$$LIC = D_3 \cdot \bar{R}$$

Los factores de ponderación (D_4 y D_3) que acompañan al rango medio en los límites de control recogen el efecto de los factores de corrección de las estimaciones usadas (d_2 y d_3) para situar los límites a tres desviaciones típicas del rango medio, y dependen del tamaño muestral. Al igual que en el gráfico anterior, en caso de que el límite inferior tomara un valor negativo, se sustituiría por cero.

El gráfico de control para la media del proceso adopta la siguiente expresión:

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R}$$

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R}$$

Donde A_2 es la contrapartida de la constante A_3 en el caso de utilizar el rango como medida de dispersión.

Las constantes A_3 , C_4 , B_3 , B_4 en el caso del gráfico media – desviación típica, y A_2 , d_2 , D_3 y D_4 en el caso del gráfico media – rango, se resumen en la tabla 3. [1]

3.4.2 Gráficos de control por atributos. Existen características de calidad conocidas como atributos que se evalúan dando resultados como: conforme o disconforme, defectuoso o no defectuoso. Los gráficos de control por atributos constituyen la herramienta esencial utilizada para controlar dichas características, no cuantificables numéricamente. Ejemplos de tales características son la fracción o porcentaje de unidades defectuosas en la producción (P), el número de unidades defectuosas en la producción (NP), el número de defectos por unidad producida (U), y el número de defectos de todas las unidades producidas (C). [10]

Tabla 3. Constantes para determinar los límites de control de los gráficos $\bar{X} - S$ y $\bar{X} - R$.

Grafico	n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{X} - S$	A ₃	2.659	1.954	1.628	1.427	1.287	1.1182	1.099	1.032	0.975
	c ₄	0.7979	0.8862	0.9213	0.94	0.9515	0.9594	0.965	0.9693	0.9727
	B ₃	0	0	0	0	0.03	0.118	0.185	0.239	0.284
	B ₄	3.267	2.568	2.266	2.089	1.97	1.882	1.815	1.761	1.716
$\bar{X} - R$	A ₂	1.880	1.023	0.729	0.577	0.483	0.419	0.373	0.337	0.308
	d ₂	1.128	1.693	2.059	2.326	2.534	2.704	2.847	2.970	3.078
	D ₃	0	0	0	0	0	0.076	0.136	0.184	0.223
	D ₄	3.267	2.574	2.282	2.114	2.004	1.924	1.864	1.816	1.777

Al igual que en los gráficos de control por variables, representan un estadístico T del proceso frente al número de la muestra o al tiempo. Una línea central representa el valor medio o esperado del estadístico, mientras que los límites de control suelen definir una zona de control que abarca $3\sigma_T$ por encima y por debajo de la línea central.

Este tipo de gráficos se suele aplicar en situaciones en las que el proceso es una operación de montaje complicada, y la calidad del producto se mide en términos de la ocurrencia de disconformidades, del funcionamiento exitoso o fallido del producto, etc. Los diagramas de control por atributos tienen la ventaja de que hacen posible considerar varias características de calidad al mismo tiempo y clasificar los productos como disconformes si no satisfacen las especificaciones de cualquiera de las características.

Hay dos opciones a la hora de realizar un gráfico de control por atributos:

- Comparar un producto con un estándar y clasificarlo como defectuoso o no (gráficos P y NP)

- En el caso de productos complejos, la existencia de un defecto no necesariamente conlleva a que el producto sea defectuoso. En tales casos, puede resultar conveniente clasificar un producto según el número de defectos que presenta (gráficos C y U).

Es importante notar que los gráficos P, NP, y U permiten trabajar con muestras de tamaños diferentes, mientras que los gráficos C están diseñados para muestras de igual tamaño.

En la tabla 4, se dan a conocer los parámetros para la elaboración de los gráficos de control por atributos, en ellos se evidencian letras que corresponden a:

- p es la probabilidad de que cualquier artículo no este conforme con las especificaciones.
- n es el número de elementos en la muestra.
- n_i es la cantidad de defectos por unidad de inspección.
- u es el número esperado de unidades defectuosas en cada una de las muestras. [26]

Tabla 4. Gráficos de control por atributos

Grafico	Línea central	Límite superior de control	Límite inferior de control
Grafico P	$LC = p$	$LSC = p + 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$	$LIC = p - 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$
Grafico NP	$LC = np$	$LSC = np + 3\sqrt{np(1-p)}$	$LIC = np - 3\sqrt{np(1-p)}$
Grafico C	$LC = n_i \cdot u$	$LSC = n_i \cdot u + 3\sqrt{n_i \cdot u}$	$LIC = n_i \cdot u - 3\sqrt{n_i \cdot u}$
Grafico U	$LC = u$	$LSC = u + 3\sqrt{\frac{u}{n_i}}$	$LIC = u - 3\sqrt{\frac{u}{n_i}}$

3.4.3 Gráficos de control con memoria. Debido a su sencillez, tanto en la elaboración como en la interpretación de los resultados obtenidos los gráficos de control clásicos son ampliamente utilizados a nivel industrial y empresarial. Sin embargo, una de las principales desventajas de estos gráficos radica en el hecho de que solo utilizan la información derivada de la última muestra, lo que conlleva a que puedan detectar grandes cambios en el proceso, pero no son tan eficientes ante cambios de pequeña magnitud.

Ante tal situación, se han desarrollado otros tipos de gráficos, conocidos como gráficos de control con memoria, los cuales incorporan toda la información suministrada, mediante la utilización de estadísticos muestrales que acumulan los datos del presente y el pasado. Por lo tanto, cuando en un proceso se origina una pequeña desviación del estado de control, este tipo de gráfico resulta ser efectivo; ya que tarda menos tiempo en detectar el desajuste, que los gráficos tradicionales.

Los gráficos de control con memoria, no se basan en observaciones individuales, o promedios de una muestra de ellas, sino en la acumulación de información, de ahí se deriva su nombre. Los más conocidos son: gráfico de sumas acumuladas CUSUM y el gráfico de control de medias móviles exponenciales ponderadas EWMA, los cuales se explican a continuación: [1]

Gráfico de control de sumas acumuladas: CUSUM. El término CUSUM procede del inglés cumulative-sum, que significa suma acumulada. Estos gráficos fueron propuestos por Page (1954) y se basan en la representación de la acumulación de las desviaciones de cada observación respecto a un valor de referencia.

El estadístico de sumas acumuladas (C_k) adopta la forma:

$$C_k = \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \mu)$$

Donde \bar{x}_i es la media de la muestra i -ésima y μ representa el valor objetivo, usualmente fijado en la media global del proceso. Los valores de C_k evolucionan alrededor de su valor medio, que es cero. De esta forma, si $E(X_k) = \mu$, entonces $E(X_k - \mu) = 0$.

$$E(C_k) = E\left[\sum_{i=1}^k (x_i - \mu)\right] = \sum_{i=1}^k E(x_i) - k\mu = k\mu - k\mu = 0$$

Y la suma acumulada C_k tendrá una trayectoria que, de forma aleatoria, evolucionará alrededor de una horizontal de valor cero. Por el contrario, si la media cambia y pasa a valer $E(X_k) = \mu^* = \mu + \delta \neq \mu$, entonces $E(X_k - \mu) = \delta$.

$$E(C_k) = E\left[\sum_{i=1}^k (x_i - \mu)\right] = \sum_{i=1}^k E(x_i) - k\mu = k(\mu + \delta - \mu) = k\delta$$

Y la suma acumulada C_k llevará ahora una trayectoria que evolucionará alrededor de una recta de pendiente positiva o negativa, según el signo de δ . Por lo tanto, en caso de observar una clara tendencia en el estadístico, se puede sospechar que el proceso está situado fuera de control.

Para determinar los límites de control en este gráfico existen dos planteamientos distintos, conocidos como cusum tabular o algorítmico y la plantilla o máscara en V:

- **Cusum algorítmico**

Si se desea controlar la evolución de una variable $X_i \sim N(\mu_0, \sigma)$, donde σ es conocida o se posee una estimación. El Cusum algorítmico (o tabular) calcula las desviaciones de cada valor respecto del valor objetivo o nominal μ_0 . Para esto el gráfico distingue entre desviaciones positivas y negativas, esto debido a que en

muchas situaciones ambas desviaciones no tienen la misma repercusión o impacto en el proceso.

Para la construcción del gráfico, es necesario definir un valor K que determina la sensibilidad del grafico de control, es decir una especie de umbral a partir del cual se considera que la desviación acumulada es significativa; de esta forma, si la suma acumulada hasta la observación i-ésima es menor que K, se considera que la desviación acumulada es cero. Al complementar esta idea de desviación significativa con las de separación de desviaciones positivas y negativas se tendrán dos tipos de sumas significativas acumuladas:

- C_i^+ : acumulación de desviaciones positivas significativas:

$$C_i^+ = \max [0, \{C_{i-1}^+ + (x_i - \mu_0)\} - K]$$

De esta forma, si el proceso está bajo control, la variable x_i tomara valores cercanos al nominal y el término C_i^+ tendera valores nulos.

- C_i^- : acumulación de desviaciones negativas significativas:

$$C_i^- = \max [0, \{C_{i-1}^- - (x_i - \mu_0)\} - K]$$

El valor de k se suele elegir en función de la desviación que se quiera detectar. Suponiendo que el valor nominal de la variable de interés es μ_0 y se desea detectar que el proceso se ha desajustado pasando de un nivel medio μ_0 a un nuevo nivel medio μ_1 . Este valor puede expresarse en función del número de desviaciones típicas que le separan de μ_0 . Por tanto,

$$\mu_1 = \mu_0 + \delta * \sigma$$

O bien,

$$\mu_1 = \mu_0 - \delta * \sigma,$$

Con $\delta > 0$. Se suele tomar como valor umbral K a la mitad de la distancia entre μ_1 y μ_0 , es decir,

$$K = \frac{\delta}{2}\sigma = \frac{|\mu_0 - \mu_1|}{2}.$$

O bien,

$$K = k\sigma; k = \delta/2$$

Los valores de las sumas acumuladas C_i^+ y C_i^- se han de comparar con el valor máximo admisible, denominado como valor de decisión H :

$$H = h\sigma$$

Donde se recomienda que $h=5$, por tanto $H=5\sigma$ (algunos autores también recomiendan valores de $h=4$). De esta forma, los valores $\pm H$ constituyen los límites de control de este gráfico.

$$K = k \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

$$LSC = h \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

$$LIC = -h \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

- **Plantilla V**

El procedimiento de la plantilla V es el procedimiento más popular del gráfico Cusum, propuesto por Barnard (1959), y basado en la representación gráfica del estadístico CUSUM:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0)$$

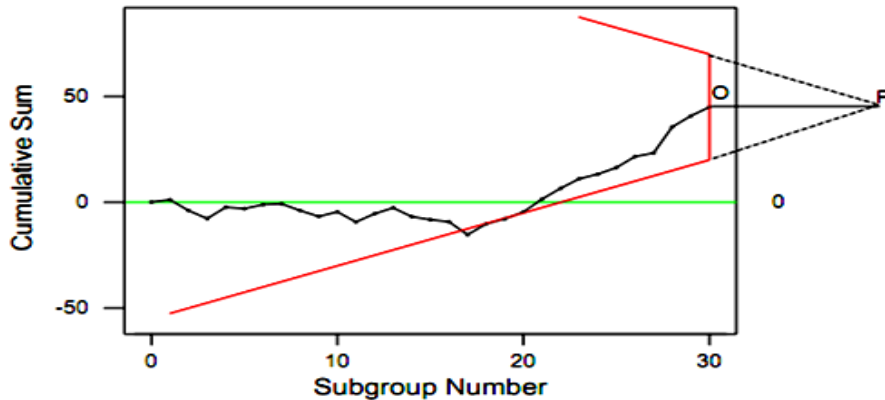
Aunque algunos programas informáticos utilizan la estandarización de la variable de interés x_j ; es decir:

$$C_i = \sum_{j=1}^i \left(\frac{x_j - \mu_0}{\sigma} \right),$$

En términos generales, la representación de la máscara en V, se presenta en la figura 3.

Como se puede observar en la figura 3, la máscara se sitúa en el gráfico de sumas acumuladas con el punto O situado en el último valor de las sumas acumuladas y la línea OP paralela al eje de abscisas. La forma de interpretar el gráfico es la siguiente: si todas las sumas acumuladas caen dentro de los dos brazos de la máscara, se puede considerar que el proceso está bajo control; por el contrario si alguna suma acumulada cae por fuera de esos brazos, se dice que el proceso se encuentra fuera de control.

Figura 3. Representación de la máscara en V.



Fuente: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, “capítulo 6: gráficos de control con memoria” [Online]. Disponible en: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/kaiser/esp/calidad/capitulo6.pdf>.

Por otra parte, el comportamiento de este gráfico viene determinado por el valor de la distancia d (distancia del segmento OP) y del ángulo ω , determinados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$d = \frac{2 \sigma^2}{\delta^2 \bar{n}} \ln \left(\frac{1 - \beta}{\alpha/2} \right)$$

$$\omega = \arctan \left(\frac{\delta}{2A} \right)$$

Dónde:

- A depende de la escala del gráfico. Es la distancia horizontal entre puntos sucesivos del eje de abscisas medida en las unidades del eje de ordenadas. Si el gráfico se realiza con un programa estadístico este parámetro viene ya predeterminado y no necesita calcularlo el analista.
- δ es la sensibilidad del análisis y es el grado de desajuste que se quiere detectar, en número de desviaciones típicas. Así por ejemplo, si se desea detectar que la media aumente de μ_0 a μ_1 se tiene que $\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma$
- α es la probabilidad de una falsa alarma cuando el proceso está bajo control (error tipo I)
- β es la probabilidad de no detectar una desviación δ (error tipo II)
- \bar{n} es el promedio de los tamaños muestrales. Si el gráfico es de observaciones individuales se tendrá $\bar{n} = 1$

Autores como Montgomery no están de acuerdo con esta forma de implementar el gráfico Cusum con máscara V y prefieren el gráfico asociado al Cusum algorítmico. Algunas razones de este rechazo son las siguientes:

- La máscara en V es un esquema bilateral, impidiendo su aplicación cuando se conoce la dirección del cambio en la media.

- En ocasiones, es difícil determinar hasta dónde deben extenderse los brazos de la máscara V, por lo que, la interpretación se hace más difícil en la práctica.
- La ambigüedad existente a la hora de determinar σ y β .

Los gráficos Cusum estudiados anteriormente se utilizan para el control de la media, no obstante se han analizado y desarrollado nuevos métodos para el control de la variabilidad, buscando estadísticos que sean mucho más sensibles y eficientes ante cambios en la varianza. Es por esto que Hawkins (1981, 1993) propone un nuevo grafico de control (suponiendo que la característica de calidad sigue una distribución normal con media μ_0 y desviación típica σ_x) basado en el estadístico:

$$v_i = \frac{\sqrt{|y_i|} - 0,822}{0,349}$$

Donde y_i es el valor estandarizado de la media \bar{x}_i .

Este tipo de grafico es de gran utilidad para controlar la variabilidad del proceso, mediante el cálculo de los siguientes estadísticos:

$$S_i^+ = \max [0, v_i - k + S_{i-1}^+]$$

$$S_i^- = \max [0, -k - v_i + S_{i-1}^-]$$

Asumiendo que $S_0^+ = S_0^- = 0$

La interpretación del grafico se realiza de forma similar a la de los gráficos para el control de la media; así por ejemplo si la desviación típica del proceso aumenta, el valor de S_i^+ se incrementara, excediendo el valor h en el que están situados los límites de control y si la desviación típica decrece, el valor de S_i^- aumentará y excederá el valor h . [29]

Gráfico de control de medias móviles exponencialmente ponderadas: EWMA.

