



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

APLICACIÓN DE UN ESTUDIO DE R&R AMPLIADO  
PARA LA EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE  
MEDICIÓN Y SU IMPACTO EN EL CONTROL DE  
CALIDAD.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**Ingeniero Químico**

PRESENTA:

**Aarón Abdallah Gómez González**

DIRIGIDA POR:

**Dr. Mariano Pérez Camacho**

Ciudad de México, Marzo 2020





Universidad Nacional  
Autónoma de México

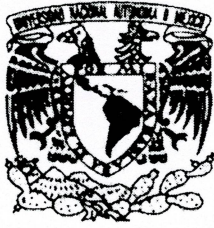


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO


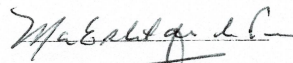


FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN  
ESCOLAR  
PRESENTE.

Comunico a usted que al alumno(a) Gómez González Aarón Abdallah, con número de cuenta 30905632-6 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 6 del mes de marzo de 2020 a las 17:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	M. EN C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
VOCAL	DR. MARIANO PÉREZ CAMACHO
SECRETARIO	M. EN I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE
SUPLENTE	I.Q. CONSUELO MATÍAS GARDUÑO
SUPLENTE	M. EN E. RAFAEL GONZÁLEZ REYNOSO

  
\_\_\_\_\_  
MARIANO PÉREZ CAMACHO  
  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_  


El título de la tesis que se presenta es: "Aplicación de un estudio de R&R ampliado para la evaluación de un sistema de medición y su impacto en el control de calidad".

Opción de Titulación: Convencional

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
CDMX, a 12 de febrero de 2020.

DR. VICENTE JESUS HERNÁNDEZ ABAD  
DIRECTOR  
ZARAGOZA

DIRECCIÓN

RECIBI:

OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES  
Y DE GRADO

Vo.Bo

M. EN C. CESAR SAÚL VELASCO HERNÁNDEZ  
JEFE DE LA CARRERA DE I.Q.



---

La vida no siempre se trata de tener las mejores cartas; a veces lo importante es jugar bien una mala mano.

JACK LONDON

---

## Agradecimientos

*Agradezco a mis padres **Maritza Judith González Smith** y **Alberto Gómez Molina** por todo el apoyo que me han brindado, por todo su esfuerzo en intentar en que me convierta en un hombre constructivo y de bien; por el amor y la fe incondicional que han depositado en mí todos estos años, a pesar de todas las adversidades. Agradezco sus enseñanzas, su conocimiento, el tiempo de calidad que me siguen dando; porque todo ello no solo ha contribuido a que concluya mis estudios de licenciatura, sino que me han dado la oportunidad para que sea un hombre libre. Este logro lo comparto con ustedes. Desde lo profundo de mi alma, muchas gracias.*

*Quiero agradecer a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** y la **Escuela Nacional Preparatorio N°2** por haberme brindado un espacio para vivir las aventuras del pensar. Que entre sus profesores, edificios, bibliotecas y jardines no solo conforman una institución académica, sino uno de los más grandes proyectos de ingeniería social que han existido en México, un proyecto de todos los mexicanos, que siempre ha buscado la inclusión de las clases más vulnerables, el desarrollo y el progreso de la ciencia. A todos los que dan vida a la UNAM muchas gracias.*

*Agradezco al **Dr. Mariano Pérez Camacho** por todo el apoyo y paciencia que me ha brindado desde que era un estudiante, su pasión por el conocimiento y la enseñanza, así como su fe en las nuevas generaciones, son ejemplos que deseo seguir en mi devenir profesional. Por esto y más, muchas gracias.*

*Quiero agradecer el apoyo de familiares y amigos más cercanos (y no tan cercanos), gracias por el apoyo en todos los momentos difíciles, por compartir las risas y los instantes de euforia a lo largo de la carrera. Deseo que tengan un futuro brillante y lleno de bienestar para ustedes y sus seres queridos.*

*Agradezco a todos los ingenieros de EPM Grupo Gondi por darme mi primera oportunidad laboral y por la constante asesoría. También agradezco al M. en C. Víctor Hugo García Morales por todo su apoyo y paciencia, muchas gracias.*

*Agradezco a todos los profesores miembros del jurado por su apoyo y la confianza, quienes se permitieron el tiempo para revisar este trabajo. Muchas gracias a cada uno de ustedes.*

***Quiero hacer patente mi agradecimiento al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) de la UNAM con clave PE105319 por la ayuda prestada para la finalización de este trabajo de tesis.***

# Contenido

I. Índice de tablas .....	1
II. Índice de figuras .....	2
III. Introducción .....	4
IV. Objetivo.....	6
V. Alcance.....	6
Capítulo 1	
La calidad en la industria.....	7
1.1 Medición del desempeño de una empresa .....	10
1.2 Proyecto de mejora continua en la empresa.....	13
1.3 Estrategia corporativa y recursos de implementación; política integral y pirámide documental. ....	14
Capítulo 2	
Proceso, sistema de medición y pensamiento estadístico. ....	17
2.1 Proceso.....	17
2.2 Variables del Proceso.....	21
2.2.1 Calibre .....	22
2.2.2 Dureza de la bobina .....	23
2.2.3 Humedad.....	24
2.2.4 Integrity Test .....	25
2.2.5 Otras variables .....	27
2.3 Sistema de medición y pensamiento estadístico.....	30
Capítulo 3	
Marco Teórico .....	33
3.1 Conceptos básicos.....	33
3.2 Estudio largo de repetibilidad y reproducibilidad.....	41
3.3 Metodología para la aplicación de un estudio R&R largo.....	43
3.3.1 Análisis por medias y rangos del estudio R&R largo .....	44
3.3.2 ANOVA para el estudio R&R largo .....	55
3.3.3 Estudios R&R para pruebas destructivas .....	58
Capítulo 4	

Metodología de aplicación para el estudio R&R ampliado.....	59
4.1 Procedimientos de recibo de materia prima y control de calidad. ....	59
4.2 Selección de variables y ensayos de laboratorio .....	64
4.2.1 Procedimiento para realizar la prueba de calibre y dureza.....	64
4.2.2 Procedimiento para realizar la prueba de Integrity Test.....	67
4.3 Aplicación de estudio R&R.....	68
Capítulo 5	
Resultados de los estudios de Reproducibilidad y Repetitividad .....	70
5.1 Procesamiento de los datos.....	70
5.2 Resultados del estudio.....	79
5.3 Análisis de resultados. ....	85
5.3.1 Calibre .....	85
5.3.2 Dureza .....	87
5.3.3 Integrity Test .....	88
5.4 Criterios de aceptación. ....	89
Capítulo 6	
Conclusiones .....	94
IV. Referencias bibliográficas y digitales .....	96
IV. Glosario.....	100
V. Anexos.....	104
<b>V.1 Anexo A</b> .....	105
<b>V.2 Anexo B</b> .....	106
<b>V.3 Anexo C</b> .....	107
<b>V.4 Anexo D</b> .....	108

# I. Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 Lista de variables que afectan al proceso.</i>	28
<i>Tabla 3.1 Tabla resumen de los problemas típicos que enfrenta un sistema de medición.</i>	39
<i>Tabla 3.2 Tabla con datos de ensayos de Peso Base, realizados por tres operadores diferentes.</i>	45
<i>Tabla 3.3 Tabla con datos de ensayos de Peso Base, categorizados por número de partes y promedios globales.</i>	52
<i>Tabla 3.4 Tabla resumen con los valores de cada criterio.</i>	54
<i>Tabla 4.1 Plan de calidad, defecto de pegado.</i>	60
<i>Tabla 4.2 Plan de calidad, defecto de pegado.</i>	60
<i>Tabla 4.3 Plan de calidad, dureza.</i>	61
<i>Tabla 4.4 Plan de calidad, dureza.</i>	61
<i>Tabla 5.1 Resultados para la prueba de calibre, operador A.</i>	71
<i>Tabla 5.2 Resultados para la prueba de calibre, operador B.</i>	71
<i>Tabla 5.3 Resultados para la prueba de calibre, operador C.</i>	72
<i>Tabla 5.4 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador A.</i>	72
<i>Tabla 5.5 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador B.</i>	73
<i>Tabla 5.6 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador C.</i>	73
<i>Tabla 5.7 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador A.</i>	74
<i>Tabla 5.8 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador B.</i>	74
<i>Tabla 5.9 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador C.</i>	75
<i>Tabla 5.10 Resultados para calibre Minitab.</i>	79
<i>Tabla 5.11 Resultados para dureza Minitab.</i>	81
<i>Tabla 5.12 Resultados para Integrity test Minitab.</i>	83
<i>Tabla 5.13. Número de categorías distintas como criterio de aceptación.</i>	86
<i>Tabla 5.14. Criterios de aceptación para un sistema de medición.</i>	90
<i>Tabla 5.15. Tabla resumen de resultados.</i>	90
<i>Tabla 5.16 Resumen de resultados.</i>	93



## II. Índice de figuras

<i>Figura 1.1 Beneficios de asegurar la calidad en la cadena productiva.</i>	9
<i>Figura 1.2 Evolución de los criterios para determinar el desempeño de la empresa, cada nuevo estado incorpora los anteriores criterios y agrega otros más.</i>	12
<i>Figura 1.3 Medición del desempeño de una organización.</i>	12
<i>Figura 1.4 Planta de papel en una de las instalaciones de la empresa.</i>	13
<i>Figura 1.5 Algunos indicadores clave del negocio.</i>	14
<i>Figura 1.6 Trabajadores y gerentes analizando información.</i>	16
<i>Figura 2.1. a) Ejemplo de un plegadizo tipo “canastilla”, b) Ejemplo de una caja corrugada.</i>	18
<i>Figura 2.2. Proceso de fabricación de producto plegadizo tipo “canastilla”.</i>	19
<i>Figura 2.3 Proceso de fabricación de caja corrugada.</i>	19
<i>Figura 2.4 Estructura interna de la “flauta” o “flautilla”.</i>	20
<i>Figura 2.5 Tipos de “flauta” o “flautillas” que son utilizadas en las cajas.</i>	20
<i>Figura 2.6 Rodillos de máquina laminadora, utilizado para la elaboración del corrugado.</i>	21
<i>Figura 2.7 Bobina de papel tipo couche en una banda transportadora.</i>	22
<i>Figura 2.8 Ejemplos de “crackeo” en plegadizos tipo canastilla.</i>	23
<i>Figura 2.9 a) Micrómetro, midiendo calibre. b) Esclerómetro.</i>	24
<i>Figura 2.10 Franja húmeda en una bobina de papel tipo couche.</i>	25
<i>Figura 2.11 Estructurales donde se aplica los esfuerzos.</i>	26
<i>Figura 2.12 Máquina Universal Instron.</i>	26
<i>Figura 2.13 Prueba de Integrity Test en una caja fibra.</i>	27
<i>Figura 2.14 Las 6M del proceso.</i>	31
<i>Figura 2.15 Impacto del pensamiento estadístico en la empresa.</i>	32
<i>Figura 3.1 Diagrama de Ishikawa que representa las causas de la variabilidad en la medición.</i>	34
<i>Figura 3.2 Diagrama de Ishikawa. Causas de la variabilidad en los sistemas de medición.</i>	36
<i>Figura 3.3 Variación total observada en los sistemas de medición.</i>	37
<i>Figura 3.4 Diferencias entre precisión y exactitud.</i>	40
<i>Figura 3.5 Precisión, exactitud y su significado con parámetros estadísticos.</i>	41
<i>Figura 3.6 Métodos comunes para realizar los estudios de R &amp; R.</i>	41
<i>Figura 3.7 Comparación de la medición media de los operadores.</i>	46

<i>Figura 3.8 Operación de una carta <math>\bar{X} - R</math>.</i>	47
<i>Figura 3.9 La carta <math>\bar{X}</math> detecta cambios significativos en la medida del proceso. Cuando la curva se desplaza la carta manda una o varias señales de fuera de control.</i>	48
<i>Figura 3.10 La carta R detecta cambios significativos en la amplitud de la dispersión. Por ejemplo, si la variabilidad aumenta (campana más amplia). La carta R lo detecta mediante uno o más puntos fuera de su LCS.</i>	48
<i>Figura 3.11 Gráficos que generalmente son utilizados en un estudio R&amp;R.</i>	57
<i>Figura 4.1 Ejemplo de una “no conformidad” por capas rotas por transportación.</i>	62
<i>Figura 4.2 Procedimiento general para la recepción de material en planta.</i>	63
<i>Figura 4.3 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de calibre.</i>	64
<i>Figura 4.4 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de calibre.</i>	65
<i>Figura 4.5 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de dureza.</i>	66
<i>Figura 4.6 Procedimiento general de muestreo de producto terminado para la prueba de IT.</i>	67
<i>Figura 5.1 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de calibre.</i>	76
<i>Figura 5.2 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de dureza.</i>	77
<i>Figura 5.3 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de Integrity Test.</i>	77
<i>Figura 5.4. Resultados estudio R&amp;R, Calibre.</i>	80
<i>Figura 5.5. Resultados estudio R&amp;R, Dureza.</i>	82
<i>Figura 5.6. Resultados estudio R&amp;R, Integrity Test.</i>	84
<i>Figura 5.7. Fotografía, en micrómetros, del grosor de una hoja de papel.</i>	91

### III. Introducción

Ante un mundo cada vez más globalizado las empresas se ocupan todo el tiempo en ofrecer productos de calidad a un mercado altamente competido y demandante, para lograrlo, hacen uso de las técnicas de aseguramiento de calidad que se han desarrollado a lo largo del siglo XX y que ahora, ante la llegada de la industria 4.0, se complementan con los avances tecnológicos que matemáticos e ingenieros han desarrollado para producir servicios o bienes de consumo con una calidad y confiabilidad de alto grado y de manera rentable.

En la actualidad se reconoce, por lo general, que la forma más eficiente en costos para mantener una alta calidad se logra mediante un seguimiento constante del proceso de producción. A menudo dicho seguimiento se realiza al extraer un cierto número de muestras de la cadena de producción y medir cierto atributo, variable o característica de calidad. Los errores en los procesos de medición ya sean estos aleatorios o sistemáticos, son prácticamente inherentes; por lo que no puede ignorarse el hecho, de que probablemente cuando en los laboratorios de análisis se realizan ensayos o pruebas para cuantificar la magnitud de una variable, se pase por alto la discriminación del error y el nivel de variabilidad que se genera cuando se realizan estas actividades. Es decir, un sistema de aseguramiento de calidad se fundamenta en la fiabilidad de los datos que genera su laboratorio de pruebas y si estos datos poseen un sesgo que impida analizar lo que realmente sucede en la realidad, probablemente se tomen decisiones operativas y gerenciales que no sean las adecuadas para lograr los objetivos de la empresa.