Al igual que los gráficos Cusum, estos gráficos son utilizados para detectar pequeños cambios en la media del proceso; se realizan usualmente sobre observaciones individuales y acumulan en cada periodo los valores de observaciones pasadas, en otras palabras la variable que se representa en cada periodo es un promedio de la observación contemporánea y las observaciones anteriores, pero dando más peso a las observaciones más recientes. En general, a este tipo de promedios donde en cada instante se incorpora nueva información y se le va restando peso a las informaciones históricas se le denomina media móvil⁶. Mediante los gráficos Ewma se da un peso a las informaciones históricas que decaen exponencialmente con el tiempo. Esta media móvil esta denotada por y_0 , y se define como:

$$y_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) y_{i-1}$$

Donde $y_0 = \mu_0$ o bien $y_0 = \bar{y}$, y donde el parámetro λ lo puede decidir el analista en el rango $0 < \lambda \leq 1$. Por tanto, en cada momento, se pondera la observación actual x_i con el valor de la media móvil anterior y_{i-1} . Así, al sustituir recursivamente se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} y_i &= \lambda x_i + (1 - \lambda)[\lambda x_{i-1} + (1 - \lambda)y_{i-2}] = \lambda x_i + \lambda(1 - \lambda)x_{i-1} + (1 - \lambda)^2 y_{i-2} \\ &= \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j x_{i-j} + (1 - \lambda)^i y_0. \end{aligned}$$

De esta forma, si los pesos $\lambda < 1$ los pesos $\lambda (1 - \lambda)^j$ van disminuyendo con un decaimiento exponencial j . Además puede observarse que:

$$\lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j + (1 - \lambda)^i = 1$$

⁶ Moving Average

Si se cumplen las hipótesis de independencia y estabilidad sobre x_i (media y varianza constantes) se tiene que:

$$E(y_i) = \mu_0$$

$$\text{Var}(y_i) = \sigma^2 \frac{\lambda[1 - (1 - \lambda)^{2i}]}{2 - \lambda}$$

Por lo tanto, los límites de control y la línea central son:

$$LCS = E(y_i) + k\sqrt{\text{Var}(y_i)}$$

$$LC = E(y_i)$$

$$LCI = E(y_i) - k\sqrt{\text{Var}(y_i)}$$

Reemplazando los respectivos valores de la media y varianza y para $k = 3$, se tiene que:

$$LCS = \mu_0 + 3\sigma\sqrt{\frac{\lambda[1 - (1 - \lambda)^{2i}]}{2 - \lambda}}$$

$$LC = \mu_0$$

$$LCI = \mu_0 - 3\sigma\sqrt{\frac{\lambda[1 - (1 - \lambda)^{2i}]}{2 - \lambda}}$$

Como se puede observar, estos límites de control no van a ser constantes, ya que van a aumentar a medida que se incrementa el número de submuestras, tendiendo a estabilizarse, pues con grandes valores del término i , el término $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$ converge a la unidad. Es por esto que en algunos casos, los límites de control viene definidos de la siguiente forma:

$$LCS = \mu_0 + 3\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}$$

$$LC = \mu_0$$

$$LCI = \mu_0 - 3\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}$$

En la práctica suelen elegirse valores de λ en el rango $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$. Cuanto mayor sea el valor de λ menos importancia se está dando a los valores alejados

en el tiempo, ya que el decrecimiento exponencial será mucho más rápido y la memoria será corta. Por el contrario cuanto menor sea el valor de λ , el decrecimiento exponencial ocurrirá de forma más lenta, lo que implica que la información del pasado tendrá más valor, ya que la memoria del gráfico será más larga. Por lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta que este tipo de gráficos se usa para determinar o detectar pequeños desajustes, es recomendable utilizar valores de λ pequeños. [29]

Al igual que en los gráficos de control Cusum, para los gráficos Ewma también se han desarrollado nuevos métodos enfocados al control de la variabilidad. MacGregor y Harris (1993) proponen el uso del estadístico Ewma para controlar la desviación típica del proceso, lo que denominan error cuadrático medio exponencialmente ponderado⁷:

$$S_t^2 = \lambda (\bar{x}_t - \mu)^2 + (1 - \lambda) S_{t-1}^2$$

Se puede demostrar que $E(S_t^2) = \sigma^2$ para muestras de tamaño grande y además, si las observaciones son independientes, esta estimación tiene, aproximadamente, una distribución chi-cuadrado con v grados de libertad. Los respectivos límites de control están dados por:

$$LSC = \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi_{v, \alpha/2}^2}{v}} \quad LIC = \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi_{v, 1-(\alpha/2)}^2}{v}}$$

MacGregor y Harris (1993) señalan que el estadístico EWMSE puede ser sensible tanto a cambios en la media como en la desviación típica del proceso. Para solucionar este problema proponen sustituir en cada punto del tiempo por la estimación de este valor mediante el estadístico EWMA (z_i), de tal forma que el

⁷ EWMSE, exponentially weighted mean square error

valor a representar gráficamente, junto a los límites de control correspondientes se determina como: [1]

$$S_i^2 = \lambda (\bar{x}_i - z_p)^2 + (1 - \lambda) S_{i-1}^2$$

3.5 INDICES DE CAPACIDAD DE LOS PROCESOS

Los índices de capacidad son estimaciones numéricas de la capacidad del proceso, es decir, dan una idea de cuán capaz es el proceso (a qué nivel cumple con las especificaciones).

Tabla 5. Síntesis índices de capacidad de los procesos.

Índice	Uso y Definición	Formula
C_p	Se utiliza cuando el proceso está centrado en los límites de especificación. Es el radio entre la amplitud permitida (distancia entre los límites de especificación) y la amplitud natural.	$(LES - LEI) / 6\sigma$
C_{pk}	Se utiliza cuando el proceso no está centrado en los límites de especificación, pero está contenido en ellos. Representa el cociente entre la amplitud permitida y la amplitud natural teniendo en cuenta la media del proceso respecto al punto medio de ambos límites de especificación.	$\text{Min}\{ (LES - \mu)/3\sigma , (\mu - LEI)/3\sigma \}$
C_{pu}	El proceso solo tiene un límite de especificación superior	$(LES - \mu) / 3\sigma$
C_{pl}	El proceso solo tiene un límite de especificación inferior.	$(\mu - LEI) / 3\sigma$

Estos estadísticos son muy útiles ya que, aparte de ser sencillos de calcular, no tienen unidades de medida, por lo que permiten comparar distintos procesos. Básicamente, son el cociente entre la amplitud tolerable del proceso (la distancia entre los límites de tolerancia o límites de especificación), y la amplitud real o natural del proceso (habitualmente, la distancia entre los límites de control es de 6 sigma). Algunos de estos estadísticos se definen a partir de la media del proceso o del objetivo. En la tabla 5 se muestran algunas referencias sobre cuándo usar cada uno de los índices. [10]

En este proyecto se dividieron los gráficos de control como tradicionales y no tradicionales, los tradicionales mencionados en este numeral corresponden a los desarrollados por Shewhart y los no tradicionales, que serán comentados en el siguiente numeral, que son aquellos a los cuales se les han hecho modificaciones o en su defecto nuevos gráficos que se han venido desarrollando como herramientas más eficientes y necesarias a la hora de controlar las variaciones que se dan de manera constante en cualquier proceso de producción y que afecta de manera significativa la calidad de los productos y por ende influye en la satisfacción del consumidor final.

4. NUEVOS APORTES A LOS GRÁFICOS DE CONTROL

4.1 INTRODUCCION

Existe una amplia bibliografía acerca de nuevos aportes relacionados a los gráficos de control, ya sean univariados o multivariados. Las técnicas univariantes son utilizadas para controlar los procesos cuando se trabaja con una sola variable que influye en la calidad del producto; pero dado que la mayoría de los procesos industriales dependen de más de una variable, es que han surgido técnicas de control de calidad multivariantes. Cuando se va a trabajar un proceso de esta naturaleza se tienen dos posibles soluciones: la primera es desarrollar métodos de control univariantes para cada característica, pero esta presenta inconvenientes con el error tipo I, ya que si se utilizan gráficos de manera independiente este error en vez de disminuir, aumentaría. Debido a los problemas que presenta la primera solución, se propone una metodología que consiste en controlar todas las características de forma simultánea mediante técnicas de control multivariantes. Mediante esta se podrá analizar el efecto de cada característica de calidad, así como también el efecto de las interacciones que se dan entre ellas. Entre los métodos más usados para construir cartas de control multivariadas para atributos se encuentra la carta de control de Hotelling, sin embargo este método se restringe, usualmente, al caso de distribuciones normales.

El primer método a considerar es la carta de Hotelling o carta AN, basada en la aproximación de la distribución binomial multivariada a la distribución normal multivariada. El segundo método es la carta MNP que consiste en la extensión multivariada de las cartas np univariadas, y la carta r , la cual emplea un método no paramétrico basado en el índice de profundidad de Mahalanobis. Es necesario hacer énfasis en que la teoría que se va a presentar, será para procesos bivariados, es decir cuando se van a controlar dos variables en un proceso. [22]

4.2 CARTA DE CONTROL AN⁸

El enfoque multivariante en control de calidad consiste en plantear el test de hipótesis $H_0: \mu_i = \mu_o$ vs $H_1: \mu_i \neq \mu_o$ donde μ_i es el vector de medias actual μ_i y μ_o es el vector de medias cuando el proceso está bajo control. La carta de control AN fue propuesta por Harold Hotelling en 1947 y se dice que puede considerarse como la equivalencia multivariante del estadístico t-student.

Estos gráficos pueden aplicarse para tamaños de subgrupos mayores o iguales que uno. Geométricamente, la estadística T^2 es proporcional a la distancia al cuadrado entre una observación multivariada y el vector de valores objetivo, donde puntos equidistantes forman elipsoides alrededor de dicho vector. A mayor valor de T^2 , mayor es la distancia entre la observación y el valor objetivo.

El estadístico de Hotelling es:

$$T_i^2 = (\bar{X}_i - \mu_o)' \sum_o^{-1} (\bar{X}_i - \mu_o)$$

Con $\bar{X}_t = (\bar{X}_{t1}, \bar{X}_{t2}, \dots, \bar{X}_{tp})$ como el vector de medias para las p-características, en la i-esima muestra. Cuando el tamaño del subgrupo es igual a n=1, se obtendrán vectores de observaciones en lugar de vectores de medias. Si μ_o y \sum_o son conocidos y el proceso está bajo control, la estadística T_i^2 , se distribuye como una chi-cuadrado central con p grados de libertad ($T_i^2 \sim X_p^2$). [22]

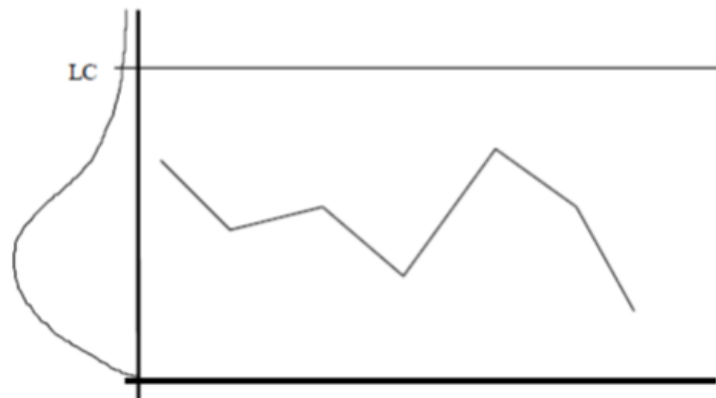
Cuando el proceso está bajo control, esto es $\mu_i = \mu_o$, existe una probabilidad α^9 que el estadístico exceda un valor crítico $X_{p,\alpha}^2$, por tanto, la probabilidad de error conjunto de primera especie se puede fijar exactamente al nivel α produciéndose una alarma cuando $T_i^2 > x_{p,\alpha}^2$. De esta forma se sugiere el uso de un gráfico similar

⁸ También llamada carta Hotelling.

⁹ Proporción de falsa alarma.

al de Shewhart en el que se dibujan los valores de T_i^2 (grafico de control x^2), figura 4, con un único límite de control $LC = X_{p,\alpha}^2$. Cuando se supera el valor LC se dice que el proceso está fuera de control. Si $\mu_i \neq \mu_o$ el estadístico T_i^2 se distribuye como una variable chi-cuadrado no central con p grados de libertad y parámetro de descentrado $\lambda = n(\mu_i - \mu_o)' \Sigma^{-1}(\mu_i - \mu_o)$. [2]

Figura 4. Gráfico de control de Hotelling.



Fuente: APARISI, Francisco; GARCIA D, J. Carlos. Aumento de la potencia del gráfico de control multivariante T^2 de Hotelling utilizando señales adicionales de falta de control. En: estadística española. Vol.43, Núm. 148, 2001, págs. 171-188.

Los dos problemas principales que surgen al aplicar un gráfico T^2 son:

- Generalmente la escala utilizada para graficar los valores, no está relacionada con la escala de ninguna de las variables que están involucradas en el proceso.
- Cuando el estadístico T^2 excede el límite superior de control (L.S.C), no se posee información relevante sobre qué pudo haberla causado. Para esto es

necesario obtener información adicional para determinar las variables que son responsables de que ese valor(es) este fuera del límite de control establecido. Esta información es esencial en cualquier intento de detectar las causas de las desviaciones y posiblemente corregir el proceso. Para esto y debido a que el grafico no es muy confiable en este aspecto se proponer llevar en forma paralela, gráficos de control univariados para cada característica. [22]

4.3 CARTA CONTROL MNP

La carta de control MNP se basa en las unidades no conformes de cada característica de calidad que se tiene en cualquier proceso industrial. Para el desarrollo metodológico de esta carta de control, Lu y Otros (1998) presentan una metodología para desarrollar control estadístico de calidad multivariado para variables tipo atributos, basado en el estadístico W , que es definido como la suma de los conteos de unidades no conformes de cada característica de calidad en una muestra; y es considerado como una metodología alternativa al estadístico T^2 de Hotelling.

4.3.1 Definición del estadístico. Si existen k características de calidad, donde p_i es la probabilidad de no conformidad con respecto a la característica de calidad i . Las características de calidad pueden ser correlacionadas, y esta correlación entre la característica i y la característica j se denota como δ_{ij} , que cumplen las siguientes propiedades.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{ij} = \delta_{ji} \\ |\delta_{ij}| \leq 1 \\ \delta_{ij} = 1, \quad i = j \end{array} \right.$$

En el caso bivariado. Si $P = (p_1, p_2)$ es el vector de fracciones de no conformidad, y ρ_{12} la correlación entre los dos atributos bajo estudio, entonces, para un periodo de tiempo fijo t , el estadístico para la carta MNP es:

$$W_t = \frac{X_{1t}}{\sqrt{p_1}} + \frac{X_{2t}}{\sqrt{p_2}}$$

W cumple con las siguientes propiedades:

- $E[W_t] = m(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})$
- $V[W_t] = m[2 - p_1 - p_2 + 2\rho_{12}\sqrt{(1 - p_1)(1 - p_2)}]$

Puede darse la situación que el vector de fracciones de no conformidad del proceso P y la correlación entre los atributos ρ_{12} no sean conocidos, es por esto que deben ser estimados mediante los datos históricos en control, contenidos en la matriz \bar{X} ; estimados estos parámetros, se puede estimar el vector de fracciones de no conformidad como:

$$\bar{p} = \frac{\bar{X}}{m} = \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ \bar{p}_2 \end{bmatrix}$$

Siendo \bar{X} estimado como: $\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix}$

La correlación entre los atributos ρ_{12} se estima también a partir de la matriz X como:

$$\hat{\rho}_{12} = \frac{\sum_{t=1}^n (X_{1t} - \bar{X}_1)(X_{2t} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_{1t} - \bar{X}_1)^2 \sum_{t=1}^n (X_{2t} - \bar{X}_2)^2}}$$

4.3.2 Determinación de los límites de control. Si se conocen las estimaciones del vector P y de la correlación ρ_{12} , la línea central (CL_{MNP}) y los límites de control (UCL_{MNP} ; límite superior y LCL_{MNP} : límite inferior) de las cartas MNP pueden obtenerse mediante:

$$UCL_{MNP} = m(\sqrt{\bar{p}_1} + \sqrt{\bar{p}_2}) + 3\sqrt{\hat{v}(W_t)}$$

$$CL_{MNP} = m(\sqrt{\bar{p}_1} + \sqrt{\bar{p}_2})$$

$$LCL_{MNP} = m(\sqrt{\bar{p}_1} + \sqrt{\bar{p}_2}) - 3\sqrt{\hat{v}(W_t)}$$

Donde $\hat{v}(W_t)$ se obtiene reemplazando las estimaciones muestrales de p_1, p_2 y ρ_{12} . El estadístico muestral W es calculado para cada muestra en la carta MNP. Si el valor del estadístico W_t se encuentra dentro de los límites de control, se dice que el proceso bivariado en estudio está en control.

4.4 CARTA DE CONTROL r BASADA EN LA PROFUNDIDAD DE MAHALANOBIS.

Esta carta se fundamenta en la noción de profundidad de los datos, es decir se basa en el hecho de que cualquier densidad de probabilidad distingue entre puntos centrales y periféricos. Las profundidades más grandes corresponden al centro de la distribución, mientras que las más pequeñas corresponden a regiones externas.

4.4.1 Definición del estadístico. Se parte del supuesto de que se tienen dos funciones de distribución F y G de dos poblaciones independientes bidimensionales. Así mismo se dice que la matriz \bar{X}^{10} es una muestra tomada de la distribución de referencia F, la cual está en control. Si se tiene $Y = [Y_1 Y_2 \dots]$, considerada como una muestra aleatoria tomada desde la población que tiene la distribución G (una nueva medida tomada del proceso), se busca determinar si la muestra Y está en control, para esto se comparan las distribuciones F y G, mediante la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0 = G = F$$

$$H_1 = \text{hay un cambio de la posición } \frac{y}{0} \text{ un incremento en la escala de G a F.}$$

Para probar la hipótesis anterior se usa el estadístico:

$$R_F(Y_j) = Pr_F(MD_F(X_t) \leq MD_F(Y_j) / X_t \sim F) \quad j = 1, 2, \dots$$

El anterior estadístico caracteriza la distancia entre F y G con respecto a la profundidad de Mahalanobis. Cuando se ha comprobado la prueba de hipótesis mediante la utilización de técnicas estadísticas, se concluye que: bajo la hipótesis H_0 , si $MD_F(Y_j)$ es continua, la distribución de $R_F(Y_j)$ definida anteriormente es uniforme en $[0, 1]$.

Puede darse el caso que la distribución F sea desconocida, para esto la versión muestral del estadístico $R_{F_n}(Y_j)$ es:

$$R_{F_n}(Y_j) = \frac{\# \{MD_{F_n}(X_t) \leq MD_{F_n}(Y_j); t = 1, 2, \dots, n\}}{n}$$

¹⁰Matriz que contiene las estimaciones de las medias de cada población.

4.4.2 Determinación de los límites de control. Los límites de la carta r se basan en que bajo H_0 , $R_{F_n}(Y_j)$ es aproximadamente una distribución uniforme en $[0,1]$, cuyo valor esperado es $0.5 (CL_r)^{11}$. Como el valor de $R_{F_n}(Y_j)$ indica la probabilidad de que Y_j sea un punto dentro del conjunto de datos históricos en control X, entonces el límite de control inferior (LCL_r) es α . Donde, α es la proporción de falsa alarma. Por diseño el límite de control superior (UCL_r) se asume con valor de uno.

Por lo anterior se puede decir, que en una carta de control r cuando los valores de $R_{F_n}(Y_j)$ están en la región α (entre 0 y α) el proceso está fuera de control estadístico.

En la práctica el gráfico T^2 de Hotelling es el más utilizado cuando se trata de datos multivariados, pero debido al pobre comportamiento que este presenta a la hora de detectar cambios de pequeña magnitud, se presentan los gráficos MEWMA y MCUSUM, los cuales fueron desarrollados para dar solución al comportamiento del gráfico T^2 de Hotelling. [22]

4.5 GRÁFICO MEWMA (EWMA MULTIVARIANTE)

El gráfico MEWMA es la extensión multivariante del gráfico de control EWMA, esta primera referencia se debe a Lowry, Woodall, Champ y Rigdon (1992). Es considerado como un gráfico con mayor potencia que el gráfico de control multivariante T^2 de Hotelling, ya que tienen cuenta tanto la información actual del proceso como la del pasado, razón por la cual es más eficiente al detectar cambios pequeños.

¹¹ Línea central

En el caso multivariante se está interesado en el control simultáneo de p variables correlacionadas entre sí. En este caso $\overline{x_1, x_2, \dots}$, son vectores de longitud p que representan las medias muestrales tomadas del proceso. Para lo anterior se supone que los vectores aleatorios $\overline{x_i}$ son independientes y están idénticamente distribuidos según una distribución normal p-variante de media $\vec{\mu}$ y matriz de covarianzas Σ , $\overline{x_i} \approx N_p(\vec{\mu}, \Sigma)$. Al igual que en el gráfico de Hotelling, se considera que el proceso está bajo control si $\vec{\mu} = \vec{\mu}_0$ y fuera de control en caso contrario.

Se define el vector \vec{Z}_i como:

$$\vec{Z}_i = r\vec{X}_i + (1 - r)\vec{Z}_{i-1} \quad i \geq 1$$

Se toma como vector de partida $\vec{Z}_0 = \vec{\mu}_0$, ya que si el proceso está bajo control $E(\vec{Z}_i) = \vec{\mu}_0$ y la matriz de covarianzas de \vec{Z}_i es Σ_{Z_i} ; \vec{X}_i es el vector con los datos muestrales y r es un escalar cuyo valor se encuentra entre 0 y 1. Cuando r=1 se obtiene el gráfico T^2 de Hotelling. El estadístico que se grafica T_i^2 se define como:

$$T_i^2 = \vec{Z}_i' \sum_{Z_i}^{-1} \vec{Z}_i$$

Donde $\sum_{Z_i}^{-1}$ es la inversa de la matriz de varianzas-covarianzas de Z_i . La matriz de covarianzas de Z_i es expresada mediante la ecuación:

$$\sum_{Z_i} = \frac{r[1 - (1 - r)^{2i}]}{2 - r} \Sigma$$

El análisis del gráfico se basa en que al graficar, se tiene una señal fuera de control cuando $T_i^2 > h$, donde h es el límite de control elegido para conseguir un valor determinado de ARL cuando el proceso está bajo control (ARL₀)¹². [1]

¹²Considerada como un valor experimental o subjetivo.

4.6 GRAFICO MCUSUM (CUSUM MULTIVARIANTE)

Considerado como la extensión multivariante del gráfico de control de sumas acumuladas que se denota como MCUSUM. Para la utilización de este gráfico, pueden utilizarse dos aproximaciones distintas¹³: la primera es analizar de forma simultánea varios procedimientos CUSUM univariantes; y la otra consiste en realizar una modificación del esquema CUSUM para procesos multivariantes. Es decir, el primer método supone la descomposición de las observaciones multivariantes en univariantes, para aplicar gráficos CUSUM a estos datos obtenidos; mientras que el segundo método consiste en desarrollar un MCUSUM directamente a las observaciones multivariantes. [1]

Por lo anterior, se puede decir que si se va a utilizar un gráfico MCUSUM para controlar varias variables en un proceso, debe escogerse el gráfico que mejor se adecue a las necesidades y sobre todo que se pueda controlar el error tipo I que se da si se elaboran varios gráficos univariantes, para controlar cada característica de calidad.

Una vez concluido el marco teórico referente a los gráficos de control multivariados, se tendrán en cuenta los nuevos aportes que se han dado en los últimos años para los gráficos de control por atributos univariantes, entre los cuales se pueden destacar de manera cronológica algunos como:

- El desarrollo de una metodología estadística adecuada para el control de la existencia de autocorrelación significativa en cualquier proceso productivo resulta ser de primordial importancia en vista de evitar posibles errores en su respectivo análisis; es por esto que J. Cordeiro y J. G. Requeijo, plantean en su paper “aplicación de control estadístico de procesos a el sector de pintura a un fabricante de vehículos”, la introducción de modelos ARIMA para la

¹³Crosier (1988)

modelización de los procesos, con el fin de corregir la desviación que se da cuando los datos están correlacionados entre si y por lo tanto evitar que se viole el supuesto de independencia estadística planteado en el uso de los gráficos de control de Shewhart. [5]

- Khoo en el año 2004 analiza el gráfico c utilizado para monitorizar el número de defectos en una unidad de inspección de producto, especialmente cuando la probabilidad de ocurrencia de un defecto es relativamente pequeña. Sin embargo, el gráfico c es lento en la detección de cambios pequeños. A cambio propone una alternativa más eficiente basada en la construcción de un gráfico de control de medias móviles de Poisson para el número de defectos. Para esto se hace una demostración de los ARL (Average Run Length) de ambos gráficos, mostrando que la nueva aproximación ofrece una detección más rápida de las condiciones fuera de control, mientras que a la vez consigue un ARL-bajo control más largo. [14]
- En el artículo propuesto por Chakraborti and Human en el 2006 se analiza la estimación de parámetros y el comportamiento del gráfico p, centrándose, en las tasas de falsa alarma (α) y en el ARL bajo control. Se demuestra que cuando se ha de estimar el valor de p, entonces las recomendaciones habituales de 10 a 20 subgrupos de tamaño 5 son insuficientes para obtener un $\alpha = 0,0027$. Se ofrecen las fórmulas y reglas para alcanzar los objetivos de α y ARL que se fijen, siendo que el gráfico p es una distribución discreta (binomial), en la que es bastante improbable ser capaz de garantizar una tasa de falsa alarma – α - exacta como es habitual en grecos de control por variables. [4]
- En el 2006 Lucas, Davis, and Saniga presentaron un estudio en el que se planteaba un método para mejorar la información proporcionada por los gráficos c y np. Se trata de aquellos casos en particular en los que el límite de

control inferior es cero, y se busca señalar un incremento de la calidad del proceso cuando se contabiliza en k o más muestras que ocurren o defectos por unidad de inspección o unidades defectuosas.

- Wu, Luo, and Zhang 2006, presentaron un algoritmo para la optimización del diseño del gráfico np , proponiendo un diseño reducido para maximizar la efectividad del gráfico np manteniendo la tasa de falsa alarma a un nivel específico y su sencillez de comprensión y operación. [31]
- En un artículo publicado por Kaya and Engin en el 2007, se propone una solución para definir el tamaño de muestra en gráficos de control por atributos desarrollando procesos en varias fases y resolviéndolo mediante algoritmos genéticos. [13]

4.7 TRATAMIENTO DE LA AUTOCORRELACION EN LOS GRAFICOS DE CONTROL

Como bien se ha analizado en numerales anteriores, la utilización de los gráficos de control implica el cumplimiento de que las observaciones sean independientes y estas generalmente estén distribuidas de manera normal. Sin embargo, en la mayoría de los procesos de producción, no se le da cumplimiento a este supuesto, ya que normalmente se observa un cierto grado de autocorrelación, ya sea por la naturaleza del proceso o por la forma como se están obteniendo los datos muestrales. Cuando esta autocorrelación es ignorada, puede darse el caso que aparezcan más falsas alarmas de las normales, lo que puede ocasionar que los límites de control no estén bien ubicados y por ende no se esté llevando un buen análisis o un buen monitoreo a la variabilidad que se da en el proceso. Este problema, es lo que ha llevado a desarrollar técnicas que permitan controlar la

calidad teniendo en cuenta la correlación que se da entre las observaciones. La alternativa más utilizada para dar solución a este problema, consiste en la elaboración de gráficos de control para los residuos de un modelo de series temporales, conocidos comúnmente como modelos Arima, a continuación se dará una explicación más detallada de estos modelos. [5]

4.7.1 Modelos ARIMA¹⁴. Método de filtrado de series temporales propuesto por Box y Jenkins (1963,1970). Modelos que están caracterizados porque: las observaciones que se tienen de cualquier proceso son consideradas como una serie temporal, las cuales son generadas por un proceso estocástico lineal, caracterizado por la combinación de dos modelos: los modelos AR (modelos autorregresivos), y los modelos MA (de medias móviles), teniendo en cuenta que el proceso va a ser representado mediante una serie de ruidos blancos¹⁵, los cuales se caracterizaran por tener media nula, varianza constante y covarianza nula.

Los modelos ARIMA son una extensión de los modelos ARMA, la diferencia radica en el número de diferenciaciones que se le tienen que hacer a los datos para que pueda considerarse como un proceso estacionario, algo que normalmente no se asume en ningún proceso de producción. El modelo es denotado como ARIMA (p,d,q) , donde el parámetro d se refiere a las diferenciaciones mencionadas anteriormente; los parámetros p y q son determinados mediante la función de auto correlación y la función de auto correlación parcial.

Box y Jenkins propusieron un procedimiento práctico desarrollado en tres etapas para hallar el modelo ARIMA óptimo, a continuación se describen cada una de estas etapas:

¹⁴La palabra ARIMA significa Modelos Autorregresivos Integrados de Medias Móviles.

¹⁵Termino de error característico en estos modelos.

Etapa 1. Identificación: etapa correspondiente a encontrar el modelo ARIMA que mejor se ajuste a la serie. De acuerdo a la metodología, las herramientas que permiten identificar el patrón que sigue la serie son las funciones de autocorrelación. Esto se entiende así: cada modelo ARIMA tiene asociadas unas funciones de autocorrelación teóricas, es por esto que aquí se comparan las funciones de autocorrelación estimadas con las teóricas y se elige como modelo aquel al que más se aproximen ambas. En la tabla 6 se da a conocer una herramienta para identificar el modelo a partir de las funciones de autocorrelación.

Tabla 6. Técnicas para encontrar el mejor modelo ARIMA que se ajuste a los datos.

Modelo	FAC(Función de autocorrelación)	FAP (Función de autocorrelación parcial)
MA(q)	Se anula para retardos superiores a q.	Decrecimiento rápido sin llegar a anularse.
AR(p)	Decrecimiento rápido sin llegar a anularse.	Se anula para retardos superiores a p.
ARMA(p,q)	Decrecimiento rápido sin llegar a anularse.	Decrecimiento rápido sin llegar a anularse.

Etapa 2. Estimación: aquí se obtendrán las estimaciones de los parámetros del modelo ARIMA, una vez se ha identificado el modelo.

Etapa 3. Comprobación: algunas de las comprobaciones que se deben realizar son que los residuos cumplen las hipótesis de ruido blanco o que no existen coeficientes no significativos. Una vez comprobado que el modelo es el correcto, se podrán hacer predicciones usando el mismo.

La mayor dificultad en la aplicación de estos modelos es el poder ajustar el modelo más adecuado a la información. La mayoría de los procesos de producción puede trabajarse mediante un modelo autorregresivo AR (1). Este modelo se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$(Y_t - \mu) = \phi(Y_{t-1} - \mu) + \varepsilon_t$$

Donde $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$

Al utilizar un modelo AR (1) para representar el comportamiento de un proceso, la varianza de la característica de calidad se calculará a partir de:

$$\sigma_Y^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1 - \phi^2}$$

Debido a que se tienen n observaciones independientes, al elaborar el grafico de control se necesitará la media y la desviación del proceso. Si estos valores se desconocen, tendrán que ser estimados; para estimar la media global del proceso y la desviación se utilizara la media del rango móvil corregida por un factor d_2 , utilizado en los gráficos de control, por lo tanto se tiene que:

$$\sigma_y = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Dónde:

$$\overline{MR} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n MR_i$$

$$MR_i = |Y_i - Y_{i-1}|$$

La modelización realizada a partir de los modelos ARIMA juega un papel de filtro que puede eliminar la autocorrelación existente en el proceso, resultando en residuos independientes y distribuidos normalmente. Con estos residuos, se

realizan cartas de control de Shewhart, correspondientes a la fase I. posteriormente, cuando el proceso está bajo control estadístico, se hacen predicciones por periodos sucesivos y se calculan los errores de predicción. Estas predicciones de errores será el conjunto de datos al que se dará seguimiento en la fase II del control de la variabilidad de los procesos. En la tabla 7 se presentan las fórmulas que permitirán la estimación de los límites de control para los gráficos de Shewhart al utilizar los residuos como datos principales. [1]

Tabla 7. Gráfico de control de Shewhart a partir de modelos ARIMA.

Carta	LSC	LC	LIC	$\hat{\mu}$
e	$3(\overline{MR}/d_2)$	0	$-3(\overline{MR}/d_2)$	
\bar{e}	$A_2\bar{R}$	0	$-A_2\bar{R}$	
	$A_3\bar{S}$	0	$-A_3\bar{S}$	
R	$D_4\bar{R}$	\bar{R}	$D_3\bar{R}$	\bar{R}/d_2
S	$B_4\bar{S}$	\bar{S}	$B_3\bar{S}$	\bar{S}/c_4
MR	$D_4\overline{MR}$	\overline{MR}	$D_3\overline{MR}$	\overline{MR}/d_2

Son bastantes los estudios posteriores, es decir los nuevos aportes que se le han dado a los gráficos de control, ya sea para variables o para atributos, así como para datos univariados o multivariados. En el siguiente capítulo se llevará a cabo un análisis de cada uno de los gráficos, con el fin de hacer comparaciones entre ellos y decidir porque gráficos se optará para la aplicación de la propuesta metodológica a realizar en el proyecto.

5. ANALISIS DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL Y SUS NUEVOS APORTES

Aunque desde hace mucho tiempo se viene hablando de calidad, esta ha adquirido gran importancia en los últimos años, y es por esto que cada vez más las empresas se suman a la tarea de producir artículos con altos estándares de calidad, buscando que cumplan con una serie de especificaciones y parámetros, a fin de garantizar la satisfacción de los clientes, y a su vez, generar reducción en los costos, una mayor productividad y rentabilidad.

Los primeros intentos por mejorar la calidad de los productos utilizaban como principal recurso la inspección, de esta forma la información que se extraía del producto final era utilizada para actuar nuevamente sobre el mismo producto. En una segunda etapa, la realimentación de la información extraída del producto se comenzó a utilizar en el proceso; sin embargo la información obtenida de los clientes era tan distante del momento de fabricación del producto que en la mayoría de las ocasiones no era útil. En la actualidad los nuevos sistemas de control de procesos enfocan su atención no en la inspección del producto final, sino en el conocimiento, monitoreo y control del proceso productivo.

Así, el control y mejora de procesos, se puede visualizar como una actividad enfocada hacia la prevención y por tanto, los gastos que implica su implantación más que un costo, constituyen una buena inversión para las empresas.

El control de los procesos se realiza principalmente a través de los gráficos de control, cuya función es brindar una señal de alerta (en este caso estadística) cada vez que se presenten causas especiales o asignables de variación, de tal forma que se puedan tomar medidas para poder eliminar y evitar su repetición. Dependiendo del tipo de datos (variables o atributos), del volumen de fabricación, del tipo de inspección, se utilizan distintos tipos de gráficos de control; y si la

elección de este no es la adecuada, probablemente el análisis y las conclusiones extraídas del mismo serán erróneos.