Debido a lo anterior, este trabajo trata sobre la aplicación de un estudio de reproducibilidad y repetitividad (R&R) ampliado para evaluar el sistema de medición de un laboratorio especializado en la realización de pruebas destructivas y no destructivas para la industria del papel, con el propósito de determinar la variabilidad debida al proceso, el instrumento y el operador.

El estudio de R&R ampliado es una metodología de análisis estadístico aplicado al control de calidad en los procedimientos de medición y que forma parte de las recomendaciones que da la AIAG (Automotive Industry Action Group) sobre el análisis de sistemas de medición y los lineamientos para los sistemas de gestión de calidad de acuerdo a la norma ISO 9001:2015. Ambas normativas forman parte fundamental de los procedimientos de mejora continua y la implementación de la metodología Seis Sigma.

---

En el capítulo uno se comenzará explicando la relevancia de los sistemas de gestión de calidad para las empresas y su negocio, la medición del desempeño de una empresa, implementación de un sistema de mejora continua, la estrategia corporativa y los recursos de implementación. En el capítulo dos se explica de manera detallada la naturaleza del proceso, su sistema de medición y el uso del pensamiento estadístico como herramienta de control. El capítulo tres, aborda toda la teoría estadística utilizada para la realización del estudio, así como la descripción de las herramientas computacionales, el tipo y diseño de estudio para cada variable y la rutina de cálculo. El capítulo cuatro describe la metodología de aplicación en campo (laboratorio de planta de producción) y en el capítulo cinco presenta los resultados del estudio R&R para cada prueba, así como recomendaciones generales para corregir desviaciones. Y por el último, en el capítulo seis se presentan las conclusiones de este trabajo.

---

## IV. Objetivo

- Aplicar un estudio de reproducibilidad y repetibilidad (R&R) ampliado para evaluar el sistema de medición de un laboratorio especializado en la realización de pruebas de calibre, dureza de bobina e Integrity Test, usadas en la industria del papel, con el propósito de determinar la variabilidad debida al proceso, el instrumento y el operador.

## V. Alcance

El estudio de reproducibilidad y repetibilidad que se desarrolla en este trabajo se enfoca en las mediciones realizadas a lo largo del proceso de fabricación, desde la evaluación de las propiedades de las materias primas, para su rechazo o aceptación, hasta los productos intermedios y finales que serán enviados al cliente.

Si bien el propósito es conocer la variabilidad del sistema de medición, este trabajo también pretende demostrar los beneficios de realizar este tipo de estudios para conocer cómo cambia esta variabilidad del sistema en distintas etapas del proceso, donde se involucra diferentes condiciones ambientales, de operación, de maquinaria y de personal. Así mismo, como la demostración de algunas de las metodologías y softwares disponibles, para la realización de los distintos tipos de estudios R&R que se pueden diseñar en base a las necesidades y limitaciones que una entidad productiva puede afrontar en el día a día.

## 1

## La calidad en la industria

En los últimos años la actividad y el mercado industrial de bienes y servicios se hace más global, hoy en día es posible comprar toda clase de artículos en Amazon<sup>1</sup> o Alibaba<sup>2</sup>, y obtenerlos en la puerta de nuestros hogares en menos de una semana sin importar en qué lugar del mundo se encuentren. Las empresas de manufactura e industrias extractivas se han dado cuenta que para ser competitivas han tenido que introducir metodologías y procedimientos para asegurar la calidad de sus productos; con el propósito de obtener la confiabilidad más alta posible.

Poniendo en contexto dicho tema, es necesario primero entender lo que es la calidad y su relevancia para las empresas. Se han dado distintas aseveraciones por parte de diferentes autores y organizaciones que sustentan con cierto peso la validez de sus definiciones, por lo que aquí se tomarán como referencia las más importantes.

Para Juran, sostiene que: “Calidad es que un producto sea adecuado para su uso. Así, la calidad consiste en la ausencia de deficiencias en aquellas características que satisfacen al cliente” [3].

---

<sup>1</sup> Amazon es una compañía estadounidense, creada por Jeff Bezos, pionera en ofrecer servicios de comercio electrónico y de computación en la nube. Es actualmente considerada como la compañía líder más valiosa de su sector.

<sup>2</sup> Alibaba es el gigante chino en ofrecer servicios de comercio electrónico, en los últimos años se ha catalogado como una de las empresas más valiosas de Asia y ha tenido un incremento en sus acciones debido a su modelo de negocio con empresas chinas y clientes extranjeros.

---

Mientras tanto que para la American Society for Quality (ASQ), la calidad tiene dos significados: “características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer necesidades explícitas o implícitas” y “un producto o servicio libre de deficiencias” [11].

La norma ISO-9001-2015 define a la calidad como el seguimiento de las percepciones de los clientes y el grado con el que se cumplen sus necesidades y expectativas [3]. Y es aquí, en donde uno puede intuir que el nexo entre estas tres definiciones es la satisfacción del cliente, que está relacionada con las expectativas que éste tiene con respecto al producto o servicio.

Cuando compramos algún producto o servicio instantáneamente nos convertimos clientes directos de la empresa que lo ofrece y dichas expectativas son formuladas de acuerdo a nuestras necesidades, el precio, los antecedentes, la publicidad, la durabilidad, la tecnología, la imagen de la empresa, etc. Por ejemplo, cuando ordenamos una pizza tendemos a evaluar el sabor y la calidad de los ingredientes, la facilidad con la que se ordena, el precio y el tiempo de entrega. Comúnmente decimos que existe satisfacción cuando el cliente percibe al menos lo que esperaba. Por lo tanto, podemos concluir que la calidad del producto, el precio y la atención en el servicio son los aspectos que determinan e influyen en la satisfacción del cliente.

Tener consciencia del papel de la calidad en los sectores productivos nos aproxima a múltiples beneficios que satisfacen, no solo a consumidores, sino también a la plantilla de trabajo de la empresa que ofrece los bienes y servicios. Es decir, anteriormente las empresas pensaban que trabajar en mejoras de calidad, y en el aseguramiento de calidad en sí, ocasionaban mayores gastos. Sin embargo, actualmente se han puesto de manifiesto todas las problemáticas reales que conlleva prescindir de un departamento de aseguramiento de calidad, dado que el aseguramiento de la calidad sienta la base de un sistema de mejora continua.

En base a la experiencia práctica, cuando se tiene mala calidad en las diferentes actividades, hay equivocaciones y fallas de todo tipo. Al mejorar la forma en que se realizan todas las actividades se logra una reacción en cadena que genera importantes beneficios. Por ejemplo, se reducen reprocesos, errores, retrasos, desperdicios y artículos defectuosos; así mismo, disminuye la devolución de productos, las visitas o auditorías a causa de la garantía y las quejas de los clientes. Esto se aprecia mejor en la figura 1.1.

Considerando también que el personal tiene más tiempo para atender otro tipo de problemas relacionados a la producción, los desperdicios, etc. Incluso se pueden ocupar en el desarrollo de nuevos productos que pueden generar un impacto económico positivo para la empresa.

Citando a Seth Godin<sup>3</sup>: “No busques clientes para tus productos, busca productos para tus clientes”, claro está, que esta frase hace evidente un ejemplo de lo antes mencionado.



Figura 1.1 Beneficios de asegurar la calidad en la cadena productiva. [26].

En resumen, la calidad no solo es un atributo centrado en el producto o servicio comercializado, sino que termina siendo una herramienta empresarial para volver a las empresas más competitivas.

La competitividad es la capacidad de una empresa para generar valor para el cliente y sus proveedores de mejor manera que sus competidores; los dueños y gerentes de las empresas siempre están preocupados por ser competitivos, y esto solo se logra en base a la implementación de metodologías que permitan llevar un control de la calidad y la mejora continua. Sin embargo, antes de tratar de implementar cualquier proyecto de mejora continua, se tiene que evaluar el desempeño de la empresa a través de indicadores.

<sup>3</sup> Seth Godin es un empresario, informático y filósofo estadounidense, quien está considerado como uno de los teóricos del marketing más importantes de la última década.



## 1.1 Medición del desempeño de una empresa

Un aspecto fundamental en una organización es decidir qué y cómo se va a medir su salud y desempeño, ya que la elección de lo que un negocio o un área mide y analiza comunica valor, encauza el pensamiento de los empleados y fija las prioridades. Las medidas son un medio sistemático para convertir las ideas en acción. Por lo tanto, la medición constituye uno de los aspectos esenciales en el control estadístico y en las estrategias de mejora continua, como Seis Sigma [5].

Sigma ( $\sigma$ ) es la letra griega que se usa para denotar la desviación estándar poblacional (proceso), la cual proporciona una forma de cuantificar la variación. El nivel de sigmas que tiene un proceso es una forma de describir qué tan bien la variación del proceso cumple las especificaciones o requerimientos del cliente. En este sentido, la meta ideal es que el proceso tenga un nivel de calidad de Seis Sigma.

Seis Sigma ( $6\sigma$ ) es una estrategia de mejora continua del negocio, que tiene diferentes significados para diferentes grupos dentro de una organización. A nivel empresa es una iniciativa estratégica que busca alcanzar una mejora significativa en el crecimiento del negocio, su capacidad y en la satisfacción de los clientes. En el nivel operacional, Seis Sigma tiene una naturaleza táctica que se enfoca a mejorar métricas de eficiencia operacional, como tiempos de entrega, costos de no calidad y defectos por unidad. Mientras que a nivel proceso Seis Sigma es utilizada para reducir la variabilidad, y con ello es posible encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos del negocio, así como disminuir los costos directos. Por lo que Seis Sigma es una iniciativa estratégica y táctica para la gestión del negocio, que tiene la capacidad de enfocar la empresa hacia las necesidades de los clientes y alcanzar su satisfacción. En su nivel más elemental la meta de  $6\sigma$ , que le da el nombre, es lograr procesos con una calidad Seis Sigma, es decir, que como máximo generen 3.4 defectos por millón de oportunidades de error. Esta meta se pretende alcanzar mediante un programa vigoroso de mejora, diseñado e impulsado por la alta dirección de una organización, en el que se desarrollan proyectos  $6\sigma$  a lo largo y ancho de la organización con el objetivo de lograr mejoras, así como eliminar defectos y retrasos de productos, procesos y transacciones [5].

En 1987, Seis Sigma fue introducida por primera vez en Motorola por un equipo de directivos encabezados por Bob Galvin, presidente de la compañía, con el propósito de reducir los defectos de productos electrónicos. En este trabajo no se describirá el proceso de implementación de un sistema

---

Seis Sigma en una organización, solo se resalta la importancia que tiene un estudio de R&R como soporte documental de un sistema Seis Sigma.

Una tarea esencial del líder y de su equipo es establecer el sistema de medición del desempeño de la organización, de modo que se tenga claro cuáles son los signos vitales de la salud de la organización y los procesos. De esta manera será posible encauzar el pensamiento y la acción (mejora) a lo largo del ciclo de negocio en los diferentes procesos. En este sentido, hoy se sabe que los reportes de los resultados financieros no son suficientes para medir la salud actual y futura de la organización [5].

En la figura 1.2 se muestra un esquema de cómo ha evolucionado lo que se mide y cómo se administra una organización. Se aprecia cómo se parte desde el reporte financiero, pasando por medir la calidad y la no calidad en la empresa, hasta utilizar la calidad como un factor clave en la administración del valor para el cliente [5].

La última etapa que refleja la figura 1.2 consiste en enfocar la empresa al mercado. Para ello, además de basarse en el reporte financiero y los criterios de conformidad de las diferentes operaciones, es necesario tomar en cuenta la evaluación de los clientes propios, los clientes de los competidores y, en general, se requiere preguntar al mercado cómo percibe a la empresa [5].

En la figura 1.3 se ve que además del reporte financiero para los accionistas, la satisfacción del cliente y el desempeño de las operaciones. Es necesario incorporar dos guías clave más: satisfacción y desarrollo de los empleados, y asociación con proveedores. Así, el éxito de una organización se debe procurar desde la selección de proveedores y el seguimiento de lo que sucede en el proceso de éstos (que es la primera parte del proceso de la empresa), para continuar con lo que pasa con los empleados de la empresa (ningún éxito duradero se puede fincar en estos tiempos en empleados insatisfechos, atemorizados y que no estén desarrollándose como personas y como empleados) [5].

La siguiente guía es proporcionada por la calidad de los resultados operacionales (evaluaciones de calidad, productividad, etc.). Estas tres guías se reflejan y retroalimentan con la cuarta guía: la satisfacción del cliente. Por último, la quinta guía son los resultados para el accionista, que es en gran parte la consecuencia del resto de las guías [5].

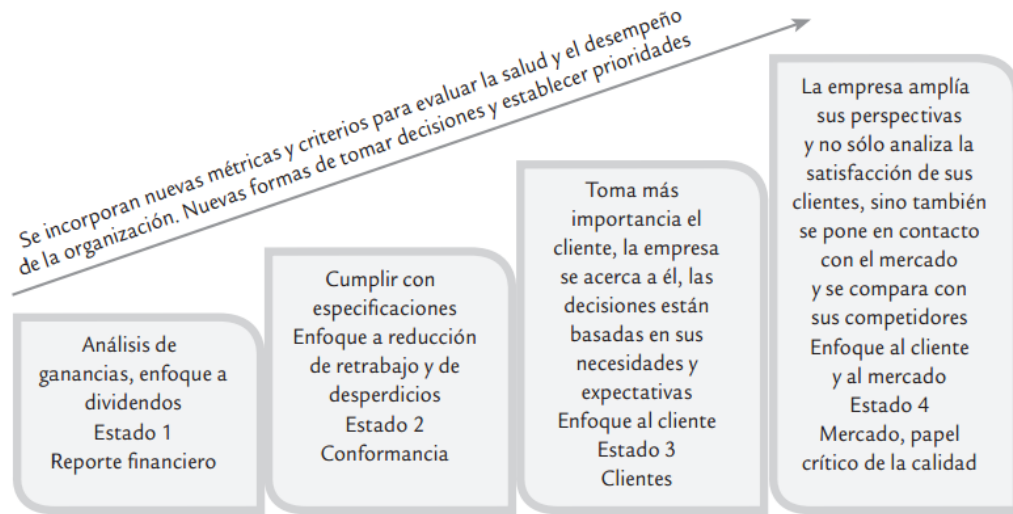


Figura 1.2 Evolución de los criterios para determinar el desempeño de la empresa, cada nuevo estado incorpora los anteriores criterios y agrega otros más [5].

A partir de la figura 1.3 se observa que el reporte financiero llega demasiado tarde como para fundamentar la dirección de una organización sólo con esta guía. Es necesario ir hacia atrás y obtener indicadores que reflejen en forma más preventiva la salud de la empresa.