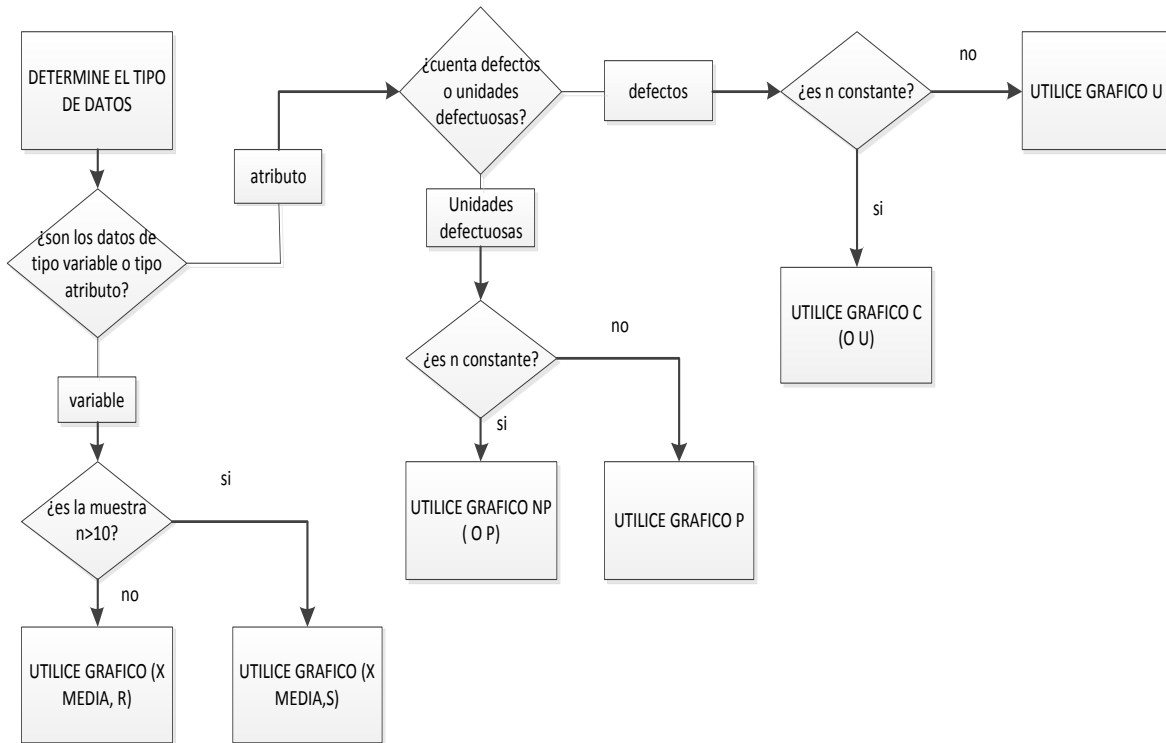
Con respecto a los gráficos de control tradicionales se puede decir que los gráficos por variables son mucho más sensibles que los gráficos por atributos, esto, debido a que los primeros son capaces de avisar sobre posibles problemas de calidad incluso antes de que estos ya sean relevantes. Por su parte, los gráficos de control por atributos, tienen la particularidad de esquematizar o sintetizar de forma mucho más rápida toda la información referida a diversos aspectos de calidad de un producto, pues permiten clasificarlo simplemente como “aceptable” o “inaceptable”, “defectuoso” o “no defectuoso”, y por ende no necesitan de sistemas de medición tan complejos, son fáciles de elaborar, analizar e interpretar, especialmente por los no especialistas en el tema.

En la figura 5, se da a conocer un flujograma con el resumen del proceso de selección de un gráfico de control tradicional. A continuación se describirá paso a paso dicho flujograma:

En el caso de gráficos de control por variables, el criterio fundamental de selección es el tamaño de la muestra utilizado:

Cuando el tamaño de muestra sea inferior a 10 ($n < 10$), el gráfico de media – rango suele ser de gran utilidad; pues para estos tamaños de muestra, el recorrido o rango R, proporciona una adecuada estimación de la variación del proceso y además tiene la ventaja de que, debido a la sencillez de los cálculos necesarios, se puede utilizar directamente en el taller. En caso contrario, es decir cuando el tamaño de muestra sea superior a 10 ($n > 10$) el recorrido deja de proporcionar una estimación correcta de la variación, siendo necesario utilizar el gráfico de media – desviación típica.

Figura 5. Flujograma para seleccionar gráficos de control univariantes.



Ahora bien, en el caso de gráficos de control por atributos, la selección depende del tipo de datos utilizados. Así por ejemplo cuando se trata de unidades defectuosas, se utilizan los gráficos p y np. Los primeros pueden utilizarse tanto para tamaño de muestra fija como variable. Los segundos exigen que el tamaño de la muestra sea fijo. Cuando se trata de defectos, se utilizan los gráficos u y c. Igual que antes, los primeros pueden utilizarse tanto para tamaño de muestra fija como variable. Los segundos exigen que el tamaño de la muestra sea fijo.

Por otra parte, los gráficos de control tradicionales tienen una sensibilidad adecuada frente a cambios grandes en la tendencia central y en la variación del proceso. Sin embargo, su sensibilidad para detectar la acción de causas especiales cuyo efecto sea un cambio pequeño pero constante, no resulta ser muy eficaz. De ahí la importancia de los gráficos de control con memoria, como el gráfico de media móvil exponencialmente ponderada (EWMA) y gráfico de sumas

acumuladas (CUSUM); ya que estos gráficos especiales permiten aumentar la sensibilidad sin aumentar la tasa de falsas alarmas, manteniéndola en un valor similar al de los gráficos tradicionales.

Una de las formas más utilizadas para comparar la eficiencia o sensibilidad de los diferentes gráficos de control, es a través de ARL, por sus siglas en inglés average run length, es decir, recorrido medio de racha. En términos más sencillos, el ARL permite determinar el número de muestras que se deben examinar antes de encontrar un punto por fuera de los límites de control, por lo que conviene un valor alto. Cuando el proceso se encuentra bajo control, se denota como ARL_0 adoptando la siguiente expresión:

$$ARL_0 = \frac{1}{\text{probabilidad un punto fuera de los límites de control}} = \frac{1}{\alpha}$$

Al calcular dicho valor para el caso de los gráficos Shewhart, cuyos límites de control se encuentran situados a tres desviaciones típicas se obtiene un valor de $ARL_0 = 1/0.0027 = 371$; considerado como suficientemente alto en la práctica.

Lo ideal es que pequeños cambios en la tendencia central del modelo o proceso productivo, puedan ser detectados de forma rápida, en otras palabras que el número de muestras que se deban trazar en los gráficos de control hasta que se detecte dicho cambio sea pequeño. En este caso el ARL se denota por ARL_{δ} , donde δ representa el cambio que se produce en la media del proceso medido en múltiplos de la desviación típica:

$$ARL_{\delta} = \frac{1}{1 - \beta}$$

Si se desarrollan los cálculos para determinar el ARL de diversos cambios en la media del proceso para un gráfico de control Cusum, todos ellos medidos en

términos de desviaciones típicas de la variable o característica de calidad, se obtiene la siguiente tabla para distintos valores del parámetro h y considerando que el parámetro k toma un valor de 0,5:

Tabla 8. Recorrido medio de racha gráfico CUSUM (ARL)

Cambio en la media	h=4	h=5
0	167.68	465.44
1	8.38	10.38
1.5	4.75	5.75
2	3.34	4.01
3	2.19	2.57
4	1.71	2.01

A partir de la tabla 8 se puede observar que cuando el proceso se encuentre bajo control, el número de muestras a examinar hasta detectar una situación fuera de control es de 168 y 465, dependiendo del valor empleado para el parámetro h . De la misma forma, para detectar por ejemplo un cambio de una desviación típica es necesario examinar 8,38 muestras o 10,38 dependiendo del valor utilizado para el parámetro h . Si se compara este resultado con un gráfico Shewhart, se observa una mejora radical, ya que con un gráfico Shewhart sería necesario analizar alrededor de 44 muestras, por lo que se puede concluir que el gráfico Cusum es mucho más sensible que el de Shewhart para detectar variaciones pequeñas.

Por otra parte, debido a que el gráfico Cusum tabular no presenta un comportamiento adecuado a la hora de detectar cambios grandes en el proceso, una alternativa que se ha propuesto para minimizar este inconveniente es utilizar una combinación de métodos de control Cusum y Shewhart, para esto se

recomienda ubicar los límites de control del grafico Shewhart a 3.5 desviaciones típicas de la línea central, en aras de obtener un mejor comportamiento del ARL del proceso. [1]

En cuanto a los gráficos de control Ewma, el análisis del ARL se realiza de la misma forma. En la tabla 9 se presenta el ARL para distintos valores de λ , distintos cambios en el proceso, medidos como múltiplos de la desviación típica y considerando una anchura de límites, L , de tal forma que el ARL_0 tome un valor fijo de 500.

Tabla 9. Recorrido medio de racha grafico EWMA (ARL)

Cambio en la media	L= 3.054 $\lambda = 0.4$	L= 2.998 $\lambda = 0.25$	L= 2.962 $\lambda = 0.2$	L= 2.814 $\lambda = 0.1$	L= 2.615 $\lambda = 0.05$
0	500	500	500	500	500
1	14.26	11.14	10.54	10.33	11.38
1.5	5.87	5.46	5.50	6.08	7.11
2	3.52	3.61	3.74	4.36	5.22
3	2.02	2.26	2.38	2.87	3.50
4	1.44	1.73	1.86	2.19	2.69

Al igual que los gráficos Cusum, este tipo de gráfico resulta ser eficaz en la detección de pequeños cambios, pero no tan rápidos como el Shewhart a la hora de detectar cambios grandes. Por ello, como en el caso anterior, en la práctica muchas veces se realiza una combinación de ambos tipos de gráficos, o la representación de los estadísticos en un mismo gráfico. [1]

Ahora, si se comparan los tres tipos de gráficos (Shewhart, Cusum y Ewma), se puede evidenciar en la tabla 10 que el comportamiento del grafico Cusum es mucho mejor que el de Shewhart y comparable con el del grafico Ewma, siempre y cuando se trate de pequeñas desviaciones de la media. Adicionalmente, el grafico Ewma tiene una ventaja consistente en la capacidad de predecir la magnitud de la desviación producida en la media. Concretamente el valor de y_i es una predicción del valor de μ en el instante $i + 1$. Una estimación de la desviación producida obtenida de esta forma puede servir a la hora de decidir el ajuste necesario en el proceso para volverlo a centrar en su valor nominal. Esta característica no se da en los gráficos de Shewhart ni en el gráfico CUSUM.

Tabla 10. ARL (δ) para gráficos EWMA, CUSUM y Shewhart comparables

δ	EWMA	CUSUM	SHEWHART
0	500	500	500
0.5	36	30	214.5
1	10.2	10.5	65.2
1.5	6	5.4	18.2
2	4.05	3.4	7.35
3	2.63	2.6	2.2

Por otra parte, en el análisis de las metodologías investigadas y dadas a conocer en el capítulo referente al marco teórico, se presentan como nuevos aportes a los gráficos de control, aquellos que trabajan con datos u observaciones multivariantes, dado que en la mayoría de los procesos industriales, la calidad de un producto no depende solo de una característica o variable sino que dependen de más. Cada uno de estos gráficos tienen ventajas y desventajas respecto de los

otros, es por esto que este numeral se centrará en la comparación de los mismos, basando este paralelo en dos criterios a saber: la necesidad de que las observaciones sean normales y un concepto muy utilizado a la hora de realizar comparaciones, el ARL.¹⁶

Al comparar la carta T^2 de Hotelling con la carta r , se llega a la conclusión que la carta r posee la ventaja de que el supuesto de normalidad sobre los datos no es requerido. Se puede pensar que la carta de control r construida usando la profundidad de Mahalanobis es similar a la carta T^2 de Hotelling, porque ambas representan la distancia cuadrática de un punto con respecto a su media. Sin embargo, la profundidad de Mahalanobis sólo sirve como una herramienta para obtener los rangos de las observaciones, las cartas son construidas con respecto a los rangos de la profundidad de Mahalanobis, no con respecto a la profundidad de Mahalanobis en sí misma. Además cuando se determinan los límites de control en la carta T^2 de Hotelling, la distribución muestral del estadístico T^2 de Hotelling es requerida. Para la carta de control r basada en la profundidad de Mahalanobis esto no es requerido. Por lo tanto, las cartas de control basadas en la profundidad de Mahalanobis son diferentes a las basadas en T^2 de Hotelling y para distribuciones elípticas la carta de control r basada en la distancia de Mahalanobis se puede decir que es más eficiente (Hamurkaroglu y Otros 2004).

El gráfico de control T^2 de Hotelling, al igual que el gráfico Shewhart univariante, es sensible a grandes cambios, pero cuando las variaciones son de pequeña cuantía pierde eficacia, es decir es insensible a cambios pequeños a moderados en el vector de medias del proceso y por ende este grafico presenta falta de robustez.

¹⁶ Longitud promedio de racha.

Si se tiene un proceso con variables tipo atributos correlacionados, y se utilizan las cartas T^2 de Hotelling, la carta MNP y la carta r , se dice que la carta MNP es más eficiente a la hora de vigilar el comportamiento de dicho proceso, pues posee un ARL adecuado tanto en control como fuera de control. De acuerdo a un estudio de simulación realizado¹⁷, la carta MNP particularmente fuera de control, cuando las contaminaciones¹⁸ son positivas o negativas en la mayoría de las simulaciones detecta primero una desviación pequeña de la media del proceso. Esta carta también presenta un desempeño similar en todos los escenarios de simulación, lo que la hace robusta para medir si un proceso de esta naturaleza está o no en control estadístico. Las cartas AN¹⁹ y r presentan variaciones significativas en cuanto a su rendimiento cuando las condiciones de simulación cambian, lo cual las hace poco confiables a la hora de determinar de manera temprana si un proceso se encuentra fuera de control. Al comparar el desempeño de las técnicas AN y r se puede concluir que son similares cuando la contaminación se da en dirección positiva y el tamaño de submuestra favorece a la aproximación de la distribución binomial a la normal; es decir que entre más se presenten cambios para conocer como es su comportamiento, las cartas se vuelven menos confiables que la carta MNP. [22]

Al comparar las extensiones multivariantes de los gráficos EWMA y CUSUM, con el gráfico más utilizado en variables multivariadas, es decir el T^2 de Hotelling, puede decirse que: el gráfico MEWMA, es efectivo para detectar cambios de cualquier tamaño o dirección, aún en distribuciones asimétricas; el vector MEWMA da idea de la dirección del cambio, pero no proporciona una estimación precisa del vector de medias en curso. Y el gráfico MCUSUM, manejado de las dos formas explicadas anteriormente, ayuda a detectar de manera más rápida

¹⁷OSPINA HINCAPIE, Carolina; YAÑEZ CANAL, Sergio; LOPERA GÓMEZ, Carlos Mario. Algunas cartas de control bivariadas para atributos. En: Dyna vol. 77, núm. 162, junio, 2010, pp. 325-337

¹⁸ Modificaciones que se le hacen a la desviación, para observar el comportamiento de las variables en estudio.

¹⁹Conocido también como carta T^2 de Hotelling.

cualquier cambio que se de en el vector de medias, a comparación del grafico T^2 de Hotelling; es por esto que si se quieren detectar pequeños cambios en un proceso que dependen de más de una variable, es recomendable utilizar el grafico MCUSUM, ya que al igual que en la extensión univariante presenta mejores propiedades y mejores ARL para detectar rápidamente una señal fuera de control en cualquier proceso industrial.

Como conclusion final a estas analogias, puede decirse que si se tiene un proceso industrial en el cual se controla mas de una variable, la eleccion del tipo de grafico va a estar dado por las necesidades del proceso, es decir, dependiendo del proceso y magnitud de cambio que se quiera detectar, es el grafico que se debe usar; como por ejemplo se usará la carta T^2 de Hotelling, si se desea tener información de grandes cambios, con el unico inconveniente de que se requiere que se tengan observaciones normales; y si se quieren detectar pequeños cambios, es recomendable usar la extension multivariante del grafico CUSUM al igual que la conclusion obtenida en la comparacion de los graficos tradicionales.

De acuerdo al análisis realizado anteriormente de los diferentes tipos de gráficos de control, se concluye que para el desarrollo de la propuesta metodológica que se va a presentar en este trabajo, se emplearan gráficos de control para datos univariados pues a través de esta se busca proporcionar una herramienta sencilla y de fácil aplicación para las pequeñas y medianas empresas que desean controlar sus procesos productivos y ser mucho más competitivas en el mercado actual. Los gráficos a utilizar son:

- En la primera etapa para la estimación de los parámetros del proceso y teniendo en cuenta que solo se trabajaran datos que provengan de una distribución de probabilidad normal, se propone utilizar gráficos para observaciones individuales, ya que si se va a trabajar con el modelo ARIMA es más factible aplicarlo a observaciones individuales que a subgrupos de datos si

se utilizara el grafico de Shewhart. Pero si llegado al caso que los datos no provengan de una distribución de probabilidad normal, se aplicara el procedimiento normal, es decir para esta fase se utilizaran los gráficos de control de Shewhart (grafico de media – desviación típica).