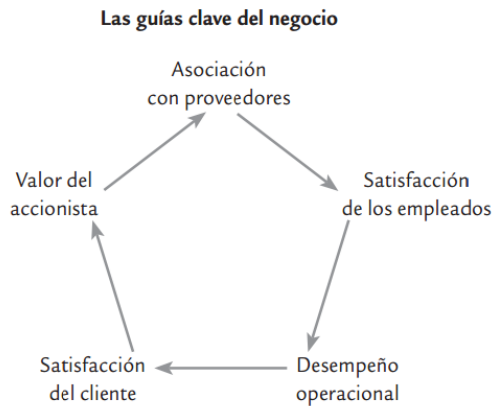


Figura 1.3 Medición del desempeño de una organización [5].

Es importante que los datos de cualquier indicador clave sean realistas, mensurables, procesables, fiables, de rápida actualización y de fácil acceso a quienes lo requieren. Una de las características de la estrategia Seis Sigma es promover la cultura de usar datos para tomar decisiones y para guiar la organización, lo que implica reconocer la variabilidad y fomentar el pensamiento estadístico.

## 1.2 Proyecto de mejora continua en la empresa.

La empresa en donde se desarrolló el presente trabajo es líder en la producción de papel y empaques en México, con un alto grado de compromiso y enfoque hacia sus clientes, colaboradores, inversionistas, el medio ambiente y el país, en el cual a lo largo de más de 60 años se han posicionado como una de las empresas más importantes de la industria del papel y empaque.

Se compone de 15 plantas y una fuerza laboral de más de 7,000 empleados. Gracias a su enfoque multiplantas ofrecen soluciones integrales de empaque y embalaje. Se especializan en la producción de papel para empaque y cartoncillo recubierto 100% reciclado, cajas de cartón corrugado, cajas de fibra sólida, cajas plegadizas, cajas pre-impresas, cajas micro corrugadas y laminadas; así como un portafolio de servicios que apoyan en la manufactura de estos productos. Sus procesos certificados y estándares internacionales les permiten ofrecer productos y servicios de la más alta calidad, basados en una integración vertical que va desde la producción de papel de fibras 100 % recicladas hasta la creación de insumos y herramientas que contribuyen a la fabricación de su producto final.

Esta es una empresa que ha implementado su propio Sistema de Gestión Integral. El cual es una herramienta para controlar su sistema de gestión, en materia de Seguridad y Salud de los Trabajadores, Calidad, Medio Ambiente y Seguridad Alimentaria, basándose en los requisitos de las normas OSHAS 18001, ISO 9001, ISO 14001 y FSSC 22000.



*Figura 1.4 Planta de papel en una de las instalaciones de la empresa. [25]*

La OSHAS 18001 es una norma internacional que establece los requisitos mínimos para las mejoras en prácticas de salud y seguridad ocupacional. Por su parte, la norma ISO 9001 es una norma internacional que establece los requisitos para los sistemas de gestión de calidad. La norma ISO 14001 es de carácter internacional y especifica un marco de gestión con el cual las organizaciones pueden

proteger el medio ambiente. La FSSC 22000 es un programa de certificación para los sistemas de seguridad alimentaria, así como materiales para el empaqueo de alimentos.

Como parte de su estrategia empresarial los directivos de la compañía buscan implementar un sistema de mejora continua Seis Sigma, el cual ha sido puesto en práctica en otras empresas de renombre y ha dado excelentes resultados gracias a sus potentes herramientas de análisis estadístico y evaluación de control de procesos. Para lograr el cometido se ha formado un grupo dedicado especialmente a la evaluación técnica de las capacidades de la cadena productiva, desde logística, producción, calidad y ventas. Tomando como referencia indicadores claves del negocio (Figura 1.5).

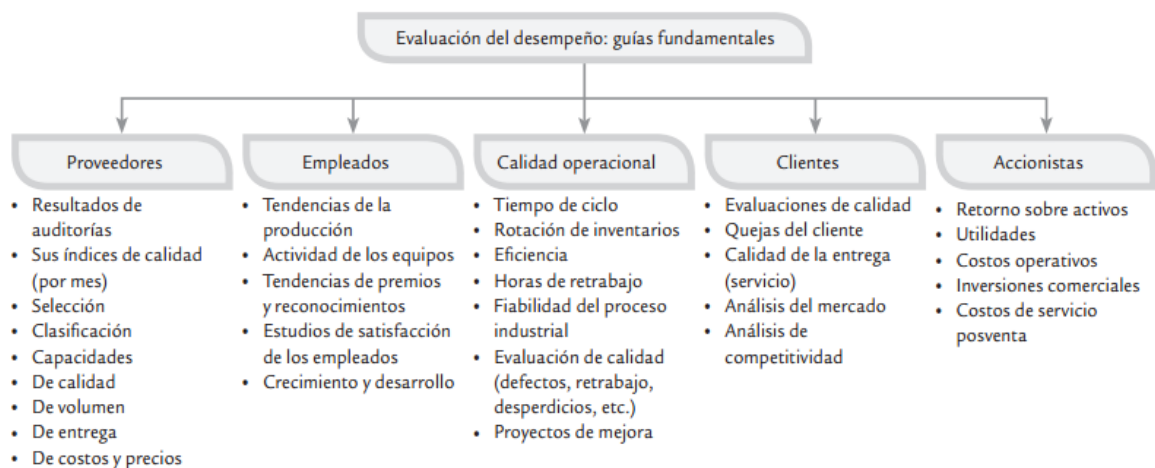


Figura 1.5 Algunos indicadores clave del negocio [3].

Cuenta con novedosos sistemas de impresión que, aunados a la alta tecnología, permiten ofrecer un mejor producto a nuestros clientes. En empaque flexible garantiza uno de los tiempos de entrega más rápidos del mercado. La empresa está certificada en ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, OHSAS 18001:2007 e Industria Limpia.

### 1.3 Estrategia corporativa y recursos de implementación; política integral y pirámide documental.

Para dar cumplimiento a los requisitos de las normas anteriormente mencionadas, en la empresa están comprometidos con la generación de valor, la protección del medio ambiente, la prevención de riesgos de trabajo, la inocuidad de los productos que lo requieran y la mejora continua de sus procesos para la fabricación de sus productos de papel y empaque; estos puntos constituyen la política integral de

la empresa. Lo anterior para la satisfacción de sus clientes y comunidad, garantizando el cumplimiento de los requisitos aplicables.

Para medir el cumplimiento de su política integral, se han establecido los siguientes objetivos integrales:

- a) Mejorar continuamente la satisfacción de sus clientes.
- b) Mejora continua de sus procesos y productos.
- c) Optimizar consumos de recursos naturales e insumos, así como el manejo de residuos.
- d) Disminuir los riesgos de trabajo.
- e) Controlar las situaciones de riesgo que podrían afectar la inocuidad en sus productos.

Estos objetivos, que son generales, cuentan con indicadores de desempeño; mediante los cuales monitorean la eficacia de cada uno de los procesos de la organización.

La pirámide documental son todos aquellos documentos que conforman el Sistema de Administración Integral (SAI), tienen un enfoque de procesos y están estructurados de la siguiente forma:

*Sistema.* Es la representación más general de la Organización en el cual se representan los procesos.

*Proceso.* Es el despliegue de los procesos de la organización

*Procedimientos.* Este nivel establece las responsabilidades y las actividades de cada participante.

*Instrucciones.* En este nivel es donde se describe la operación de la organización de forma detallada.

La pirámide documental permite conocer en detalle todos los procedimientos que existen en la empresa a lo largo de la cadena de valor y permite conocer a los trabajadores cual es el motor para que la misma siga generando riqueza.

Con estos puntos anteriormente mencionados se puede pensar que la implementación de un sistema de mejora continua es algo complejo, costoso y tardado; y de hecho lo es, debido a que se requiere de un alto grado de organización y control de los activos de la empresa. Sin embargo, cuando se tiene un grupo de trabajo con experiencia y deseos de mejorar, la implementación del sistema se puede lograr en menor tiempo y con recursos limitados, el elemento clave es la información.

La materia prima para poder implementar un sistema de mejora continua es la información. La información constituye un aspecto importante dentro de la administración de la empresa y un “activo”, que genera poder, para la toma de decisiones acertadas.

Con ella se pueden entender las condiciones presentes y futuras de la empresa; como se ha desarrollado a lo largo del tiempo, sus fortalezas y debilidades, sus capacidades de crecimiento, etc.

Pero aún más importante es saber la calidad de la información con la que se cuenta, es decir, el grado de confianza con la que un jefe de área o un gerente puede hacer uso de la información generada por toda la organización; para la toma de decisiones acertadas desde el punto de vista empresarial.

Cabe señalar que la información que genera la organización debe de tener como fuente los múltiples departamentos que están involucrados en la cadena productiva, tales como logística, proceso, calidad, ventas, recursos humanos, investigación y desarrollo, etc. ya que la participación de todos ellos propicia el análisis de la causa-raíz de diversos factores que afectan a toda la cadena productiva. Por lo tanto, permite ver a los demás departamentos, que sus fallos pueden tener serias consecuencias en el negocio. Por ejemplo, el envío de un lote a un cliente con un defecto crítico en el producto implica una serie de problemas directos con el departamento de ventas, que a su vez puede impactar en la logística; quizás ese fallo se pudo haber evitado si el departamento de producción y calidad hubieran detectado el problema a tiempo haciendo uso de algún control operacional para mitigar o reducir el defecto.



*Figura 1.6 Trabajadores y gerentes analizando información. [25]*

Cualquier intento de mejora continua tiene que considerar todos los aspectos anteriormente mencionados, sin embargo, se debe de centrar específicamente en el núcleo de la riqueza: la producción. El monitoreo y la generación de información en el proceso de fabricación del producto debe de ser considerado un punto clave del negocio y también debe de ser gestionado con contundencia, apoyándose del departamento de calidad para un mejor control del mismo. En el siguiente capítulo se describe la relevancia del sistema de medición enfocado al proceso, la confiabilidad de la información y la aplicación del pensamiento estadístico al proceso de producción de la empresa.

## 2

## Proceso, sistema de medición y pensamiento estadístico.

Para implementar un sistema de mejora continua es importante definir la capacidad del proceso y la variabilidad de este. Esto se realiza a partir de la evaluación cuantitativa de los diferentes atributos y variables del producto terminado a través de un sistema de medición. La evaluación de los atributos indica la variabilidad que existe en el proceso de fabricación, así como de los posibles defectos de la materia prima que pueden llegar a afectar al producto que se desea obtener. Esta medición representa una herramienta muy útil porque mide el grado de eficiencia y analiza las posibles causas que afectan de manera negativa la fabricación del producto con las especificaciones de calidad deseadas.

### 2.1 Proceso

Para tener un mejor contexto se describe en este apartado el proceso de fabricación de los diferentes productos de forma general. Como ya se mencionó anteriormente la empresa fabrica diferentes tipos de plegadizos y cajas corrugadas, para el almacenaje y transportación de los productos que ofrecen sus clientes.

En la planta se enfocan principalmente en ofrecer soluciones de embalaje para dos empresas cerveceras a nivel nacional, principalmente embalaje plegadizo como lo son las “fajillas” y



“canastillas”, además de cajas corrugadas. También se fabrican este tipo de productos para empresas del sector alimentario.

Los plegadizos son piezas regulares troqueladas, dobladas y engomadas (pegadas con adhesivo) hechas de un solo tipo de papel. Son piezas que tienen como objetivo proteger el producto que el cliente piensa distribuir en sus puntos de venta.



Figura 2.1. a) Ejemplo de un plegadizo tipo “canastilla”, b) Ejemplo de una caja corrugada. [26]

Las cajas corrugadas son piezas troqueladas y dobladas hechas de diferentes tipos de papel empalmado y corrugado. Las cajas son elaboradas con el procesamiento de tres papeles, que pueden ser de tipo Liner, Medium o Couché dependiendo de las especificaciones y las necesidades del cliente. Las cajas corrugadas tienen como finalidad la transportación de mercancías en gran volumen y están diseñadas para soportar varios kilos de peso en estibas consecutivas, ver figura 2.1 b. Otro tipo de caja es la caja fibra, la cual está fabricada a partir de uno o dos tipos de papel, que poseen la flexibilidad de los plegadizos y la resistencia de las cajas corrugadas. Las cajas fibra principalmente son elaboradas para la transportación de latas de cerveza, que son más económicas de fabricar que una caja corrugada.

El proceso de fabricación de estos productos se puede resumir en cinco operaciones generales, las cuales son impresión, corrugado, laminado, troquelado, doblado y engomado. Estas operaciones pueden ser utilizadas en su totalidad en la fabricación de algunos productos, mientras que para otros solo es necesario hacer uso de unas cuantas. En la figura 2.2 y 2.3 se muestra el proceso de fabricación de forma general para los plegadizos y cajas corrugadas respectivamente.

Para la fabricación de todos estos productos se utilizan diversos tipos de papel, con diferentes características y orígenes. La empresa está consciente y totalmente comprometida con el cuidado del

medio ambiente, por lo tanto, hacen uso de papel de fibras recicladas en mayor porcentaje que de papel de fibra virgen como materia prima.

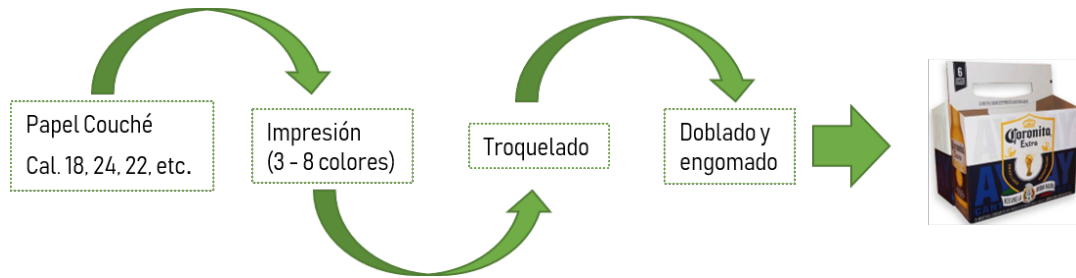


Figura 2.2. Proceso de fabricación de producto plegadizo tipo “canastilla”. [26]

Es así que, los dos tipos de materia prima se clasifican de forma general en papel de fibra virgen y papel de fibra reciclada. Estos dos tipos de papel tienen diferentes características entre sí, por ejemplo, el papel de fibra virgen tiene mucho mayor resistencia a la ruptura, la humedad y mayor blancura mientras que el papel reciclado tiene más limitaciones en estos aspectos, sin embargo, su principal ventaja es su insuperable relación costo-beneficio y que es amigable con el medio ambiente, pues reduce la cantidad de árboles talados para la producción de celulosas.