- En la segunda etapa, para monitorear el proceso, se utilizara el grafico de control con memoria CUSUM (grafico de control de sumas acumuladas) porque es más sensible a los cambios y mediante este se podrán detectar de manera más fácil cuando están ocurriendo variaciones considerables en el proceso.

El siguiente capítulo se caracterizara porque se desarrollara la metodología que se ha venido mencionando a lo largo del desarrollo del proyecto, esta metodología estará compuesta por los gráficos decididos anteriormente, así mismo se utilizaran nuevas herramientas que servirán de apoyo a la implementación de la metodología, para lograr el mejoramiento de los procesos al enfocarse en la reducción de la variabilidad de los mismos.

6. PROPUESTA METODOLOGICA

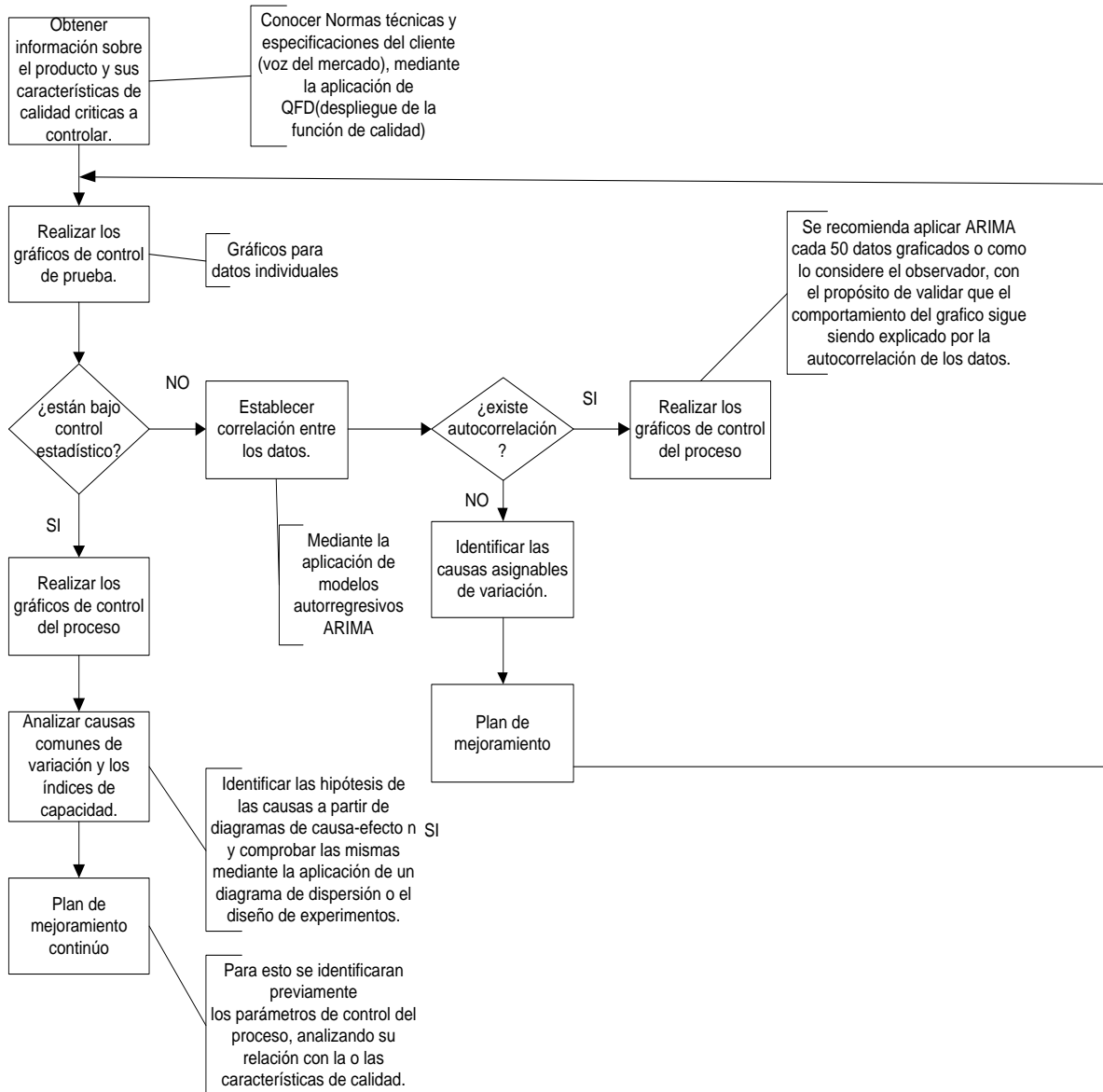
A partir de la investigación realizada y dada a conocer en capítulos anteriores, se propone en este capítulo una metodología que ayude a mejorar la calidad de los productos ofrecidos al cliente, enfocados en reducir la variabilidad que se da en los procesos, mediante la aplicación de técnicas como los gráficos de control (tema central de la metodología), el diagrama causa-efecto y el diseño de experimentos (DOE). Es importante resaltar que la metodología será válida solo para datos que posean el comportamiento de una distribución de probabilidad normal. En la figura 6 se presenta el diagrama de flujo que contiene los pasos a seguir en el desarrollo metodológico y a continuación se presentará la descripción de los mismos.

El primer paso a seguir consiste en obtener información sobre el producto a estudiar, en aras de determinar aquellas características críticas que se han de controlar, En este sentido, el cliente juega un papel fundamental, ya que es este quien al final de cuentas decide si un producto es de buena o mala calidad, y por lo tanto al trabajar en la fabricación de un producto basándose en las necesidades de los clientes se puede asegurar una parte del mercado, lo que acarrea ventajas significativas para las empresas.

Aquí la metodología considerará dos situaciones: la primera en la cual se decide controlar solo una característica de calidad, bien conocida por la empresa y considerada como crítica; en este caso, se dará paso a la toma de mediciones de dicha variable, para posteriormente aplicar los otros pasos propuestos por la metodología. La segunda situación hace referencia a productos que poseen varias características de calidad y se debe decidir la forma en que se iniciará el control estadístico de procesos: con gráficos multivariados o con gráficos univariados para cada una de las características críticas. En este último caso, se recomienda emplear la primera fase técnica conocida como QFD (despliegue de la función de

calidad), conocida como la “casa de la calidad”. La descripción de esta herramienta se presenta en el anexo A.

Figura 6. Representación de la propuesta metodológica.



Una vez definidas las características de control que son realmente críticas en el proceso productivo y por ende en la calidad del producto, y en aras que la metodología enfocará su atención en la reducción de la variabilidad del proceso al controlar dichas características, a partir de la utilización de los gráficos de control, se procederá a elaborar los gráficos de control de prueba, que es la fase I cuando se aplica esta metodología a cualquier proceso productivo. Para esta fase I se estimarán los parámetros necesarios para la elaboración del gráfico de control, de tal forma que se establecerá una zona de aceptación y una zona de rechazo, aquí los gráficos a utilizar serán para observaciones individuales tal y como se estableció en el capítulo de análisis de metodologías. Se establece este tipo de gráficos, ya que como en la metodología se va a aplicar un modelo ARIMA, no tendría sentido utilizar gráficos Shewhart y seguidamente investigar si existe autocorrelación en los subgrupos de datos utilizados anteriormente. Si se llega a tener el caso que la distribución de probabilidad de los datos no sea normal, se recomienda utilizar gráficos de control tipo Shewhart, no aplicar el modelo ARIMA y continuar con la metodología propuesta. Una vez desarrollados los gráficos de control de prueba, se procederá a su análisis, es decir a conocer si el proceso está o no bajo control estadístico. De aquí surgen dos posibilidades:

- Si el proceso se encuentra bajo control estadístico, es decir no se encuentran causas asignables de variación, se procederá a elaborar los gráficos de control del proceso (fase II) y se continúa con los pasos de la metodología propuesta.
- Si por el contrario se observa que el proceso está fuera de control estadístico, es decir se observan varios puntos fuera de control o se presentan patrones como rachas, ciclos u otros comportamientos aleatorios, se procederá a establecer la correlación que se da entre los datos mediante la utilización de los modelos ARIMA; a continuación se darán los pasos para aplicar dicho modelo.

Los modelos ARIMA, se aplican para establecer si hay autocorrelación entre un conjunto de datos, para la metodología propuesta esta etapa se llevara a cabo en tres fases:

- Como primera medida se identificara el modelo a utilizar, esto se hará a partir de las funciones de autocorrelación total y parcial, tal y como se estableció en el numeral 4.7, orientado a el tratamiento de la correlación.
- Una vez determinado el modelo a utilizar, generalmente los procesos de producción pueden ser modelados a partir de un modelo autorregresivo AR (1) se procederá a obtener los parámetros del proceso, para dar paso a la construcción de los gráficos de control. Es necesario aclarar que estos parámetros serán calculados a partir de los residuos más no a partir de los datos propios del proceso.
- Calculados los parámetros se procederá a la elaboración de los gráficos de control, en la metodología propuesta es el paso que se dará a continuación.

Una vez desarrollado el modelo ARIMA para los datos, la metodología se preguntará si existe o no autocorrelación, es decir se tomará una decisión para dar continuidad a la aplicación de los pasos metodológicos.

- Si existe autocorrelación entre los datos, es decir al realizar el grafico de los residuos no se encuentran parámetros fuera de control, sino que se puede llegar a concluir que el proceso está bajo control, se dará a paso a la fase II, es decir se realizaran los gráficos de control del proceso, en este caso el gráfico Shewhart para los datos originales, teniendo en cuenta que cada 50 datos o según lo considere el investigador o quien está aplicando la metodología, se recomienda aplicar el modelo ARIMA para validar que el comportamiento del grafico está siendo afectado por la autocorrelación que se da en los datos.

- Si no existe autocorrelación, es decir si al realizar el gráfico de los residuos, aparecen muchas señales fuera de control, entonces se dirá que el proceso en sí está fuera de control y no está siendo afectado por patrones de autocorrelación entre los datos, es decir se establece que se está ante la presencia de causas asignables de variación, por esto se tendrá que proceder a hacer un análisis de estas causas y a proponer una solución que ayude a eliminarlas. Una vez identificadas estas causas, es importante realizar un plan de mejoramiento para eliminar aquellas causas que están afectando el proceso y por ende la calidad de los productos; sin embargo es importante resaltar, que debido a que las causas asignables de variación no son parte natural del proceso productivo y que ocurren de forma accidental, teniendo un gran efecto malévolo sobre su desempeño, estas pueden ser eliminadas sin la necesidad de llevar a cabo una revisión profunda del proceso, y en la mayoría de los casos los operarios deben estar capacitados para identificarlas y eliminarlas.

Luego de hacer el mejoramiento se procederá nuevamente a realizar los gráficos de control de prueba del proceso y se volverán a analizar, en aras de saber si el proceso está bajo control estadístico o fuera de control estadístico. La idea es que el proceso se encuentre bajo control estadístico, así se probará que el plan de mejoramiento aplicado fue el correcto, y se podrá proceder a la segunda parte de la decisión metodológica.

La segunda parte de la propuesta metodológica, es conocida como la fase II de los gráficos de control o conocida comúnmente como periodo de vigilancia, en esta fase con los valores estimados en la fase I, se construye el gráfico de control y se analiza si, a medida que se generan nuevas observaciones, el proceso sigue estando bajo control. Para este ítem de la metodología se utilizarán los gráficos de control con memoria CUSUM, ya que a partir de las investigaciones realizadas para el desarrollo del proyecto, se encontró que este es más sensible a la hora de reconocer cambios significativos que alteran el buen funcionamiento de la

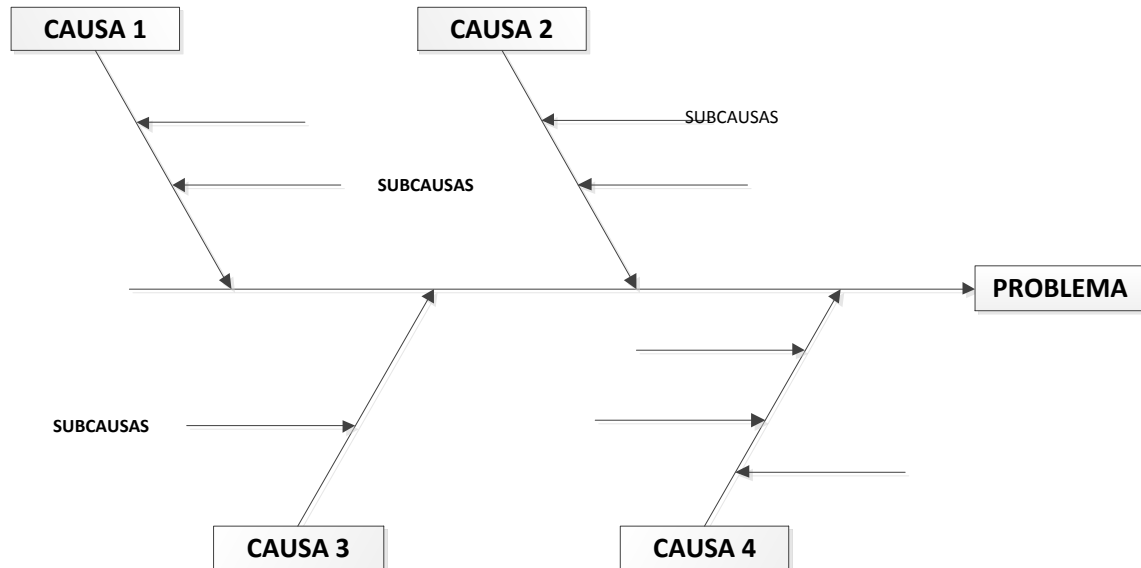
producción. Al asumirse que el proceso está bajo control estadístico, puede decirse que se está ante la presencia de causas comunes de variación, es decir que estas se dan debido a que son inherentes al proceso, y por lo tanto para su eliminación se requiere de un análisis profundo del proceso.

Al realizar dicha afirmación, y al tenerla presente en el desarrollo metodológico, se plantea la necesidad de realizar un análisis minucioso de esos problemas que están siendo generados por esas causas comunes de variación, es aquí donde se recomienda utilizar los diagramas causa-efecto, para conocer el problema, sus causas y sus subcausas.

El diagrama de causa y efecto o diagrama de espina de pescado fueron utilizados por primera vez por Kaoru Ishikawa. Es considerada una herramienta de solución de problemas. Su fundamento se basa, en que un problema tiene su origen en algunas causas específicas que se originan donde aparece el problema y que la única manera para dar solución a ese problema encontrado es enfocarse en esas causas y eliminarlas. En la figura 8 se muestra el diseño general de un diagrama causa- efecto.

En él puede observarse que en el lado derecho se presenta el efecto o problema a considerar, y al lado izquierdo las causas. Las posibles causas se ordenan con flechas apuntando a la línea central. Las subcausas se ordenan como flechas que apuntan a las flechas "causas principales". Una vez construido el diagrama causa-efecto se procederá a analizarlo, mediante este se podrá identificar actividades que no están agregando valor, demoras innecesarias, transportes innecesarios, reprocesos, actividades no definidas claramente o sin un responsable, y cualquier otro efecto que este influyendo de manera negativa la eficiencia del proceso productivo.

Figura 7. Modelo diagrama causa-efecto



A partir de esto, se procederá a generar hipótesis que expliquen como la causa potencial²⁰ está contribuyendo a la aparición del problema, para que una vez identificada la hipótesis se proceda a identificar y obtener información numérica que pueda soportar o negar dicha hipótesis, aquí entra en juego la aplicación del diseño experimental para que mediante procesos estadísticos probar si la hipótesis puede ser aceptada o rechazada o también se sugiere utilizar un diagrama de dispersión si se tiene a consideración tan solo dos variables. Una vez comprobada la hipótesis o las hipótesis, se procederá a establecer las medidas correctivas necesarias para eliminar o prevenir las causas que han sido identificadas. Cabe recalcar que no siempre, se van a obtener causas de las que se pueden obtener datos numéricos, es por esto que el diagrama de dispersión y el diseño de experimentos aparece como una sugerencia si se está ante la presencia de causas que pueden ser cuantificables. A partir de estas medidas

²⁰ Esta causa o causas potenciales deben ser medibles o cuantificables para poder aplicar el diseño de experimentos.

correctivas, se establecerá un programa de mejoramiento continuo, en el que se verifiquen que las acciones están siendo llevadas a cabalidad y se está dando su cumplimiento.

Así la metodología propuesta, se basará en una búsqueda constante de la eliminación de la variabilidad mediante la aplicación de técnicas estadísticas y gráficas, y mediante la implementación de programas de mejoramiento continuo que involucren a todas las áreas de cualquier organización en la orientación o en la búsqueda de un solo fin “lograr que el cliente este satisfecho”.

Como ya se desarrolló la metodología, el siguiente capítulo se enfocara en la aplicación de la fase I de la metodología, esta aplicación se caracterizara por ser un ejemplo didáctico, en el que se explicara la utilización del software estadístico Statgraphics, y así mismo se realizara el análisis univariante para algunos datos de un proceso, este análisis constara de la elaboración de los gráficos de control de prueba, así como de la comprobación de la existencia de autocorrelación.