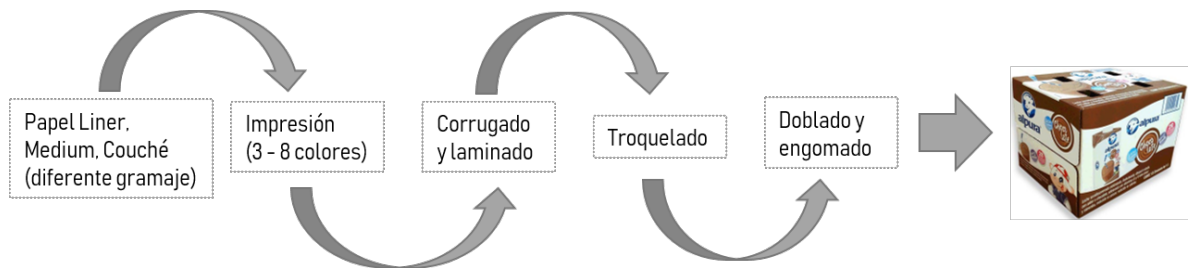


Figura 2.3 Proceso de fabricación de caja corrugada. [26]

Se utilizan principalmente tres tipos de papel tanto de fibras recicladas como de fibras vírgenes. Los principales papeles de fibra reciclada son Liner, Medium, y Couché; mientras que de fibra virgen únicamente papel Couché. Los papeles reciclados son principalmente usados para hacer el corrugado, que básicamente representa la estructura total de la caja, es decir se utiliza para fabricar lo que se denomina “flautilla”; mientras que el papel virgen se utiliza mayormente para realizar impresión de alta calidad, debido a su blancura, por lo que se utiliza principalmente en las caras exteriores de las cajas.

La “flautilla” es la estructura que se forma en medio de las caras de los papeles exteriores e interiores, en la figura 2.4 se muestra un ejemplo de esta. Esta se forma en una máquina que se le conoce como

“corrugadora”, que por medio de calor y una preparación de almidón como adhesivo contra las caras exteriores del papel, se forma el característico cartón ondulado que podemos observar en las cajas.

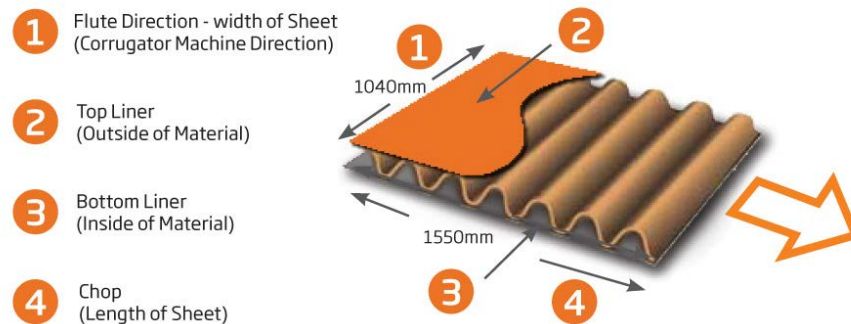


Figura 2.4 Estructura interna de la “flauta” o “flautilla”. [25]

Para la fabricación de esta estructura principalmente se usa papel Medium, un papel de fibra reciclada, que con acción del calor y el adhesivo se forma esta superficie ondulada muy resistente. El corrugado es el responsable que permite que las cajas soporten varios kilos de peso. Existen diferentes tipos y configuraciones de corrugado, generalmente son especificaciones que el cliente determina en función de las necesidades de carga de la caja, así como el número de estibas que el cliente piensa usar para el transporte de sus productos.

Así mismo también existen diferentes tipos de “flautillas”, generalmente el tipo de “flautilla” proporciona la resistencia de la caja. Ver figura 2.5

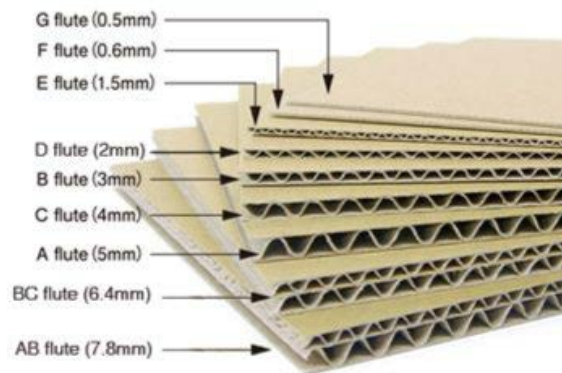


Figura 2.5 Tipos de “flauta” o “flautillas” que son utilizadas en las cajas. [25]

Como se puede observar en la figura 2.5 los distintos tipos de “flauta” se clasifican en función de la longitud de “ondulación” en milímetros, designando para cada longitud una letra. Generalmente en la industria se usan todos los tipos de “flautas”, ya que los clientes especifican la resistencia que sus cajas desean alcanzar. También se pueden usar doble o hasta triple “flauta” de un mismo tipo o la

combinación de ellas para alcanzar más resistencia, por lo que no será raro encontrar cajas o empaques con doble ondulación en el centro.

## 2.2 Variables del Proceso

Existen diversas variables que se manifiestan en el proceso de fabricación de los productos, generalmente se tratan de propiedades físico-químicas de las materias primas o de los insumos que se utilizan para la fabricación. Sin embargo, existen también variables relacionadas con la maquinaria u operadores, que pueden llegar a afectar el proceso de fabricación y la calidad, que no se deben de despreciar por completo. Generalmente son el desgaste de piezas mecánicas o cambio de personal, estas últimas variables no tienen un impacto tan significativo en la variabilidad del proceso debido a que son poco frecuentes y generalmente se tienen controles operacionales que ayudan a controlar dichas variables.



*Figura 2.6 Rodillos de máquina laminadora, utilizado para la elaboración del corrugado. [26]*

Este trabajo se enfocó en las variables más representativas que afectan de forma recurrente e importante en el proceso y la calidad de los productos. Principalmente las variables que se analizan con mayor frecuencia en el laboratorio son aquellos relacionados con las bobinas de papel, que es la

principal materia prima de la cadena productiva y es en donde se encuentran las variables que más afectación provocan en el proceso.

También se realizan análisis de laboratorio para las propiedades físicas y químicas de otras materias primas, como adhesivo, almidón, cinta de refuerzo, etc. pero que, sin embargo, no serán abordadas en este trabajo debido a que resultaría extenso tratar cada una de ellas.

Se definen bobinas a los rollos de diferentes tipos de papel (Medium, Liner, Couche) que están tensados en diámetros grandes. Por lo general llegan a pesar entre 1000 y 2000 kg, tienen anchos de bobina de hasta 42 pulgadas y pueden tener diferentes tipos de acabados. Ver figura 2.7.



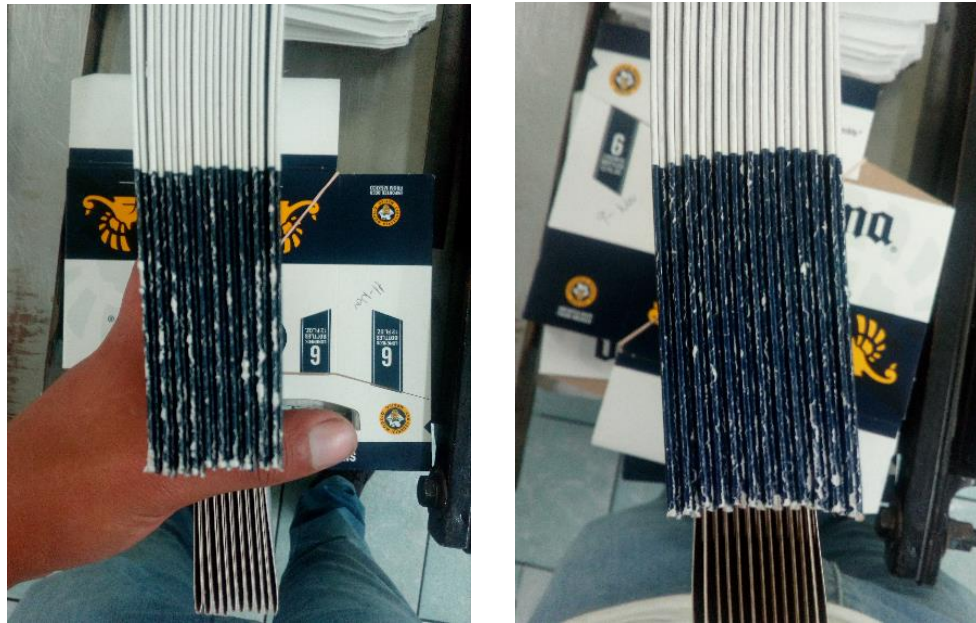
*Figura 2.7 Bobina de papel tipo couche en una banda transportadora. [25]*

### 2.2.1 Calibre

El calibre se define como el espesor de la lámina de papel a lo largo de la bobina, el cual no es homogéneo. El calibre es uno de los principales factores por las que pueden existir mermas (desperdicio de material) durante el proceso de fabricación. Ya que pueden ocurrir defectos como la falta de corte en el proceso de troquelado o el “crackeo”, ver figura 2.8, en los hendididos del dobléz de la plantilla.

El primero ocurre debido a que el espesor es alto o bajo, es decir grueso o delgado, y los troqueles se configuran para cortar una lámina de papel de un espesor específico, cuando el papel tiene un espesor superior o inferior al especificado provoca que el troquel no corte correctamente la pieza, lo que provoca merma y tiempo muerto por re-trabajo. Algunas veces la falta de corte llega a hacer un defecto crítico.

El “crakeo”, por otra parte, es un defecto crítico que solo se presenta en el papel tipo Couche, consiste principalmente en la ruptura del estucado del papel; el estucado es una capa delgada a base de sustancias esmaltantes y colorantes, que ofrecen un acabado lustroso y blanco, ver figura 2.8. Cuando el calibre es muy alto y se procesa en las máquinas de doblado, el estucado se quiebra y la tinta se cae, lo que provoca un defecto en la impresión que es difícil de corregir.



*Figura 2.8 Ejemplos de “crackeo” en plegadizos tipo canastilla. [26]*

Debido a lo anterior, el calibre es una de las variables más críticas dentro del proceso de fabricación de las piezas, es por eso que el laboratorio de calidad realiza la medición del espesor por medio de un micrómetro tipo “L&W Micrometer” especial para la industria del papel, ver figura 2.9.

### 2.2.2 Dureza de la bobina

Las bobinas de papel están tensadas en forma de rollo con la finalidad de que sean fácilmente procesados por la maquinaria. Sin embargo, muchas veces la dureza no es homogénea a lo ancho de la bobina y esto provoca un defecto llamado “orilla floja”, el cual consiste en la falta de tensión en uno de los lados de la lámina de papel. A su vez, esta deficiencia de tensión provoca atascamiento en la maquinaria o bien defectos de impresión, la cual es llamado “fuera de registro”; el “registro” es un sistema de inspección que tiene la máquina para que no se desfase la marca de impresión. Cuando existe “fuera de registro” el contorno de las imágenes impresas en las piezas es desfasada y da la

aparición de una imagen borrosa o sin contorno. La dureza es analizada con un instrumento llamado esclerómetro, ver figura 2.9, que generalmente es utilizado en la construcción para medir propiedades mecánicas del concreto, este instrumento mide indirectamente la tensión del rollo, usando la resistencia a la compresión en  $N/mm^2$ .

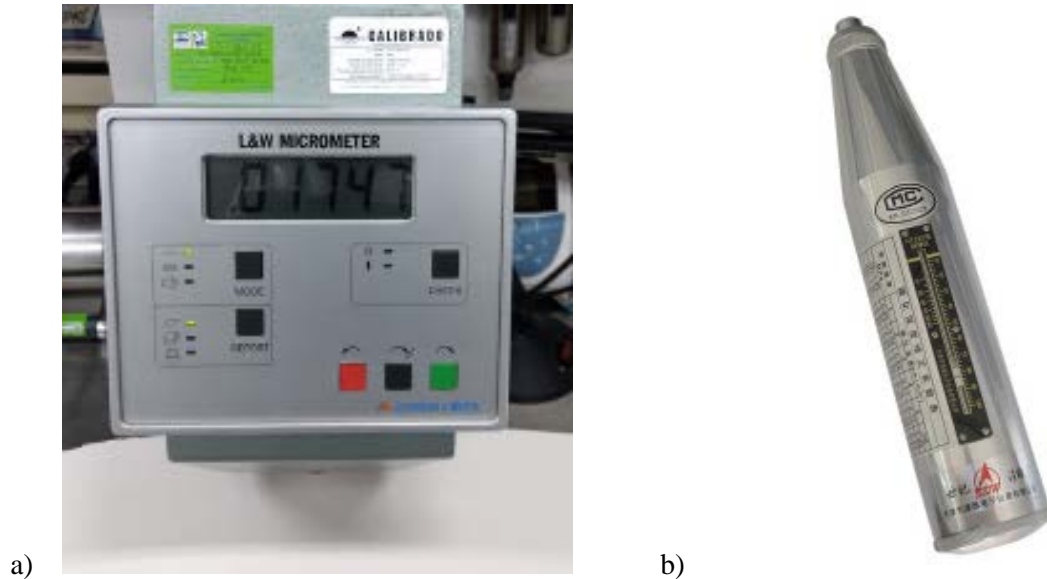
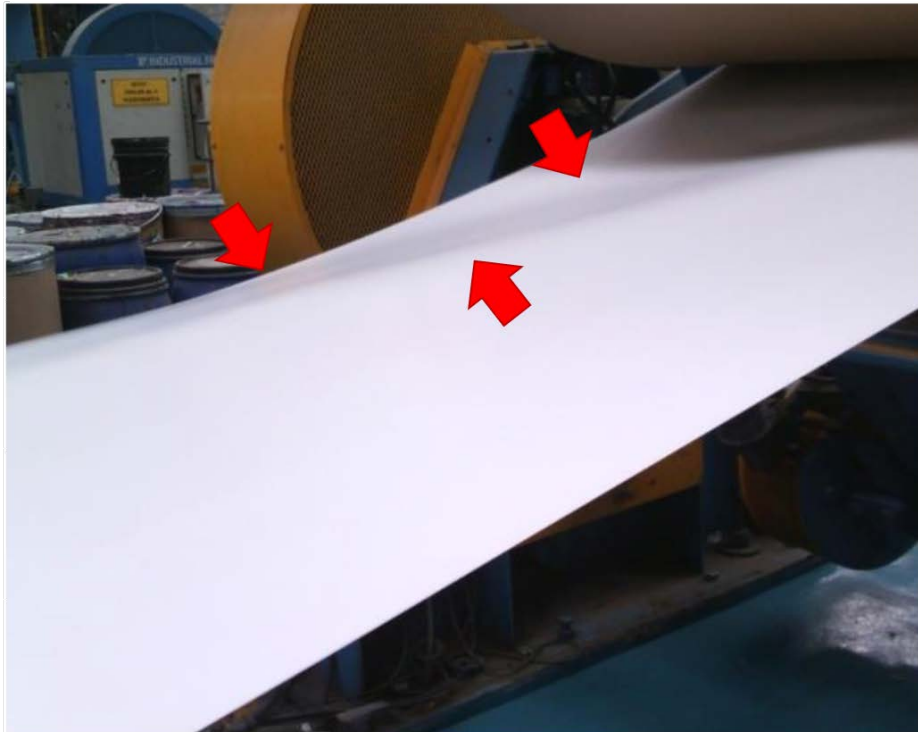


Figura 2.9 a) Micrómetro, midiendo calibre. b) Esclerómetro. [26]

### 2.2.3 Humedad

La humedad está presente en casi todos los procesos químicos de la industria y no es la excepción en la del papel, durante el proceso de fabricación del papel se utiliza vapor de agua, que, por lo general, las moléculas de agua se condensan y quedan atrapadas entre las fibras del papel. La humedad puede provocar problemas de “combado”, que consiste en un doblez curvo que representa un problema para el proceso de doblado y engomado de las piezas; además puede provocar fuera de registro y atasques en el troquel de la maquinaria, ver figura 2.10. En el laboratorio generalmente siempre se determina la humedad con una termobalanza, que calculan la humedad de los productos, mediante la pérdida de peso que sufre una muestra, después de ser sometida al proceso de calentamiento efectuado por la balanza.