7. EJEMPLO DIDACTICO

7.1 DESCRIPCION DEL EJEMPLO

Al crear una metodología como la que se presenta en este proyecto, se hace necesario probar su validez, en este caso se llevara a cabo un ejemplo didáctico utilizando datos ya tomados de la industria cuchillera en la provincia de Albacete²¹. A pesar de que este proceso es considerado multivariante ya que depende de muchas variables, en este caso solo se optara por una variable²² que tenga relevancia para el proceso. Esta característica a controlar esta presente o afecta de manera directa el grosor de la hoja, que determina el comportamiento del corte del cuchillo. Estos cuchillos no son de los convencionales, sino que son ideales para el corte del Jamón.

El proceso de fabricación de cuchillos jamoneros no es continuo, sino que funciona bajo pedido, esto hace que la información con la que se va a trabajar se obtuvo durante un intervalo de tiempo relativamente pequeño, lo cual puede ser un factor que incide en la aparición de autocorrelación muestral entre los datos.

Este capítulo se centrará en el análisis de la información ya existente, para este caso como se estableció anteriormente se escogió la característica E, la cual es importante ya que dota al cuchillo de un corte adecuado. El número de observaciones disponibles para esta variable es 216, las cuales fueron tomadas a lo largo de una semana de trabajo. Las observaciones se presentan en el anexo B.

²¹Ejemplo tomado de: ALFARO NAVARRO, José Luis. Control estadístico de la calidad en procesos multivariantes autocorrelacionados. Una aplicación en la industria cuchillera de Albacete. Tesis doctoral área estadística. Albacete: universidad de Castilla- la Mancha. Departamento de economía y empresa. área de estadística. 2005. 342 p.

²² Se opta por una sola variable, ya que la metodología es para procesos univariantes.

Dadas las condiciones del proceso, se empezará por dar a conocer el software a utilizar en la elaboración del análisis de control estadístico del proceso, esto se hará de forma interactiva para una mayor comprensión. Seguidamente se procederá a realizar el análisis univariante de la característica E, y dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el proceso, se procederá a seguir con cada una de las fases de la metodología que se propuso en el capítulo 6. Es importante aclarar que el ejemplo se realizara para la fase I, ya que la fase II se centra en hacerle seguimiento al proceso, cuando se encuentran problemas o cuando se desea hacer mejora continua.

7.2 HERRAMIENTA DE APLICACIÓN E INSTRUCCIONES A SEGUIR PARA SU UTILIZACION

Para llevar a cabo la aplicación práctica de la metodología propuesta en el presente proyecto, se utilizó el programa STATGRAPHICS centurión. Esta herramienta ayuda a gestionar y analizar valores estadísticos, y en este caso fue utilizado para realizar análisis de autocorrelación entre los datos, así como para la construcción de los gráficos de control de prueba y los del proceso, y también para desarrollar un modelamiento de los datos a partir de los modelos ARIMA.

Una vez se abre el programa, lo primero que el usuario debe proceder a hacer es a introducir los datos, en este caso los valores corresponden a la característica E del producto mencionado anteriormente. La herramienta es muy amigable con el usuario ya que maneja una interfaz parecida a Microsoft Office para lo cual el usuario no necesita mucha experiencia para utilizar el mismo. Una vez introducidos los datos, se observa la interfaz que muestra la figura 8.

7.2.1 Elaboración de los gráficos de control de prueba. Tal y como se estableció en la metodología, en este paso se realizarán los gráficos de control de prueba para los datos individuales.

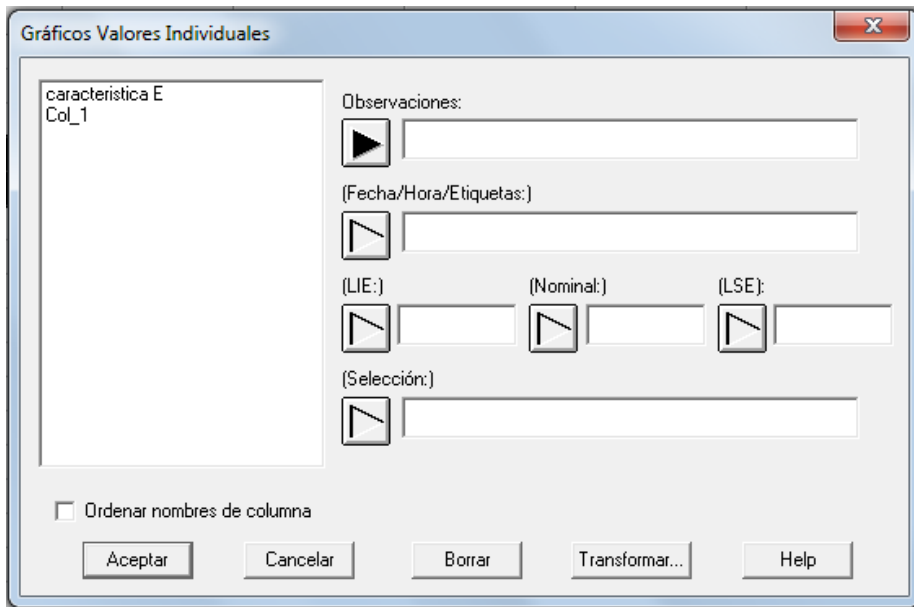
Figura 8. Interfaz del programa Statgraphics al introducir datos

	caracteristica E	Col_2	Col_3	Col_4	Col_5	Col_6	Col_7	Col_8	Col_9
1	0,36								
2	0,35								
3	0,34								
4	0,33								
5	0,32								
6	0,31								
7	0,35								
8	0,32								
9	0,33								
10	0,33								
11	0,34								
12	0,35								
13	0,35								
14	0,36								
15	0,34								
16	0,35								
17	0,33								

Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

En el software utilizado, se utilizará la función CEP (control estadístico de procesos), allí se escogerá la opción gráficos de control para variables y posteriormente se seleccionará la opción “individuos”. Una vez hecho lo anterior aparece un cuadro de dialogo tal y como se muestra en la figura 9, en este cuadro de dialogo se introducirá la columna que contenga los datos que quieren analizarse y se dará aceptar, para dar paso a una nueva ventana que se muestra en la figura 10.

Figura 9. Primer cuadro de dialogo gráficos individuales.



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

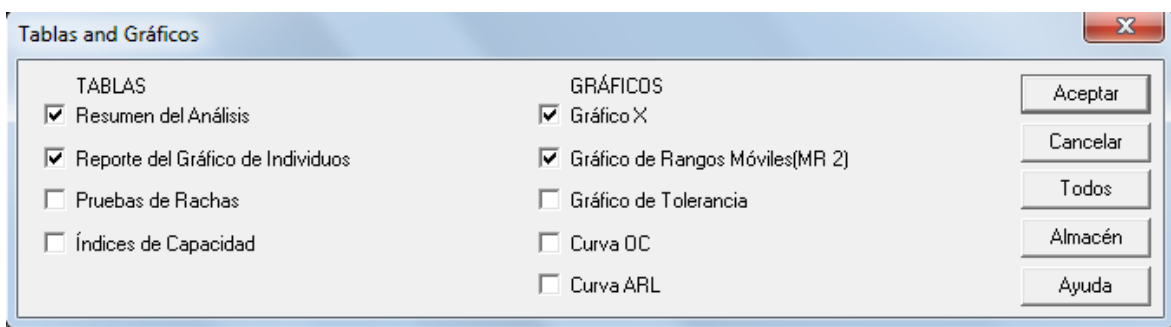
Figura 10. Opciones para realizar el grafico de control



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

El cuadro de dialogo mostrado en la figura 10 da a conocer las opciones que se tienen en cuenta cuando se van a realizar los gráficos de control de prueba, allí se establece o se selecciona que es un estudio inicial, que los límites de control se establecen a 3 sigma por arriba y por debajo de la línea central. Una vez seleccionado esas opciones se da en aceptar, y a continuación sale otra ventana como la que aparece en la figura 11.

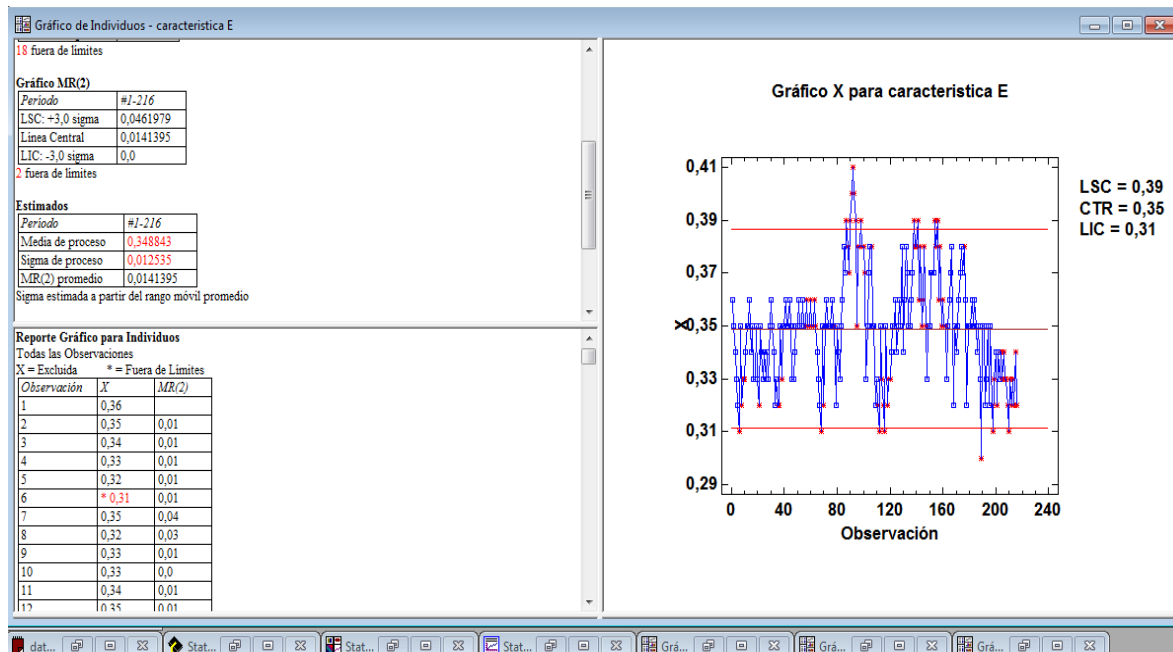
Figura 11. Tablas y gráficos que realizará el programa



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

En esta nueva ventana se seleccionaran las opciones que el usuario considere que necesita como fuentes de información, es decir que es lo que se quiere que el programa genere. Para el caso del desarrollo del ejemplo, se desea un resumen de análisis, un reporte de gráficos de individuos y el grafico de control para la media de los datos. Una vez establecidas esas opciones se pinchara en la opción aceptar, y seguidamente aparecerá una ventana que en el programa se denomina Statreporter, tal y como se muestra en la figura N° 12.

Figura 12. Statreporter gráficos de control de prueba.



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

7.2.2 Modelo ARIMA para los datos. Una vez que se tenga la base de los datos que se va a analizar, se busca aplicar el modelo ARIMA para los mismos. El software también ayuda en la realización de estos, al igual que para la elaboración de los gráficos de control de prueba, se utilizara la opción de CEP (control estadístico de procesos), se escogerá la opción gráficos de control y en el menú que se despliega se optara por la opción gráficos de propósitos especiales, y seguidamente grafico ARIMA para individuos. Una vez seguida esta secuencia, aparece el cuadro de dialogo mostrado en la figura 9, en esta se introducirá la columna que contenga los datos a analizar se dará aceptar y aparecerá un cuadro de dialogo como el que se muestra en la figura 13.

Figura 13. Opciones de grafico ARIMA para valores individuales.

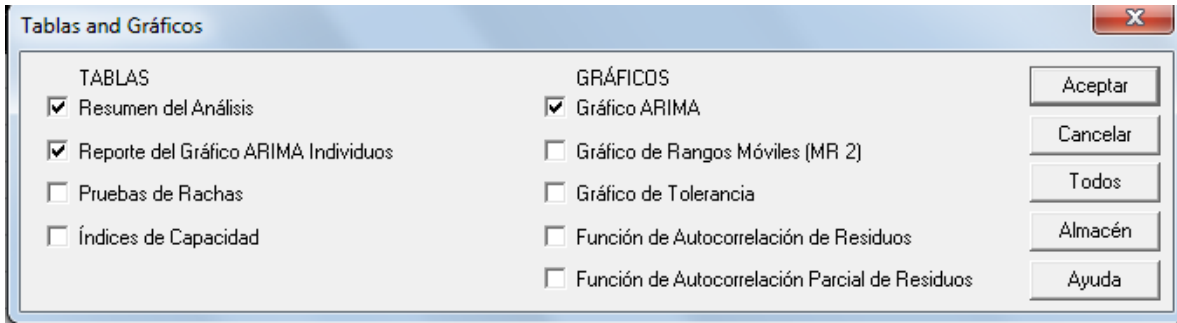


Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

En este cuadro de dialogo se establecerá que es un estudio inicial, la ubicación de los límites de control, así como el modelo ARIMA a aplicar, que para este caso será AR (2), que es el que mejor se ajusta a los datos, así mismo que tipo de grafico se realizara que para efectos de este ejemplo se decidió que se iba a trabajar con los residuos. Una vez escogidas todas esas opciones se le dará en la opción aceptar. Seguidamente aparecerá otra ventana en la que el usuario decidirá qué información quiere que el programa le brinde, tal y como se muestra en la figura 14. Una vez que el usuario escoja lo que quiere que el programa

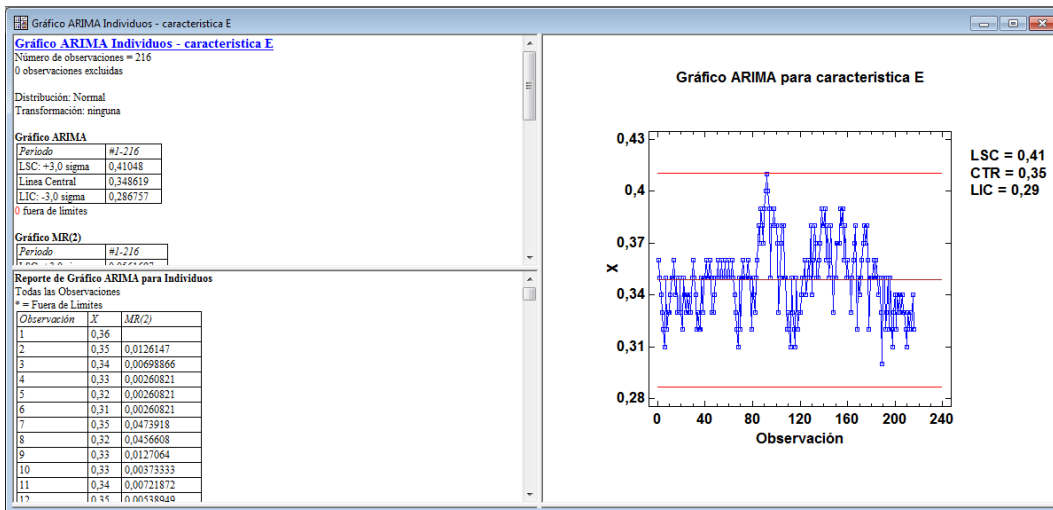
realice, se escogerá la opción aceptar y aparecerá el statreporter que se muestra en la figura 15.

Figura 14. Tablas y gráficos modelo ARIMA.



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

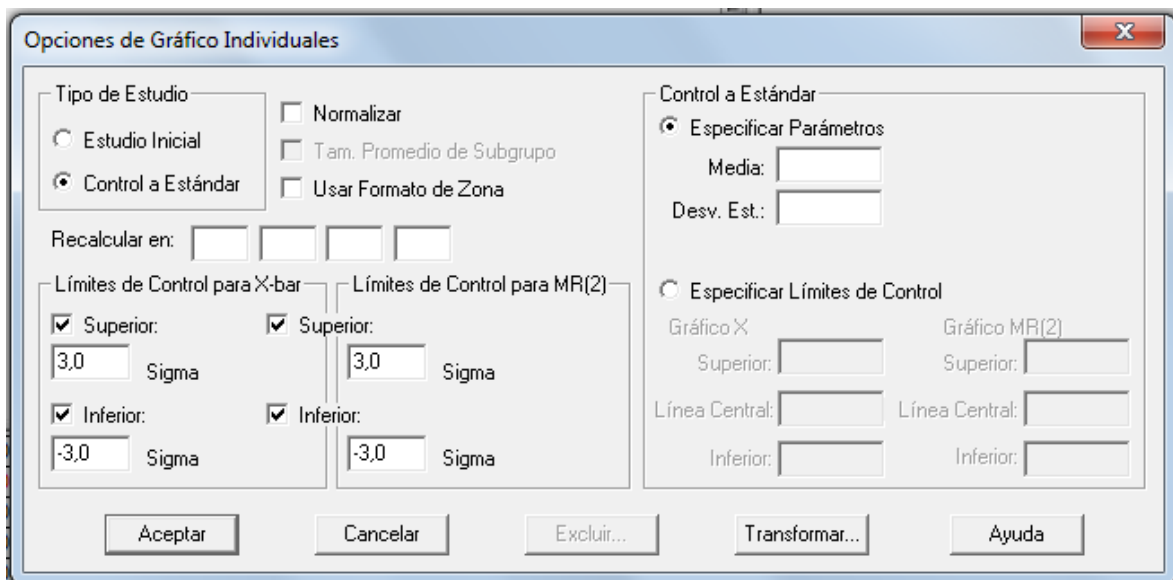
Figura 15. Statreporter gráficos modelo ARIMA



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

7.2.3 Elaboración de los gráficos de control del proceso. Al utilizar el software se seguirán los mismos pasos descritos en el numeral 7.2.1 salvo que en el cuadro de dialogo donde aparecen las opciones del grafico de control, no se optara por un estudio inicial, sino por un estudio control a estándar, una vez seleccionada esa opción, el programa mostrara dos opciones: una de ellas es especificar los parámetros media y desviación estándar, o la segunda opción que es especificar los límites de control obtenidos del grafico de control de prueba inicialmente realizado. En la figura 16 se muestra el cuadro de dialogo que aparece.

Figura 16. Opciones para elaboración del grafico de control del proceso.



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

Una vez insertado los datos ya sea los parámetros o los límites de control, el programa procederá a elaborar los gráficos, tal y como se estableció en el numeral 7.2.3 y tal como se indica en las figuras 11 y 12.

7.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se estableció en la metodología, una vez definido el proceso, recolectados los datos, y tener escogida la variable que se va a trabajar, se procedió a elaborar los gráficos de control de prueba para la media de los datos, trabajando las observaciones de manera individual. Con el software se obtuvo:

Gráfico de Individuos - característica E

El número de observaciones a trabajar fueron 216, que provenían de una distribución de probabilidad normal, en la cual los datos no sufrieron ninguna transformación. Los parámetros obtenidos para el gráfico de control de prueba del proceso se muestran en la tabla 11. on los siguientes:

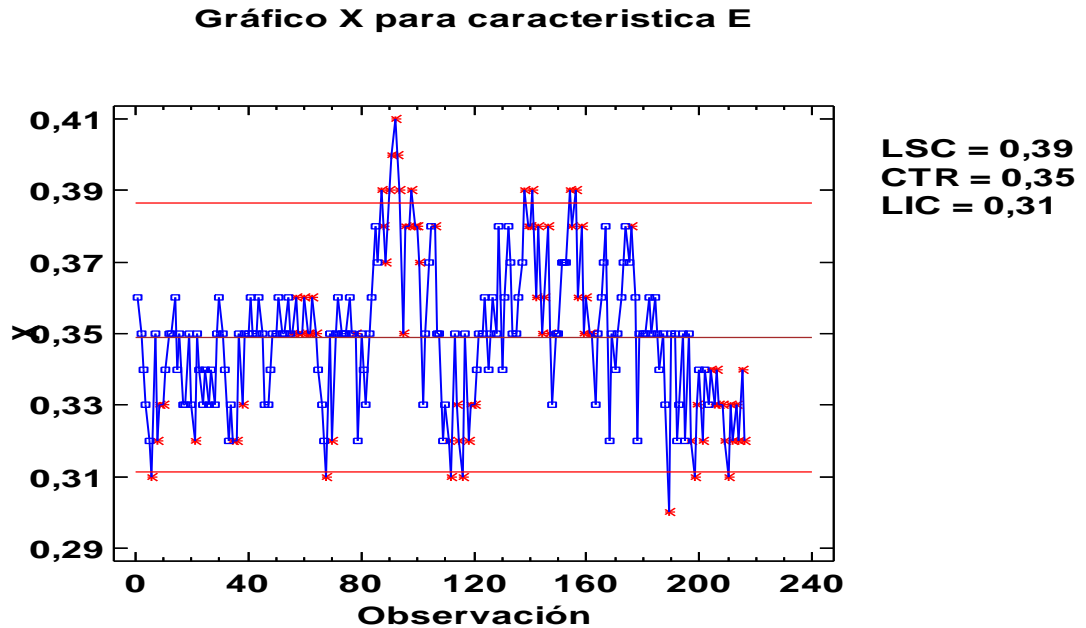
Tabla 11. Parámetros gráfico de control de prueba.

Período	#1-216
LSC: +3,0 sigma	0,386448
Línea Central	0,348843
LIC: -3,0 sigma	0,311238

Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

Las gráficos de control se construyen bajo el supuesto de que los datos provienen de una distribución normal con una media igual a 0,348843 y una desviación estándar igual a 0,012535.

Figura 17. Gráfico de control para característica E.



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

De los 216 puntos no excluidos mostrados en el gráfico 17, 18 de ellos se encuentran fuera de los límites de control en el gráfico para la media, es decir que hay 18 cuchillos que no cumplen con el grosor que está especificado para el cuchillo, por lo tanto se puede declarar que este proceso se encuentra fuera de control. En el gráfico 17 se muestran más de 18 puntos en color rojo, esto se debe a que no solo se encuentran puntos fuera de control, sino que también se observan comportamientos no aleatorios que están afectando al proceso de manera negativa, en este caso se está ante la presencia de rachas, en las que se encuentra secuencias de puntos por encima y por debajo de la línea central.

Debido a lo anterior, y en aras de continuar con los pasos de la metodología propuesta, se procederá a establecer si hay correlación entre los datos, para esto se realizarán gráficos de control con propósitos especiales, en este caso gráficos ARIMA para individuos mediante la utilización del software tal y como se explicó en el numeral 7.2.2. En el anexo C se presentan los residuos obtenidos cuando se lleva a cabo la modelización ARIMA. A continuación se darán a conocer los resultados obtenidos:

Gráfico ARIMA Individuos - característica E

El número de observaciones utilizadas fueron 216, para las cuales se asumió que provenían de una distribución de probabilidad normal y por esta razón los datos no sufrieron ninguna transformación. En la tabla 12 se dan a conocer los parámetros para la realización del gráfico ARIMA para los datos de la variable E.

Tabla 12. Parámetros gráfico ARIMA

Período	#1-216
LSC: +3,0 sigma	0,0457222
Línea Central	0,0
LIC: -3,0 sigma	-0,0457222

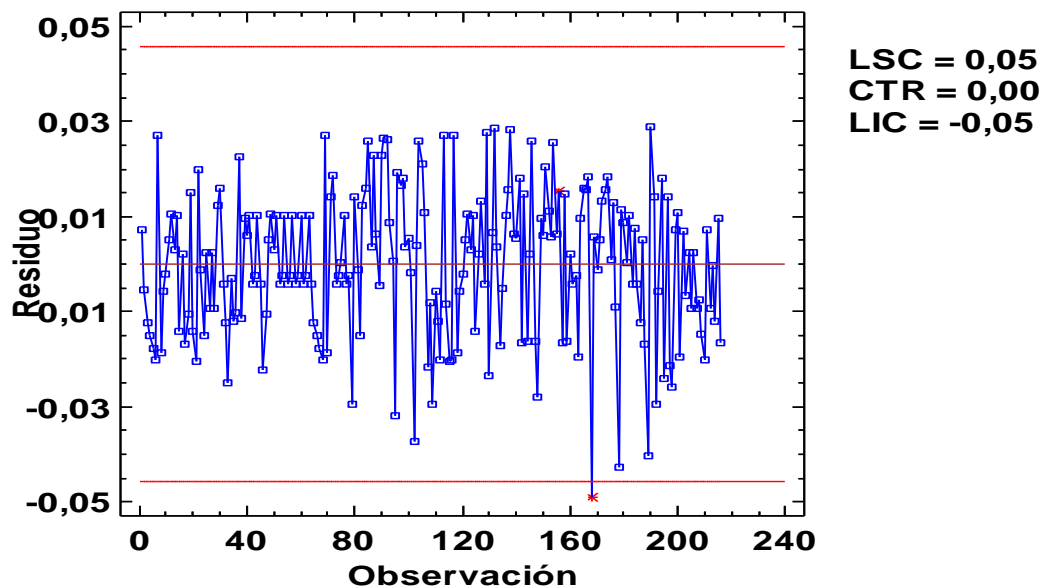
Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión.

El gráfico ARIMA tal como se estableció en el numeral 4.7 está conformado por los residuos obtenidos a partir de una modelización de series de tiempo, para este caso se utilizó un modelo AR (2) que resultó ser el más adecuado para este

proceso de producción. Este gráfico se construyó bajo el supuesto de que los datos provenían de una distribución normal con una media igual a 0,348619 y una desviación estándar igual a 0,0206205. Para este caso y como se observa en la figura 18, se obtuvo que de los 216 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, solo uno se encuentra fuera de control, más concretamente la observación número 168 en la que el residuo toma un valor de -0.049, mientras que el límite inferior de control toma un valor de -0,045. En este caso, el cuchillo no está cumpliendo con los requisitos establecidos.

Figura 18. Gráfico de residuos ARIMA para característica E.

Gráfico de Residuos ARIMA para característica E



Fuente: programa estadístico Statgraphics centurión

Al ser solo una observación, no es una situación que genere mucha alarma, por lo tanto puede decirse que el proceso en general está bajo control, y que la autocorrelación que existe entre los datos es la causante de que en el gráfico de control de prueba para X realizado anteriormente, se evidenciara la existencia de 18 puntos fuera de control, y por lo tanto en ese momento se concluyó que el proceso estaba fuera de control.

Una vez establecido que si existe autocorrelación entre los datos de la variable, y según la metodología propuesta se debe proceder a elaborar los gráficos de control del proceso, para este caso se realizaran los gráficos Shewhart, siempre y cuando se sigan recolectando datos sobre el proceso y sobre la variable en estudio. Como se estableció desde el principio el ejemplo enfocaría su atención en la fase I mas no en la fase II del control, por esta razón como conclusión final a la aplicación práctica se puede decir que se evidencio que la autocorrelación que se da entre los datos para la característica E, influye de manera negativa a la hora de querer controlar el proceso, ya que puede llevar a los analizadores a obtener conclusiones erróneas de que el proceso está fuera de control, cuando en realidad el proceso está bajo control.

Hasta este punto se da el cumplimiento de lo que se había planteado inicialmente para este trabajo de investigación. El siguiente capítulo demostrara el debido cumplimiento de los objetivos que se plantearon para la ejecución de estudio.

8. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

La finalidad de este capítulo es demostrar el debido cumplimiento de los objetivos específicos que inicialmente se plantearon para el desarrollo de estudio de investigación. Esta tabla consta del objetivo, así como del numeral del capítulo en el cual se evidencia su debido cumplimiento.

Tabla 13. Cumplimiento de objetivos

Objetivos	Numeral en el que se presenta
<ul style="list-style-type: none">• Estudiar y presentar la ruta de la calidad y seis sigma como dos de las principales metodologías enfocadas al control de calidad en procesos de manufactura.	El cumplimiento de este objetivo, se puede evidenciar en el desarrollo del capítulo 2: Metodologías enfocadas al control de calidad; específicamente en los numerales 2.2 (La ruta de la calidad) y 2.3 (Seis sigma)
<ul style="list-style-type: none">• Presentar la base teórica y práctica de los gráficos de control como métodos estadísticos de control de calidad en procesos de manufactura.	Se dio cumplimiento a este objetivo en el capítulo 3, en el que se presentaron las características, forma y uso de los gráficos de control, así como los diferentes tipos de gráficos univariantes.
<ul style="list-style-type: none">• Analizar los nuevos aportes desarrollados para los gráficos de control, desde el punto de vista univariante y multivariante.	Este objetivo se cumplió, mediante el desarrollo del capítulo 4, en el que se dieron a conocer los nuevos aportes a los gráficos de control desde una óptica tanto univariante como multivariante.

Tabla 13. Cumplimiento de objetivos (continuación)

Objetivos	Numeral en el que se presenta
<ul style="list-style-type: none">• Diseñar una metodología de control de calidad, que complemente las ya existentes y que sea fácil de aplicar en cualquier organización.	Para dar cumplimiento a este objetivo, se llevó a cabo un análisis de los gráficos de control presentados, así como sus nuevos aportes (capítulo 5) y se desarrolló la propuesta metodológica en el capítulo 6.
<ul style="list-style-type: none">• Realizar un ejemplo didáctico en el que se compruebe la validez de la metodología desarrollada.	En el capítulo 7, se llevó a cabo el ejemplo didáctico, basado en el proceso de producción de cuchillos jamoneros para comprobar la validez de la metodología propuesta.

CONCLUSIONES

- El control de calidad ha sido un tema de interés desde hace mucho tiempo, es por esto que cada vez más los autores investigan y desarrollan herramientas o metodologías más eficaces en aras de lograr un objetivo final, entregar al consumidor productos confiables y con altos estándares de calidad que puedan satisfacer sus necesidades y expectativas.
- Dentro de la cantidad de metodologías desarrolladas para hacer control a los procesos, se pueden encontrar la ruta de calidad, el modelo Seis Sigma que es considerado un modelo más administrativo, y el control estadístico de procesos, que centra su atención en los gráficos de control.
- El control estadístico de procesos es una herramienta estadística utilizada en los procesos de producción con el fin de hacer control y poder obtener productos con altos grados de calidad.
- Los gráficos de control constituyen el procedimiento básico del control estadístico de proceso, mediante la realización de los mismos se busca hacer seguimiento y vigilancia del proceso, y reducir la variación que se da de manera constante en cualquier proceso productivo.
- El trabajar con gráficos de control implica pasar por dos fases: la fase I en la que se estiman los parámetros del proceso y se realizan los gráficos de control de prueba del mismo, y la fase II que es cuando se establece que el proceso está bajo control y para esto se realizan los gráficos de control del proceso, para seguir monitoreando el mismo a lo largo de su funcionamiento.

- La autocorrelación que se da en los datos, puede afectar de manera negativa la evolución de cualquier proceso productivo, ya que puede llevar a que los analistas lleguen a conclusiones erróneas acerca de su funcionamiento. es por esto que actualmente se utiliza el modelamiento ARIMA, que funciona como una serie temporal y que mediante los residuos se realizan gráficos de control en donde se puede establecer que efecto está teniendo la autocorrelación sobre el proceso y por ende en la calidad de los productos que se están ofreciendo a los clientes.
- El análisis de las metodologías existentes para el control de calidad de los procesos tenía como finalidad en los autores, el poder desarrollar una metodología que sea de fácil aplicación para cualquier empresario que quiera controlar sus procesos productivos, mediante la unión de diversas herramientas utilizadas en el control de calidad.
- La metodología propuesta por los autores se centró en la utilización de los gráficos de control para hacerle seguimiento y reducir la variación que se da en los mismos, así mismo se aplicó el modelo ARIMA para conocer si los datos se ven afectados por la autocorrelación que se da entre ellos mismos; de la misma manera se propone utilizar diagramas de causa y efecto, a la hora de analizar las causas comunes de variación, una vez desarrollados estos diagramas se busca establecer hipótesis acerca de su aparición, y si estas hipótesis son medibles se aconsejó utilizar el diseño de experimentos para conocer si esta hipótesis obtenida puede ser aceptada o rechazada.
- Una vez diseñada la metodología, se procedió a elaborar un ejemplo didáctico, en el que a partir de datos ya existentes de un proceso productivo, se realizó la fase I de la metodología, ya que la fase II debería ser utilizada por las empresas para hacer seguimiento al proceso o para hacer mejoramiento continuo cuando este es necesario.

- Debido a que la metodología se centró en la elaboración de los gráficos de control, para el ejemplo se utilizó el software statgraphics, el cual pudo ser aplicado tanto para los gráficos de control de prueba como para el desarrollo de gráficos para propósitos especiales como lo es el modelamiento ARIMA.
- No se pudo aplicar la fase II de la metodología propuesta, ya que esta implicaba conocer más datos sobre el proceso, los cuales no estaban a la mano para los autores del proyecto.