Existen otros ensayos de laboratorio que evalúan otras propiedades del material, pero que generalmente sus variaciones no impactan significativamente en el proceso de fabricación. Sin embargo, es necesario realizar estas pruebas ya que ayudan a realizar la gestión de rechazo de lotes que provienen con defectos del proveedor. Por ejemplo, si un lote de bobinas de papel tipo Couche de 18.5 pts. posee blancura o lisura por debajo de la especificación, se realiza una “No Conformidad”, en la cual se mencionan los ensayos de laboratorio y los valores de los resultados que justifican el rechazo del material.



*Figura 2.10 Franja húmeda en una bobina de papel tipo couche. [26]*

#### 2.2.4 Integrity Test

El Integrity Test es una prueba de integridad mecánica, el cual consiste en aplicar un esfuerzo normal a las partes que estarán sujetas a deformaciones por estrés mecánico, como pueden ser las asas, los candados de seguridad de los fondos de las canastillas o cajas corrugadas y los pliegues laterales. Ver figura 2.11.



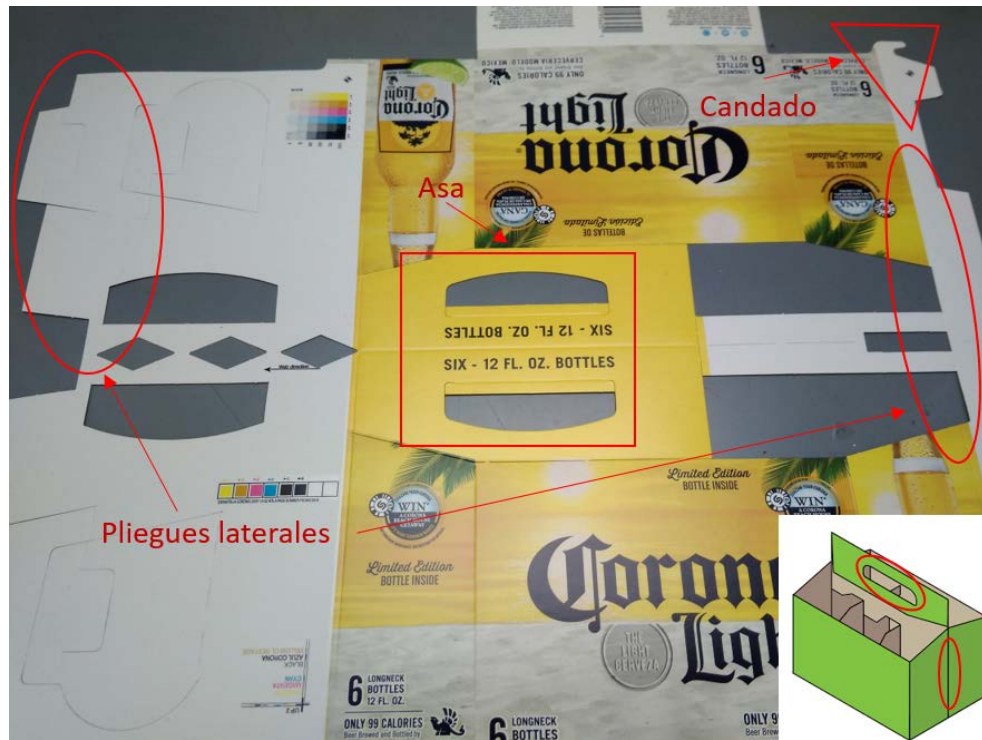


Figura 2.11 Estructurales donde se aplica los esfuerzos. [26]

Esta prueba se realiza con la ayuda de una maquina universal de ensayos, la cual aplica un esfuerzo de tracción normal con el propósito de estirar el material y medir su resistencia, figura 5.12.



Figura 2.12 Máquina Universal Instron. [26]

Esta medición se cuantifica en newton (N) y es de gran ayuda para estimar la resistencia de las canastillas, las cajas fibra o las cajas corrugadas. Esta prueba es destructiva y es un control bastante importante, debido a que es una prueba que se aplica a los productos finales que están listos para ser enviados a los clientes. Cada producto tiene una especificación de resistencia a la tracción específica, las cajas fibra tienen una muy buena capacidad de carga y resistencia, al igual que algunas cajas corrugadas y canastillas. El objetivo de los productos que fabrica la empresa es resguardar la carga mientras son transportados por el usuario intermedio o final, que pueden ser, botellas de cerveza, envases de cartón o plástico, por lo que es prioritario asegurar que los productos cumplan con los criterios de calidad especificados. Por lo general el esfuerzo que deben soportar la mayoría de los productos es de 25 N como mínimo. En la figura 2.13 se puede apreciar la prueba efectuada en una caja fibra.



Figura 2.13 Prueba de Integrity Test en una caja fibra. [26]

## 2.2.5 Otras variables

Existen otros ensayos de laboratorio que evalúan otras propiedades del material, pero que generalmente sus variaciones no impactan significativamente en el proceso de fabricación. Sin embargo, es necesario realizar estas pruebas ya que ayudan a realizar la gestión de rechazo de lotes que provienen con defectos del proveedor. Esto ayuda a la empresa a tener un control de la materia prima que ingresa al proceso y también le da retroalimentación al proveedor para un mejor control de sus estándares de calidad.

Entre los ensayos de laboratorio que aplican al papel son los siguientes:

Tabla 2.1 Lista de ensayos de variables que afectan al proceso. [26]

Ensayo	Descripción
<b>Peso Base</b>	El peso base es una prueba de laboratorio que se utiliza para determinar el gramaje del papel, esto ayuda a determinar indirectamente el espesor y se expresa en unidades de masa por unidad de área (g/m <sup>2</sup> ).
<b>Calibre</b>	La prueba de calibre consiste en medir el espesor de la lámina de papel. Generalmente el calibre está especificado en puntos (pts.), que equivalen a milésimas de pulgada. Por ejemplo, un papel tipo Kraft de 7 pts. equivale a 7 milésimas de pulgada de espesor.
<b>Humedad</b>	La prueba de humedad se realiza por medio de un análisis gravimétrico simple, y calcula el porcentaje de agua en peso que contiene el papel.
<b>Lisura</b>	La prueba de lisura determina la uniformidad de la superficie de un papel, totalmente plana, sin irregularidades, es decir un acabado liso o satinado, combina características que son percibidas por la vista y el tacto. Esta propiedad tiene que ver con el proceso de fabricación del papel, las fibras cortas producen un papel más liso que las fibras largas. Se mide en unidades USH (Unidades Sheffield). La lisura está relacionada con la adherencia de la tinta a la superficie.
<b>Porosidad</b>	El papel es un material muy poroso en el que un porcentaje está compuesto de aire, en los papeles más compactos el aire va del 15 al 35% y de un 60 a un 70 % en papeles más voluminosos. Los papeles con fibras largas producen papeles más porosos, mientras que las fibras cortas se compactan más dejando menos espacio para aire, lo que produce papeles menos porosos. Los papeles sin recubrir tienen una porosidad media, en estos papeles las tintas de impresión se absorben y penetran más en los poros, llegando así a las fibras. Las tintas lucen más opacas, también la aplicación de adhesivos u otro recubrimiento no puede ser bien aplicada. Los papeles recubiertos (estucados) son poco porosos, ya que este tratamiento tiene el propósito de crear una capa que sea apta para recibir tintas de impresión en la superficie. Las tintas penetran en la superficie, pero en espacios mucho más pequeños y el efecto es distinto ya que las tintas no son absorbidas por las fibras del papel, los pigmentos se quedan más concentradas en la superficie, produciendo colores más brillantes. La porosidad se mide en UG (Unidades Gurley).
<b>Rasgado</b>	El rasgado es un ensayo que evalúa la tendencia a la ruptura, una vez que exista un ligero corte el papel. Esta prueba se realiza en función de la trayectoria de las fibras del papel, que puede ser dirección maquina (vertical con respecto a la vista del observador) o dirección contra-maquina (horizontal con respecto a la vista del observador). Se mide en gf (gramos fuerza).

<b>Tracción</b>	El ensayo de tracción consiste en someter a un esfuerzo normal una muestra de papel, que generalmente es rectangular, con el propósito de romperla. Esta prueba mide la resistencia del papel cuando se le aplican esfuerzos, siempre se debe de realizar en dirección máquina y contra-máquina.
<b>COBB</b>	La prueba COBB estima un coeficiente de absorción, permite medir la capacidad de absorción del recubrimiento (estucado) para el papel Couche o del papel liner. Es útil para conocer la resistencia para absorber agua u otras sustancias químicas. Ya que como sabemos las cajas o plegadizos están expuestos a estos tipos de sustancias. Se mide en g/m <sup>2</sup> .

Las pruebas listadas en la anterior tabla son puramente cuantitativas, sin embargo, también se utilizan otras pruebas de tipo cualitativas, tales como el “Glue Bond” o la prueba de “Ceras”. Estas últimas están relacionadas con evaluar el comportamiento del adhesivo en el papel. Para la ejecución de las pruebas se usan como referencia unidades de tiempo (s), pero el grado de adherencia se evalúa de forma visual.

Para determinar la variabilidad de estas propiedades se hace uso del equipo e instrumentos del laboratorio de calidad, mediante ensayos de laboratorio estandarizados en base a las normas TAPPI. Las normas TAPPI forman parte de las normas ASTM, pero están enfocadas a la industria del papel. En los ensayos se evalúan los atributos que deben de cumplir las especificaciones que el proveedor garantiza. Con base en los ensayos se determina si los lotes de materia prima cumplen con las especificaciones de calidad necesarias para el procesamiento o de lo contrario se segregan y rechazan, debido a defectos de fabricación.

Para llevar a cabo lo anterior, el área de calidad tiene procedimientos establecidos en el Sistema de Administración Integral (SAI) de la empresa. Son procedimientos administrativos que tienen como propósito la formalidad del rechazo o aceptación de los lotes que el proveedor envía y que sus particularidades no se tratarán en este trabajo, debido a que quedan ajenos a los objetivos planteados; su carácter documental solo será usado como referencia.

## 2.3 Sistema de medición y pensamiento estadístico

Como se trató en el capítulo 1, para obtener información confiable que apoye en la toma de decisiones, se debe de contar con un sistema de medición y además evaluar su desempeño. De esta forma aseguramos que la información generada describe lo que sucede en la realidad, por lo que gerentes y jefes de área tienen más seguridad en la toma de decisiones.

Un sistema de medición es el proceso completo para obtener medidas, es decir, es el conjunto de instrumentos, indicadores, normas, operaciones, métodos, herramental, software, personal, ambiente y suposiciones, usadas para cuantificar las unidades de medición o la evaluación de la característica, atributo o variable que se mide. [1]

Es frecuente que al realizar una medición a cierta variable se esté tentado a creer ciegamente en los números que se generan, sin detenerse a cuestionar su calidad, y sin preguntarse cuál es el posible error que ese número trae consigo. Esta creencia no es correcta, puesto que, si las mediciones tienen un error grande, los datos obtenidos son engañosos y las decisiones que de ahí se deriven pueden ser incorrectas. Por ejemplo, uno de los efectos más inmediatos de las malas mediciones es que puede ocurrir que un artículo considerado defectuoso sea en realidad bueno, o que uno considerado bueno sea en realidad defectuoso. Esto se debe en gran parte al fenómeno de variabilidad. [4]

La variabilidad se refiere a la diversidad de resultados de una variable o de un proceso, por lo general en todas las industrias, a pesar de que existe un mismo patrón de trabajo o de procesamiento de la materia prima, siempre que se procesa un material se obtienen resultados diferentes. Es decir, existen una serie de factores que intervienen en la producción, que hacen inviable la obtención de dos lotes con características idénticas de calidad. Parte del objetivo de un sistema de medición es cuantificar esa variabilidad del proceso y buscar soluciones a través de controles operacionales para reducir la variación de la forma más rentable posible. [9]

Reducir la variación de los procesos es un objetivo clave del control de calidad y la mejora continua. Por lo tanto, es necesario entender las causas de la variación, y para ello se parte de que en un proceso (industrial) interactúan materiales, máquinas, mano de obra (gente), mediciones, medio ambiente y métodos. Estos seis elementos (las 6 M) determinan de manera global todo proceso y cada uno aporta algo de la variabilidad y de la calidad de la salida del proceso, como se esquematiza en la figura 1.6. El resultado de todo proceso se debe a la acción conjunta de las 6 M, por lo que, si hay un cambio

significativo en el desempeño del proceso, sea accidental u ocasionado, su razón se encuentra en una o más de las 6 M. [5]

En un proceso, cada una de las 6 M tiene y aporta su propia variación; por ejemplo, los materiales no son idénticos, ni toda la gente tiene las mismas habilidades y entrenamiento. Por ello, será necesario conocer la variación de cada una de las 6 M y buscar reducirla. Pero además es necesario monitorear de manera constante los procesos, ya que a través del tiempo ocurren cambios en las 6 M, como la llegada de un lote de material no adecuado o con características especiales, descuidos u olvidos de la gente, desajustes y desgaste de máquinas y herramientas, etc. Debido a la posibilidad permanente de que ocurran estos cambios y desajustes, es necesario monitorear de manera constante y adecuada diferentes variables, que pueden ir desde características clave de los insumos, las condiciones de operación de los equipos, hasta las variables de salida de los diferentes procesos.

Los puntos anteriormente tratados son los aspectos fundamentales del pensamiento estadístico, que es una filosofía de aprendizaje y acción basada en tres principios: todo el trabajo ocurre en un sistema de procesos interconectados; la variación existe en todos los procesos, entender y reducir la variación son claves para el éxito.

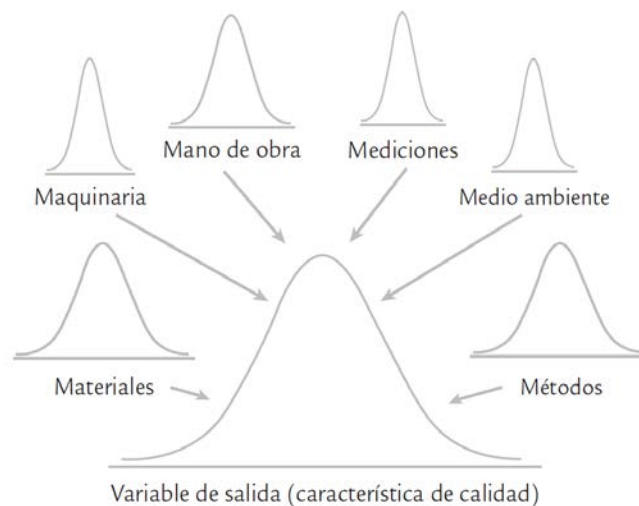


Figura 2.14 Las 6M del proceso. [5]

En el primer principio del pensamiento estadístico se habla de procesos interconectados para enfatizar que los procesos no operan de manera aislada, más bien, interactúan con el resto del sistema. Por lo tanto, si no se toma en cuenta la manera en que se relaciona un proceso con el resto del sistema, la optimización de una de las partes puede tener un efecto desastroso para el resto del sistema.

El segundo principio reconoce que los resultados de todos los procesos son variables. El tercer principio es una de las razones y objetivos principales del sistema de mejora continua: reducir la variabilidad hasta lograr el nivel de calidad Seis Sigma. El gran reto es que la empresa logre profundizar en la filosofía del pensamiento estadístico, ya que eso le ayudará a conocer la realidad (con variación), pero también le permitirá dirigir más adecuadamente sus esfuerzos de mejora. En la figura 2.12 se muestra la forma en que el pensamiento estadístico contribuye en los diferentes niveles de una organización.

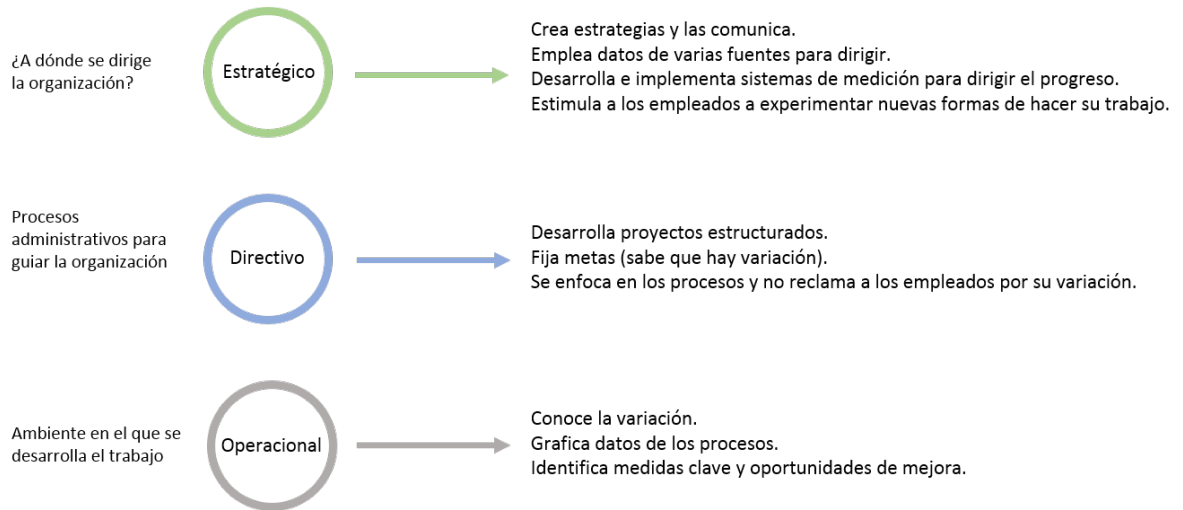


Figura 2.15 Impacto del pensamiento estadístico en la empresa. [5]

Es por esta razón que un estudio de R&R ampliado es necesario para determinar la calidad de la información generada por el laboratorio de calidad y que está relacionada con la fabricación del producto. Aunque existen muchas definiciones por diversos autores, en este trabajo se definirá el estudio R&R ampliado como la aplicación de esta metodología a tres variables claves que comprenden parte importante de la fabricación del producto final y que evalúa de forma global la variación de todo el proceso a lo largo de toda la cadena de valor; estas variables son calibre de papel, dureza de las bobinas y la prueba de Integrity Test. Las dos primeras variables están relacionadas con la calidad de la materia prima y la tercera con la calidad del producto terminado. Cada variable tiene un proceso de medición, que es denominado sistema de medición, por lo tanto, la evaluación de este proceso resulta de interés si se desea utilizar la información que genera para aplicarlo en la mejora continua del producto y la empresa. [2]

Por lo tanto, el estudio R&R ampliado estará conformado por dos estudios R&R largo, para la variable de dureza y calibre; y un estudio R&R para pruebas destructivas conocido como anidado.

## 3

## Marco Teórico

## 3.1 Conceptos básicos

Como ya se planteó, las 6 M determinan de manera global cualquier proceso, esto también se puede representar a través de un diagrama de Ishikawa, lo que se aprecia en el diagrama de la figura 3.1 y 3.2. Así, parte de la variabilidad observada en el producto se debe a la variabilidad de las mediciones y no a la variabilidad propia del producto. De la misma manera, las mediciones se pueden pensar a su vez como el resultado de un proceso, el cual es influido por las 6 M.

Las 6 M influyen a que exista error en las mediciones, por consiguiente, en general los valores medidos son algo diferentes de los valores reales. Cuando se realiza un cálculo con mediciones, los errores en estos, producen un error en el valor calculado. Decimos que el error se propaga de las mediciones al valor calculado. Si se tiene cierto conocimiento con respecto al tamaño de los errores en las mediciones, como puede suceder en la longitud y el ancho de un rectángulo, existen métodos para conocer la magnitud del error en una cantidad calculada como el área.



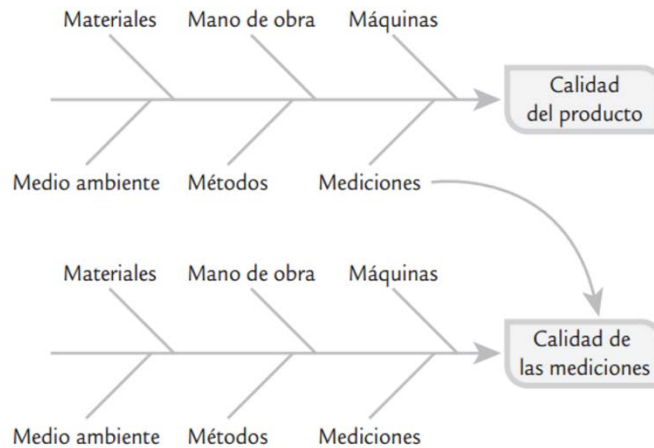


Figura 3.1 Diagrama de Ishikawa que representa las causas de la variabilidad en la medición. [5]

En general, se puede pensar que el error de una medición lo integran el error sistemático, o sesgo, y el error aleatorio. El primero representa la parte del error que es igual para cada medición; el segundo varía entre mediciones y, en promedio, será igual a cero en el largo plazo. Algunas fuentes de error contribuyen con ambos tipos de error, el sesgo y el error aleatorio. Por ejemplo, considere el error de paralaje. Este último constituye la diferencia en la posición evidente de la marca cuando se observa desde ángulos diferentes. La magnitud de este tipo de error en cualquier medición especial depende de la posición del observador con respecto a la escala. Como consecuencia de que la posición variará un poco entre lecturas, el paralaje contribuye al error aleatorio. Si el observador tiende a apoyarse en algo de un lado en vez de otro, el paralaje también contribuirá al sesgo [7]. En la figura 3.2 se observan algunas de las causas más generales para las desviaciones en el sistema de medición. [7, 14]

Cualquier medición se puede considerar como la suma del valor real más las contribuciones de cada uno de los dos componentes del error:

$$\text{Valor medido} = \text{Valor real} + \text{sesgo} + \text{error aleatorio}$$

Puesto que parte del error es aleatorio, es adecuado utilizar un modelo estadístico para estudiar los errores de medición. Se modela cada valor medido como una variable aleatoria, tomada de una población de mediciones posibles. La media  $\mu$  de la población representa esa parte de la medición que es igual para toda medición. Por tanto,  $\mu$  es la suma del valor real más el sesgo. La desviación estándar  $\sigma$  de la población representa la desviación estándar del error aleatorio. Ésta representa la variación debida al hecho de que cada medición tiene un valor diferente por su error aleatorio. Intuitivamente,  $\sigma$  constituye el tamaño de un error aleatorio estándar. [8]

Se tiene interés en dos aspectos del proceso de medición. El primero es su exactitud.

Ésta la determina el sesgo, que es la diferencia entre la media  $\mu$  de la medición y el valor real de esta última. Entre más pequeño sea el sesgo, más exacto será el proceso de medición. Si la media  $\mu$  es igual al valor real, el sesgo será igual a 0; en esta tesitura, al proceso de medición se le llama no sesgado.

El otro aspecto del proceso de medición de interés es la precisión. Ésta constituye el grado con que tienden a coincidir las mediciones repetidas de la misma cantidad. Si las mediciones repetidas resultan cercanas entre sí todo el tiempo, la precisión es alta. Si son muy dispersas, la precisión es baja. Por tanto, la precisión se determina mediante la desviación estándar  $\sigma$  del proceso de medición. Entre más pequeño sea el valor de  $\sigma$ , más preciso será aquél. Con frecuencia ingenieros y científicos se refieren a  $\sigma$  como incertidumbre aleatoria o incertidumbre estadística del proceso de medición. A  $\sigma$  se le puede llamar en forma más simple incertidumbre. [8]

Cuando se notifica un valor medido, es importante reportar una estimación aproximada del sesgo y de la incertidumbre de éste, con la finalidad de describir la exactitud y la precisión de la medición.

En resumen, se puede establecer lo siguiente:

RESUMEN
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un valor medido representa una variable aleatoria con media <math>\mu</math> y desviación estándar <math>\sigma</math>.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El sesgo en el proceso de medición constituye la diferencia entre la media de las mediciones y el valor real:  <div style="text-align: center;"><math display="block">\text{Sesgo} = \mu - \text{valor real}</math></div> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La incertidumbre en el proceso de medición es la desviación estándar <math>\sigma</math>.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entre más pequeño sea el sesgo, más exacto será el proceso de medición.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entre más pequeña sea la incertidumbre, más preciso será el proceso de medición.</li> </ul>

Las posibles causas para un sesgo excesivo son:

- El instrumento necesita calibración
- Instrumento, equipo o dispositivo desgastado
- Master (patrón) dañado o desgastado
- Calibración o uso de un master de ajuste inapropiado
- Instrumento de baja calidad, diseño o conformancia
- Error de linealidad
- Instrumento equivocado para la aplicación

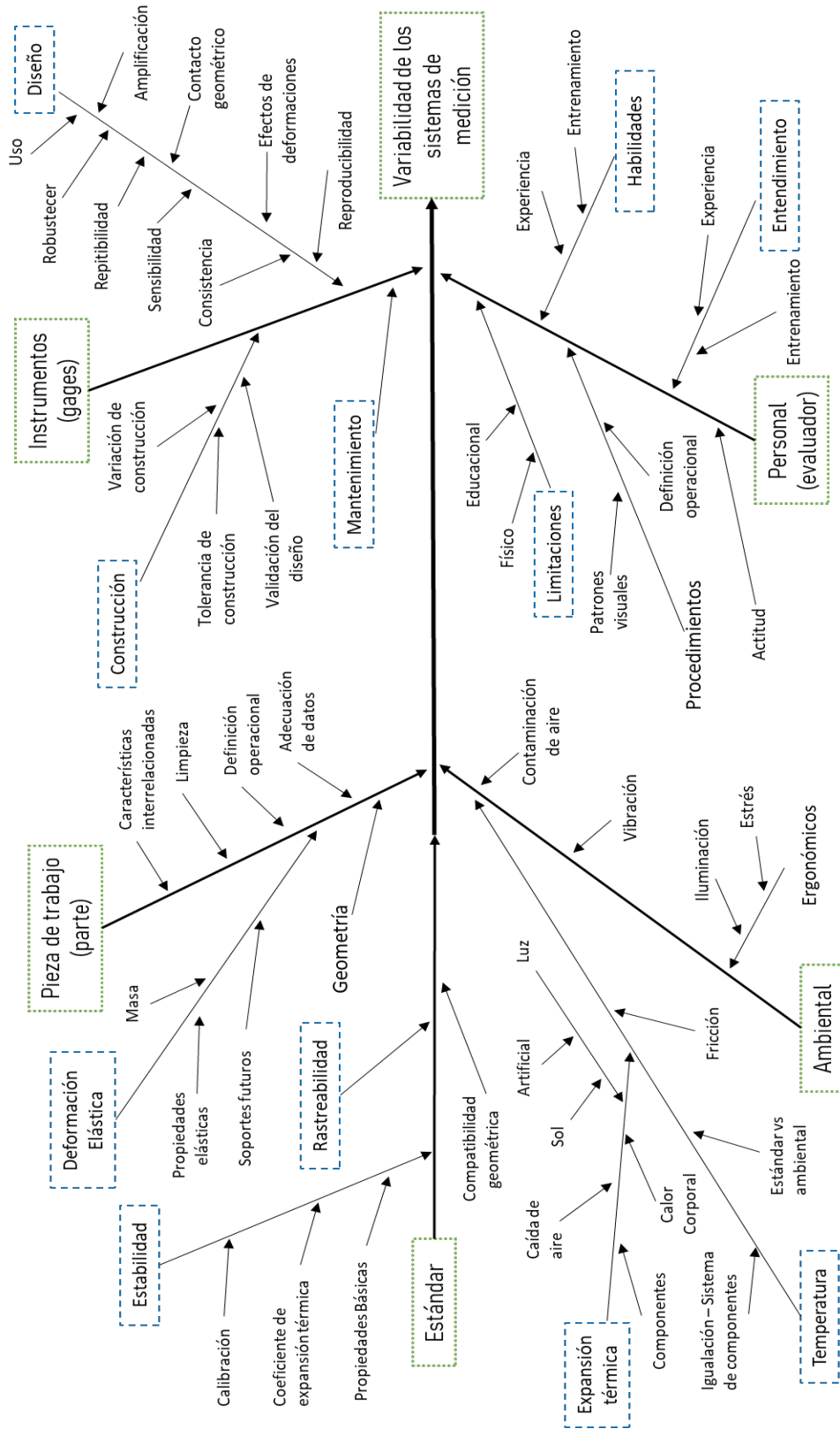


Figura 3.2 Diagrama de Ishikawa que representa las causas de la variabilidad en los sistemas de medición. [26]

- Diferente método de medición, ajuste, carga, sujeción, técnica.
- Medición de característica equivocada
- Distorsión (del instrumento o la parte)
- Medio ambiente (temperatura, humedad, vibración, limpieza)
- Violación a algún supuesto, error en la aplicación de una constante

Debido a lo anterior, el error es una característica casi inherente del proceso de medición. Es por esto que el sistema de medición debe de ser evaluado con una metodología estadística que permita cuantificarlo.