RECOMENDACIONES

- Para una futura investigación y posible desarrollo de una metodología que presente lineamientos similares, poder aplicarla con datos en tiempo real, de tal forma que pueda llevarse a cabo la fase II y conocer sus respectivas implicaciones.
- La posible divulgación de los proyectos de grado de investigación a los estudiantes, como una herramienta de carácter enriquecedor para su formación profesional, en especial si se tratan de temas de interés común y algo que se considera como un factor relevante hoy en día en cualquier organización, el poder controlar la calidad de los productos para lograr la satisfacción de los clientes.
- Muchas veces el principal inconveniente a la hora de definir la calidad de un producto en función del cumplimiento o no de unas especificaciones de fabricación es que se limita a analizar las especificaciones internas de fabricación, sin tener en cuenta las necesidades del mercado y la voz del cliente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALFARO NAVARRO, José Luis. Control estadístico de la calidad en procesos multivariantes autocorrelacionados. Una aplicación en la industria cuchillera de Albacete. Tesis doctoral área estadística. Albacete: universidad de Castilla- la Mancha. Departamento de economía y empresa. Área de estadística. 2005. 342 p.
- [2] APARISI, Francisco; y GARCIA D, J. Carlos. Aumento de la potencia del gráfico de control multivariante T^2 de Hotelling utilizando señales adicionales de falta de control. En: estadística española. Vol.43, Núm. 148, 2001, p. 171-188.
- [3] CASTRO, Andrés Mauricio. Seis sigma: la revolución en los datos y la calidad en las empresas privadas y públicas. En: revista de investigación, Universidad de América. Enero-Junio, 2008. Vol. 1, No 1, p. 70-76.
- [4] CHAKRABORTI, S.,W. Human. "Parameter Estimation and Performance of the p-Chart for Attributes Data."IEEE Transactions on Reliabilit, 2006.
- [5] CORDEIRO, J., AND REQUEIJO J. G.; Implementação do controlo estatístico do processoao sector de pintura de um fabricante automóvel. En: 5th Americas International Conference on Production Research (5: 21-23 Julio: Bogotá). Memorias. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 2010. 5 p.
- [6] DAI, Yi.; WANG, Zhao-Jun and ZOU, Chang-liang; CUSUM control charts based on likelihood ratio for preliminary analysis. En: Science in China series A: Mathematics. Enero, 2007, vol. 50, No 1, p. 47-62.
- [7] EVANS, James R.; Administración y control de Calidad, Editorial Thompson, sexta edición, 2005.
- [8] GARCÍA MORALES, Paula V.; PÉREZ TRIGOS, Carmen M.; CURA HERNÁNDEZ, Claudia L.; VEGA ARREAGA, José O.; Control de Calidad. 2008.

- [9] GONZÁLEZ MERCADO, José A; Pasos para el mejoramiento continuo, 2002.
- [10] HOYOS TORRES, William.; Un libro de Calidad. Bucaramanga, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.
- [11] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Norma técnica colombiana “documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C: el instituto, 2008. 41 p.
- [12] INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TEORICAS Y APLICADAS. Control estadístico de procesos multivariados mediante gráficos de control multivariados T^2 de Hotelling, MEWMA y MCUSUM. Facultad de ciencias económicas y estadística, Noviembre, 2003. 12 p.
- [13] KAYA, ISHAN, AND ORHAN ENGIN. “A new approach to define sample size at attributes control chart in multistage processes: An application in engine piston manufacturing process.” Materials Processing Technology, 2007.
- [14] KHOO, Michael B.C. “Poisson Moving Average versus Chart for Nonconformities.” Quality Engineering, 2004.
- [15] KUMARA, U. Dinesh; NOWICKIB, David; RAMIREZ MARQUEZ, Emmanuel; and VERMAB, Dinesh; “On the optimal selection of process alternatives in a Six Sigma implementation”. Int. J. Production Economics 111, 2008. P. 456–467.
- [16] LOPEZ, Gustavo.; metodología Six-Sigma: calidad industrial. México, Instituto de ingeniería Universidad Autónoma de Baja California.
- [17] LOWENTHAL, Jeffrey N.; Guía para la aplicación de un proyecto Seis Sigma. Madrid, Fundación Confemetal, 2002.
- [18] MÁRQUEZ PÉREZ, Mónica; competitividad en las organizaciones, 2001.

- [19] NARASIMHAN, Jayakumar And JONES C, Erick. Reduction of variation in a welding process using operational Six Sigma methodology. Department of Industrial and Management Systems Engineering University of Nebraska-Lincoln.6 p.
- [20] ORTIZ P, Néstor R; Análisis y mejoramiento de los procesos de la empresa. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [21] ORTIZ P, Néstor R; DUARTE, Juan B; GARAVITO, Edwin A.; y GONZALES, Claudia N.; Manual de prácticas de Ingeniería Industrial: Ingeniería de Calidad. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [22] OSPINA HINCAPIE, Carolina; YAÑEZ CANAL, Sergio y LOPERA GÓMEZ, Carlos Mario. Algunas cartas de control bivariadas para atributos. En: Dyna vol. 77, núm. 162, junio, 2010, p. 325-337.
- [23] PANDE, Peter S.; MEUMAN, Robert P y CAVANAGH, Roland R.; Las claves de Seis Sigma: la implantación con éxito de una cultura que revoluciona el mundo empresarial. Madrid, Mc Graw Hill, 2002.
- [24] PÉREZ BERNABEU, Helena. “Propuesta de mejora de los gráficos de control por atributos mediante la metodología de Daudin”. Tesis doctoral. Valencia, España: Universidad politécnica de Valencia, 2008.
- [25] PÉREZ ORTEGA, Giovanni y SOTO CAMARGO, Ana M.; “propuesta metodológica para el mejoramiento de procesos utilizando el enfoque Harrington y la norma ISO 9004”; Revista Universidad EAFIT, Vol. 41. No. 139. 2005. p. 46-56.
- [26] PROYECTO E-MATH, “capitulo IV: gráficos de control por atributos” [online]. Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Disponible en: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/SPC_4.pdf. [Citado el 3 de Febrero de 2003].

[27] SÁNCHEZ CORTEZ, José A; La importancia del desarrollo organizacional en una institución pública de educación superior. Tesis de maestría. México; Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca, 2008.

[28] SANCHEZ, Ismael. Métodos estadísticos para la mejora de la calidad. En: clase de estadística. Memorias. Universidad Carlos III de Madrid, departamento de estadística y econometría.

[29] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, “capítulo 6: gráficos de control con memoria” [Online]. Disponible en: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/kaiser/esp/calidad/capitulo6.pdf>.

[30] UNIVERSIDAD EAFIT; Framework para la documentación de procesos en PYMES [online]. Disponible en internet: <http://bdigital.eafit.edu.co/bdigital/PROYECTO/P658.022T629/capitulo2.pdf>.

[31] WU, ZHANG, HUA LUO, AND XIAOLAN ZHANG. “Optimal np control chart with curtailment.” European Journal of Operational Research, 2006.

ANEXOS

ANEXO A: DESPLIEGUE DE LA FUNCION DE CALIDAD

A la hora de interpretar la voz del cliente a fin de traducir sus necesidades en características de control específicas para el producto final, es decir determinar las características que el cliente considera críticas para su producto, el despliegue de la función de calidad QFD, ayuda a las compañías a fabricar productos de mayor calidad y a menor costo, es decir productos mucho más competitivos, que ayudan a que las organizaciones cada vez más se acerquen a las expectativas y necesidades de sus clientes, y así se pueda lograr la satisfacción de los mismos.

El QFD se pregunta por la calidad verdadera, y se basa en tres pilares fundamentales a saber: el identificar que quiere el cliente (que necesitan y esperan del servicio o del producto los usuarios); el focalizar recursos, materias primas y recurso humano en busca de cumplir sus expectativas; y por ultimo priorizar, es decir cuál será la mejor combinación de estos recursos para lograr satisfacer lo que el cliente desea

En la sugerencia dada por la metodología para los productos que contienen varias características críticas a controlar, se enfocará la construcción de la primera fase del QFD, es decir se obtendrá lo que comúnmente se denomina la “casa de la calidad”, este desarrollo se llevará a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Obtener los requerimientos en términos del consumidor: más comúnmente denominados como los “QUE”. Se establecen las necesidades primarias (o estratégicas), las secundarias (o de especificación del producto) y las terciarias (especificaciones técnicas del producto); es considerada la etapa más crítica del proceso, ya que requiere obtener y expresar lo que el consumidor realmente quiere y no lo que la organización piensa que él espera.

2. Obtener las características de control del producto final: es decir los “COMO”; en resumen como va a hacer la organización para cumplir con esos requerimientos establecidos en el numeral 1; estos atributos deben ser medibles y técnicos, y deben estar relacionados directamente con las necesidades y expectativas que se detectaron al llevar a cabo el análisis del consumidor
3. Desarrollo de la matriz de relaciones entre los requerimientos del consumidor y las características de control del producto final: busca identificar las relaciones que se dan entre los que y los cómo. Se distinguen tres tipos de relaciones: fuerte, media y débil, cada una de estas se caracteriza por tener un símbolo en específico. El beneficio de esta matriz de relaciones radica en que esta indica si las características de control del producto final cubren adecuadamente con los requerimientos o expectativas del consumidor
4. Evaluación competitiva: se muestran las ponderaciones de importancia para el cliente de los “QUE”, así mismo evalúa el grado de excelencia alcanzado por los competidores en cada uno de los QUE planteados por el cliente. Esto ayuda a que la organización se enfoque en los puntos más fuertes y los muy débiles del producto que se está ofreciendo en el mercado.
5. Evaluaciones de las características del producto final: las evaluaciones competitivas son comparadas con las evaluaciones de las características de control del producto para determinar áreas de inconsistencia entre lo que el consumidor dice y lo que son las propias evaluaciones de la organización.
6. Determinar puntos de venta para nuevos productos: aquí se listan los puntos clave de venta para un nuevo producto, y estos se basan en: el grado de importancia en la satisfacción de las necesidades del consumidor y los costos asociados para el incorporamiento del producto.
7. Desarrollo de objetivos de las características de control del producto final (CUANTO): estos objetivos se basan de acuerdo a: la selección de los

puntos de venta, las ponderaciones de importancia del consumidor, y las fortalezas y debilidades del producto actual.

8. Selección de las características de control a ser desplegadas: en esta fase se establecerán los objetivos que se consideren más importantes, es decir se desplegaran en términos de la función de requerimientos, acciones y control, aquellas características que tengan una muy fuerte relación para cumplir con las necesidades del consumidor.
9. Matriz de correlaciones: permite identificar cuáles de los COMO(S) se encuentran contenidos e otros COMO(S), establece la correlación entre cada uno de ellos y muestra cuales están en conflicto. Para esta parte de utilizan símbolos para describir la fuerza de estas relaciones (fuerte correlación positiva, correlación positiva, correlación negativa y fuerte correlación negativa).

En el siguiente grafico se presenta el prototipo de la casa de la calidad a generar en esta primera parte de la propuesta metodológica:



ANEXO B: DATOS ORIGINALES CARACTERISTICA E

Se presentan los 216 datos correspondientes a las observaciones de la característica E, presentados en el capítulo 7.

Observaciones individuales									
	E		E		E		E		E
1	0,36	31	0,35	61	0,35	91	0,4	121	0,34
2	0,35	32	0,34	62	0,35	92	0,41	122	0,35
3	0,34	33	0,32	63	0,36	93	0,4	123	0,35
4	0,33	34	0,33	64	0,35	94	0,39	124	0,36
5	0,32	35	0,32	65	0,34	95	0,35	125	0,34
6	0,31	36	0,32	66	0,33	96	0,38	126	0,35
7	0,35	37	0,35	67	0,32	97	0,38	127	0,36
8	0,32	38	0,33	68	0,31	98	0,39	128	0,35
9	0,33	39	0,35	69	0,35	99	0,38	129	0,38
10	0,33	40	0,35	70	0,32	100	0,38	130	0,34
11	0,34	41	0,36	71	0,35	101	0,37	131	0,36
12	0,35	42	0,35	72	0,36	102	0,33	132	0,38
13	0,35	43	0,35	73	0,35	103	0,35	133	0,37
14	0,36	44	0,36	74	0,35	104	0,37	134	0,35
15	0,34	45	0,35	75	0,35	105	0,38	135	0,35
16	0,35	46	0,33	76	0,36	106	0,38	136	0,36
17	0,33	47	0,33	77	0,35	107	0,35	137	0,37
18	0,33	48	0,34	78	0,35	108	0,35	138	0,39
19	0,35	49	0,35	79	0,32	109	0,32	139	0,38
20	0,33	50	0,35	80	0,35	110	0,33	140	0,38
21	0,32	51	0,36	81	0,34	111	0,32	141	0,39
22	0,35	52	0,35	82	0,33	112	0,31	142	0,36
23	0,34	53	0,35	83	0,35	113	0,35	143	0,38
24	0,33	54	0,36	84	0,36	114	0,33	144	0,35
25	0,34	55	0,35	85	0,38	115	0,32	145	0,36
26	0,33	56	0,35	86	0,37	116	0,31	146	0,38
27	0,34	57	0,36	87	0,39	117	0,35	147	0,35
28	0,33	58	0,35	88	0,38	118	0,32	148	0,33
29	0,35	59	0,35	89	0,37	119	0,33	149	0,35
30	0,36	60	0,36	90	0,39	120	0,33	150	0,35

Observaciones individuales					
	E		E		E
151	0,37	173	0,37	195	0,32
152	0,37	174	0,38	196	0,35
153	0,37	175	0,37	197	0,32
154	0,39	176	0,38	198	0,31
155	0,38	177	0,36	199	0,33
156	0,39	178	0,32	200	0,34
157	0,36	179	0,35	201	0,32
158	0,38	180	0,35	202	0,34
159	0,35	181	0,35	203	0,33
160	0,36	182	0,36	204	0,34
161	0,35	183	0,35	205	0,33
162	0,35	184	0,36	206	0,34
163	0,33	185	0,35	207	0,33
164	0,35	186	0,34	208	0,33
165	0,36	187	0,35	209	0,32
166	0,37	188	0,33	210	0,31
167	0,38	189	0,3	211	0,33
168	0,32	190	0,35	212	0,32
169	0,35	191	0,35	213	0,33
170	0,34	192	0,32	214	0,32
171	0,35	193	0,33	215	0,34
172	0,36	194	0,35	216	0,32

ANEXO C: RESIDUOS OBTENIDOS DE LA MODELIZACION ARIMA

Se presentan los 216 residuos que se obtuvieron al aplicar la modelización ARIMA.

Residuos modelización ARIMA									
	E		E		E		E		E
1	0,0072	31	-0,004	61	-0,0043	91	0,026	121	0,0051
2	-0,0054	32	-0,012	62	-0,0024	92	0,026	122	0,01
3	-0,012	33	-0,025	63	0,01	93	0,0088	123	0,0031
4	-0,015	34	-0,003	64	-0,0043	94	0,00062	124	0,01036
5	-0,018	35	-0,012	65	-0,012	95	-0,032	125	-0,0143
6	-0,02	36	-0,01	66	-0,015	96	0,0192	126	0,0022
7	0,027	37	0,022	67	-0,017	97	0,0165	127	0,013
8	-0,019	38	-0,011	68	-0,02	98	0,018	128	-0,0043
9	-0,006	39	0,0096	69	0,027	99	0,0036	129	0,028
10	-0,0021	40	0,006	70	-0,019	100	0,0054	130	-0,023
11	0,005	41	0,01	71	0,014	101	-0,0018	131	0,0066
12	0,01	42	-0,0043	72	0,019	102	-0,037	132	0,028
13	0,003	43	-0,0024	73	-0,0043	103	0,004	133	0,0037
14	0,01	44	0,01	74	-0,0024	104	0,026	134	-0,017
15	-0,014	45	-0,0043	75	0,00036	105	0,021	135	-0,005
16	0,002	46	-0,022	76	0,01	106	0,0109	136	0,0103
17	-0,017	47	-0,01	77	-0,0043	107	-0,022	137	0,0157
18	-0,01	48	0,0051	78	-0,0024	108	-0,0079	138	0,028
19	0,015	49	0,01	79	-0,029	109	-0,029	139	0,0063
20	-0,014	50	0,003	80	0,014	110	-0,0058	140	0,0054
21	-0,02	51	0,01	81	-0,0013	111	-0,012	141	0,018
22	0,019	52	-0,0043	82	-0,015	112	-0,02	142	-0,016
23	-0,0013	53	-0,0024	83	-0,012	113	0,027	143	0,0146
24	-0,015	54	0,01	84	0,0159	114	-0,0085	144	-0,016
25	0,0024	55	-0,0043	85	0,026	115	-0,02	145	0,002
26	-0,009	56	-0,0024	86	0,0038	116	-0,02	146	0,026
27	0,0023	57	0,01	87	0,022	117	0,027	147	-0,016
28	-0,0095	58	-0,0043	88	0,0064	118	-0,018	148	-0,028
29	0,012	59	-0,0024	89	-0,0046	119	-0,0058	149	0,0096
30	0,016	60	0,01	90	0,023	120	-0,0021	150	0,0059

Residuos modelización ARIMA					
	E		E		E
151	0,02	173	0,016	195	-0,024
152	0,011	174	0,018	196	0,0149
153	0,0055	175	0,00097	197	-0,0213
154	0,026	176	0,013	198	-0,0258
155	0,0064	177	-0,009	199	0,0071
156	0,015	178	-0,043	200	0,0107
157	-0,016	179	0,011	201	-0,0194
158	0,015	180	0,0087	202	0,0069
159	-0,016	181	0,00036	203	-0,0066
160	0,002	182	0,01	204	0,00236
161	-0,0043	183	-0,0043	205	-0,0094
162	-0,0024	184	0,0076	206	0,0023
163	-0,019	185	-0,0043	207	-0,0095
164	0,0096	186	-0,0124	208	-0,0076
165	0,016	187	0,0049	209	-0,0148
166	0,0157	188	-0,0168	210	-0,0202
167	0,018	189	-0,04	211	0,0071
168	-0,049	190	0,0289	212	-0,0093
169	0,0058	191	0,0142	213	-0,00024
170	-0,0013	192	-0,0296	214	-0,012
171	0,0049	193	-0,0058	215	0,0097
172	0,013	194	0,0179	216	-0,016