Las diferentes metodologías tienen como punto de partida, la clave de entender, que cualquier proceso de medición genera un error. Por lo tanto, lo que se observa no es exactamente la realidad, más bien es la realidad más un error de medición. Esto se traduce en que la variación total observada en unos datos es el resultado de la variación propia del producto más el error del proceso de medición. Ver figura 3.3.

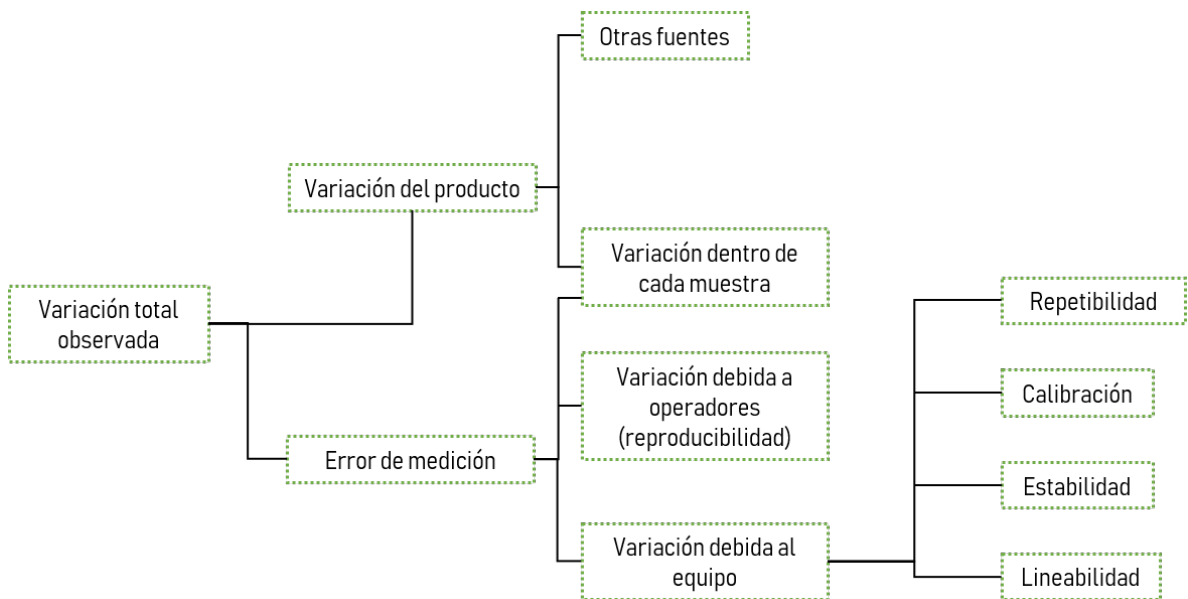


Figura 3.3 Variación total observada en los sistemas de medición. [26]

Esta idea puede ser representada de la siguiente forma:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{prod}^2 + \sigma_{error}^2 \quad (Ecu. 3.1)$$

En particular, las fuentes principales que contribuyen al error del proceso de medición son el equipo de medición, los operadores (reproducibilidad) y la variación dentro de la muestra; la muestra es también comúnmente denominada “parte” en este tipo de estudios. La variabilidad del equipo de medición (instrumento) se divide a su vez en los siguientes componentes:

- Calibración: Que se define como la exactitud y linealidad del instrumento.
- Estabilidad: El cambio del instrumento con el transcurso del tiempo.
- Repetibilidad: La variación observada cuando un operador mide de manera repetida la misma pieza con el mismo instrumento.
- Linealidad: La exactitud a lo largo del rango de operación del instrumento, por ejemplo, en el caso de una báscula que mide un rango de 0 a 100 kg, interesa que sea exacta en todo este rango.

El patrón es el instrumento de medición o material destinado para definir, realizar, conservar o reproducir la unidad o magnitud que sirva como referencia. Por su parte, calibración es el conjunto de operaciones bajo condiciones específicas que sirven para establecer la relación entre las magnitudes indicadas por un instrumento de medición, con las magnitudes ya conocidas de un material o instrumento patrón. [10]

Cabe mencionar que la confirmación metrológica es la acción de calibrar y ajustar un instrumento de medición. Es importante señalar que los conceptos de calibración y de confirmación metrológica no significan lo mismo, pero en la práctica se utiliza simplemente calibración para hacer referencia a ambos aspectos. Además, valor verdadero es el valor conocido de un material patrón o medición reportada por un instrumento patrón, y mensurando es el objeto o parte que se quiere medir. [4,10]

La variación dentro de la muestra es la variación dentro del mismo objeto a medir, y se presenta en objetos que por su naturaleza tienen cierta heterogeneidad en sus superficies, dimensiones, etc. Por ejemplo, si se quiere medir un diámetro interior con un vernier, entonces la medición varía ligeramente dependiendo de dónde y cómo se coloca el vernier. Otro caso es cuando se quiere medir la rugosidad de una superficie, que puede variar de una zona a otra de la misma pieza. Como se muestra en la figura 3.3, la variación dentro de la muestra contribuye tanto a la variación del producto como a la del error del proceso de medición.

Un aspecto adicional que no es considerado en la figura 3.3 es la sensibilidad o resolución del equipo, que se refiere a la habilidad del instrumento de medición para discriminar entre piezas similares.

Se recomienda que el instrumento sea capaz de reportar al menos 10 valores espaciados a lo largo del rango de variación de las piezas que se pretende medir. El departamento de calidad cuenta con un metrólogo quien es la persona que se encarga de adecuar la sensibilidad del instrumento o equipo de medición; se utiliza un estadístico que se conoce como el número de categorías diferentes, el cual solo se usa como referencia en este trabajo.

En la tabla 3.1 se resume parte de los conceptos que se comentaron antes y la forma en que se manifiestan como problemas en un sistema de medición. De esta tabla se destaca que la precisión y la exactitud, como ya se había mencionado, son dos manifestaciones del error (variabilidad) de cualquier proceso de medición (figuras 3.4 y 3.5). La precisión es la variación que presentan los resultados al medir varias veces una misma pieza o al mensurando con el mismo equipo (sus componentes principales son la repetibilidad y la reproducibilidad). En otras palabras, la precisión es la habilidad de un proceso de medición para repetir y reproducir su propia medición, independientemente de si dicha medición es correcta o no. Por su parte, la exactitud o sesgo se refiere al desfase o desplazamiento que tienen las mediciones con respecto al estándar o verdadero valor que se supone conocido.

*Tabla 3.1 Tabla resumen de los problemas típicos que enfrenta un sistema de medición. [5]*

<b>El sistema de medición debería de ser</b>	<b>Problemas típicos</b>
<b>Preciso y exacto</b> El sistema genera mediciones individuales, así como el promedio de éstas que es muy parecido al valor verdadero.	<b>Inexacto e impreciso</b> Tanto las mediciones individuales como su promedio se alejan del valor verdadero.
<b>Repetible</b> Mediciones repetidas realizadas por una persona sobre el mismo mensurando resultan muy parecidas.	<b>No repetible</b> Mediciones repetidas de un operador sobre el mismo espécimen muestran un exceso de variabilidad.
<b>Reproducible</b> Dos o más personas que miden el mismo objeto obtienen en promedio resultados muy similares.	<b>No reproducible</b> Dos o más personas que miden las mismas piezas obtienen en promedio resultados sensiblemente diferentes.
<b>Estable en el tiempo</b> El sistema de medición no cambio a través del tiempo.	<b>Inestable en el tiempo</b> El sistema de medición cambia a través del tiempo.

Para estudiar la exactitud es preciso contar con un estándar o patrón, de modo que se pueda suponer conocida la magnitud verdadera a medir. Por ejemplo, si con una balanza, durante cuatro semanas, se pesa 25 veces un objeto patrón que pesa un kilogramo, entonces la exactitud o sesgo se estima mediante la diferencia entre la media de los 25 datos ( $\bar{X}$ ) y el verdadero valor (N) del mensurando (un kilo, en este caso). La variabilidad que muestran las mediciones alrededor de un kilogramo es la precisión de la báscula (vea las figuras 3.4 y 3.5)

Es más fácil entender lo que es precisión y exactitud a partir de las figuras 3.4. La primera representa el tiro al blanco, en el cual el centro es el blanco o valor nominal (N) de una pieza y los puntos son resultados del proceso de medición. Esta misma idea se representa en la figura 3.5, mediante la curva normal, donde se debe considerar la variabilidad o ancho de la curva y el desfase de la curva con respecto al valor nominal (N), que representa el valor verdadero del objeto que se quiere medir.

En ambas figuras, en el caso a) se trata de un proceso de medición impreciso e inexacto, ya que las mediciones están dispersas y tienen un sesgo con respecto al valor nominal. El proceso b) tiene una exactitud adecuada porque en promedio da en el blanco (está centrado sobre N), pero es impreciso por su alta dispersión. En el inciso c) las mediciones tienen buena precisión (poca variabilidad), pero su exactitud es mala (tiene sesgo), y el inciso d) representa un proceso de medición preciso y exacto, ya que en promedio reporta la magnitud verdadera (el centro) con poca variabilidad.

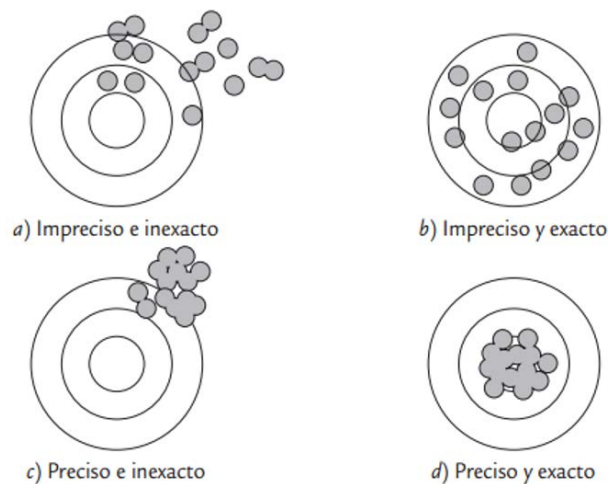


Figura 3.4 Diferencias entre precisión y exactitud. [5]

Lo más deseable es que el proceso de medición sea preciso y exacto (caso d), es decir, que cuando mida el mismo objeto arroje resultados similares (poca dispersión) y que el promedio de dichos resultados sea la magnitud verdadera del objeto. Existen métodos de inferencia estadística que se pueden aplicar para estimar la exactitud de un instrumento de medición. Además, se puede realizar

un “Monitoreo del sistema de medición”, en donde se analizan estrategias para estudiar la exactitud y la estabilidad del instrumento de medición.

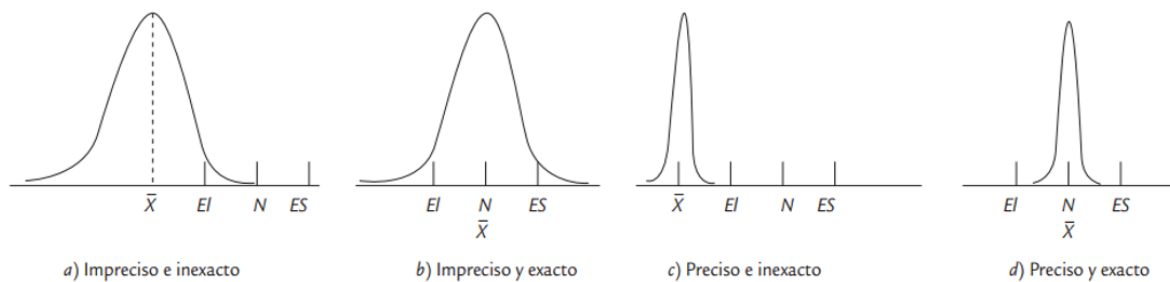


Figura 3.5 Precisión, exactitud y su significado con parámetros estadísticos. [5]

### 3.2 Estudio largo de repetibilidad y reproducibilidad

Existe una diversidad de métodos para realizar análisis y estudios de repetibilidad vs reproducibilidad tanto para variables como atributos, en la figura 3.6 se muestran los métodos más usuales para realizar estos estudios y los recomendados por la AIAG (Automotive Industry Action Group) [1].

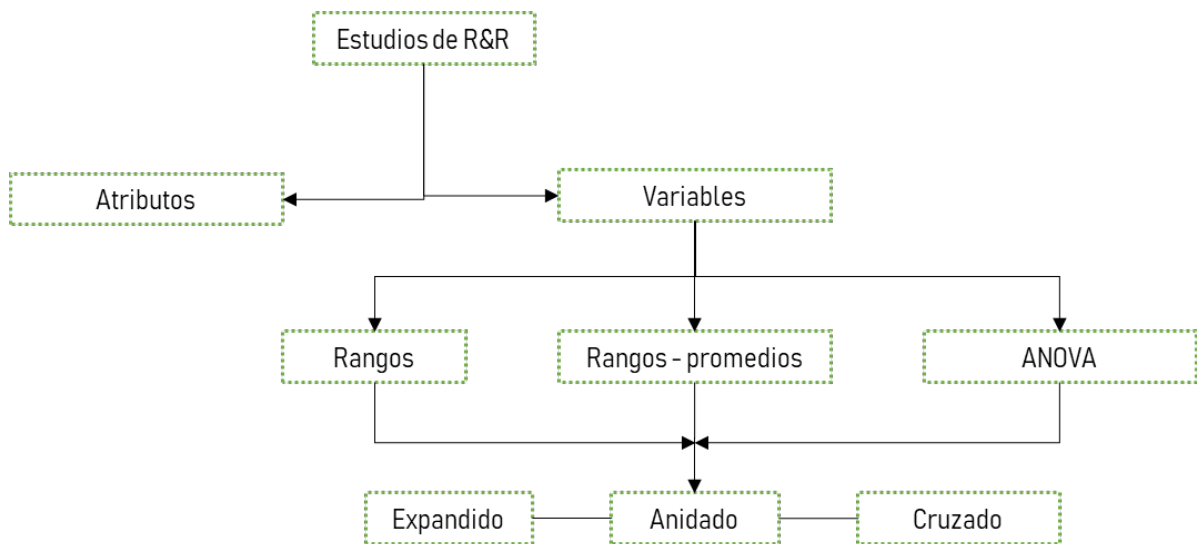


Figura 3.6 Métodos comunes para realizar los estudios de R & R. [EP]

El método de rangos es apropiado cuando se requiere una aproximación rápida de la variabilidad del sistema, el método muestra solo una gráfica global del sistema de medición. No secciona la variabilidad en repetibilidad y reproducibilidad. [9]



El método de promedio-rango brinda un estimativo de la repetibilidad y reproducibilidad, resulta sencillo el cálculo manual y la evaluación del sistema se obtienen relativamente rápido. [9]

El método de ANOVA es más completo, ya que no sólo ofrece un estimativo de la repetibilidad y reproducibilidad si no que a su vez puede determinarse la interacción entre el instrumento de medición o la parte y el evaluador. Con el método ANOVA (Análisis de la Varianza) puede seccionar la varianza en cuatro categorías: partes, evaluadores, interacción entre partes y evaluadores, así como el error por replicación debido al instrumento de medición.

El método de evaluación del sistema de medición por atributos puede llegar usar ensayos pasa-no pasa o patrones visuales y los resultados tendrían de 5 hasta 7 categorías tales como: muy bueno, bueno, aceptable, pobre y muy pobre.

Cabe mencionar que las secuencias de cálculo de algunos de estos métodos cambian en softwares comerciales, tales como Minitab, debido a que incluyen subrutinas de calculo que ayudan a mejorar y automatizar los reportes de los estudios de R&R. En particular este tipo de softwares, Minitab<sup>4</sup>, Statistica, SPSS, Statgraphics Centurion e incluso lenguajes de programación como R<sup>5</sup>, ofrecen muchas ventajas para la realización de estudios de R&R con la metodología ANOVA; además de que incluyen librerías o funciones para realizar análisis de grandes bases o lotes de datos.

Como ya se explicó, la repetibilidad y la reproducibilidad son los componentes de la precisión. La repetibilidad de un instrumento de medición se refiere a la precisión o variabilidad de sus mediciones cuando se obtienen varias mediciones del mismo objeto en condiciones similares (mismo operador); mientras que la reproducibilidad es la precisión o variabilidad de las mediciones del mismo objeto, pero en condiciones variables (diferentes operadores).

En los estudios de R&R se evalúa de modo experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; además, permite cuantificar si este error es mucho o poco en comparación con la variabilidad del producto y con las tolerancias de calidad que se mide.

Las fuentes de variabilidad que se pueden evaluar en un estudio de R&R ampliado son: variabilidad del producto, del instrumento y de los operadores. Sea  $\sigma_{total}^2$  la variabilidad total observada;  $\sigma_{prod}^2$  la varianza atribuible al producto (partes o piezas),  $\sigma_{instr}^2$  la variabilidad o error del instrumento o equipo

---

<sup>4</sup> Minitab es un programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Combina la sencillez de la interfaz gráfica de Excel con la capacidad de ejecución de secuencias de cálculo robustas para análisis estadístico.

<sup>5</sup> R es un lenguaje de programación de alto nivel, muy potente, que es utilizado para realizar análisis de datos con métodos estadísticos y de Machine Learning.

de medición y  $\sigma_{oper}^2$  la variabilidad o error debido a operadores, entonces se cumple la siguiente relación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{prod}^2 + \sigma_{oper}^2 + \sigma_{instr}^2 \quad (\text{Ecu. 3.2})$$

Donde

$$\sigma_{instr}^2 = \sigma_{repeti}^2 \quad \text{y} \quad \sigma_{oper}^2 = \sigma_{reprod}^2$$

Por lo tanto, el error o variabilidad de las mediciones debido a repetibilidad y reproducibilidad se obtiene con

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repeti}^2 + \sigma_{reprod}^2 \quad (\text{Ecu. 3.3})$$

La ventaja de este estudio es que permite no solo evaluar la variabilidad del instrumento de medición, sino que a través de este mismo se puede cuantificar la variabilidad de la muestra (parte) y del operador (reproducibilidad).

### 3.3 Metodología para la aplicación de un estudio R&R largo

Para cada instrumento de medición que se desee evaluar es necesario plantear un estudio en el que se apliquen los siguientes pasos:

- Seleccionar dos o más operadores o personas que participen en el estudio haciendo mediciones.
- Seleccionar adecuadamente un conjunto de 10 o más partes o piezas que serán medidas varias veces por cada operador. Es importante que la selección se realice a partir de piezas que reflejen las diferentes dimensiones de piezas que se producen.
- Decidir el número de ensayos o veces que cada operador medirá la misma pieza. En un estudio largo se deben hacer por lo menos dos ensayos, y tres es lo más recomendable.
- Etiquetar cada parte y aleatorizar el orden en el cual las partes se dan a los operadores. Identificar la zona o punto en la parte donde la medición será tomada, así como el método o técnica que deberá aplicarse.
- El operador A realiza en orden aleatorio su primera medición a todas las piezas consideradas.
- Volver a aleatorizar las piezas y obtener la primera medición del operador B.
- Continuar hasta que todos los operadores hayan realizado la primera medición de todas las piezas.

- Repetir los tres pasos anteriores hasta completar el número de ensayos elegidos. Es preciso asegurarse de que los resultados previos de un ensayo no son conocidos por los operadores. Es decir, en cada medición realizada, el operador no debe conocer cuál pieza está midiendo, ni cuáles fueron sus mediciones anteriores sobre ella, menos las reportadas por los demás operadores.
- Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio acerca de la calidad del proceso de medición y decidir acciones futuras sobre el mismo.

Realizar las repeticiones o ensayos operador por operador como se describe en los pasos anteriores puede introducir efectos temporales en la reproducibilidad (variación debida a los operadores), por lo que otra manera adecuada de obtener los datos es medir en orden completamente aleatorio cada combinación (operador, pieza) para cada repetición.

En el siguiente capítulo se describirá de forma detallada como fue el proceso para realizar el estudio de R&R largo, que, a su vez forma parte del estudio ampliado.

### 3.3.1 Análisis por medias y rangos del estudio R&R largo

Como se había mencionado anteriormente existen dos metodologías de cálculo diferentes para realizar el estudio de R&R largo, una, utilizando como parámetro estadístico las medias y los rangos, conocido como método de medias – rangos y la utilización de los métodos estadísticos de análisis de varianza (ANOVA).

Con frecuencia realizar un estudio R&R con la metodología ANOVA de forma manual requiere de mayor tiempo a diferencia del método de medias – rangos, la metodología ANOVA es fácilmente aplicable cuando se cuenta con el software para realizar el estudio, sin embargo, muchas veces las empresas no siempre poseen las licencias de los softwares ya citados para realizar este tipo de estudios; por lo que es muy recomendable tratar en este capítulo la rutina de cálculo para realizar un estudio de R&R por el método de medias – rangos, debido a que también forma parte del alcance de este trabajo.

Este método puede ser programado en una hoja de cálculo y puede ayudar a la empresa a realizar una correcta estimación del desempeño de su sistema de medición; sin la necesidad de comprar una licencia de un software y prescindir de éste como un recurso opcional, más no limitativo.

A continuación, se mostrará un ejemplo de la rutina de cálculo del método de medias – rangos con datos reales de ensayos de laboratorio.

Los datos que a continuación se presentan son datos reales y pertenecen a la prueba de peso base, que como se mencionó en el capítulo 2, es una prueba que sirve para determinar el gramaje del papel. Con esta información se realiza un estudio de R&R largo para evaluar el proceso de medición del “peso base”, que es una variable importante del papel. Las especificaciones inferior y superior son EI= 360 y ES = 410, g/m<sup>2</sup> respectivamente, por lo que el rango de especificación o tolerancia para el peso base es igual 50 g/m<sup>2</sup>. Cada muestra es medida tres veces por cada operador y los datos obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3.2 Tabla con datos de ensayos de Peso Base, realizados por tres operadores diferentes. [26]

Número de partes	Operador A					Operador B					Operador C				
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media	Rango
1	403	400	398	400.3333	5	403	397	398	399.3333	6	398	403	397	399.3333	6
2	405	404	404	404.3333	1	402	400	400	400.6667	2	400	398	398	398.6667	2
3	408	405	406	406.3333	3	395	396	398	396.3333	3	403	403	400	402	3
4	405	408	408	407	3	405	405	409	406.3333	4	395	399	399	397.6667	4
5	405	406	407	406	2	405	402	403	403.3333	3	405	403	403	403.6667	2
6	402	400	399	400.3333	3	397	397	396	396.6667	1	407	406	405	406	2
7	398	400	396	398	4	407	404	404	405	3	403	397	397	399	6
8	400	398	397	398.3333	3	401	401	396	399.3333	5	405	408	407	406.6667	3
9	404	403	400	402.3333	4	407	408	410	408.3333	3	411	409	409	409.6667	2
10	405	405	406	405.3333	1	410	409	410	409.6667	1	410	404	407	407	6
11	407	407	408	407.3333	1	408	404	405	405.6667	4	400	404	399	401	5
12	406	405	400	403.6667	6	401	399	401	400.3333	2	402	401	400	401	2
13	403	402	405	403.3333	3	401	406	404	403.6667	5	403	403	405	403.6667	2
14	402	400	405	402.3333	5	405	402	405	404	3	401	401	401	401	0
15	392	391	394	392.3333	3	398	399	403	400	5	398	394	396	396	4
16	395	396	396	395.6667	1	400	397	398	398.3333	3	396	397	400	397.6667	4
17	402	397	398	399	5	400	397	401	399.3333	4	405	402	403	403.3333	3
18	395	398	397	396.6667	3	400	400	401	400.3333	1	401	401	400	400.6667	1
19	393	392	392	392.3333	1	400	400	401	400.3333	1	400	400	401	400.3333	1
20	405	404	405	404.6667	1	399	400	401	400	2	407	405	410	407.3333	5

Para analizar los resultados del estudio R&R, primero se debe hacer una inspección visual de los datos. En la tabla anterior se ve que hay diferencias entre el ensayo uno, dos y tres de cada operador, y también entre los resultados de cada operador para una misma muestra. Estas diferencias se pueden comprender mejor con las gráficas apropiadas. Por ejemplo, en la figura 3.7 se muestra una gráfica donde se compara la medición promedio que cada operador obtiene para cada pieza. De aquí se observa que hay cierta discrepancia entre lo que reporta cada operador, y que el operador A tiende a reportar mediciones más pequeñas y dispersas, mientras que las de los operadores B y C son más cercanas entre sí. Además, se puede apreciar que no existe paralelismo, es decir, existe mucha dispersión de las mediciones; esto se puede observar al ver cómo están desfasadas las gráficas de cada operador. Por lo que la interacción *Operador x Pieza* aquí si se manifiesta.

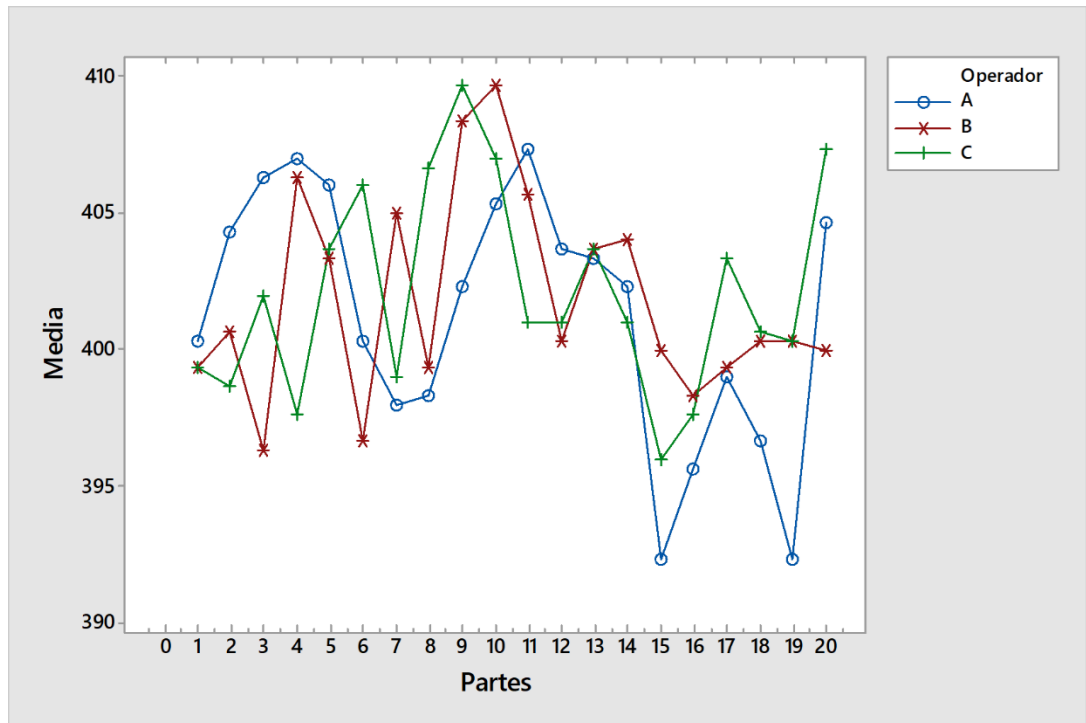


Figura 3.7 Comparación de la medición media de los operadores. [26]

Para comenzar con el estudio de R&R utilizando la metodología de medias y rangos, primeramente, se calcula para cada operador el rango de las mediciones que hizo de cada muestra. Este rango es una información directa sobre el error de las mediciones (repetibilidad), ya que son sobre la misma muestra y las realiza el mismo operador.

Estos rangos se calculan con el valor máximo medido menos el valor mínimo medido:

$$R_X = X_{MAX} - X_{MIN} \quad (\text{Ecu. 3.4})$$

Además de los rangos se calcula las medias de cada ensayo hecha por cada operador, posteriormente se calcula la media de todos los rangos por cada operador, así como la media de todas las mediciones hechas por el mismo operador [2, 5]. De esta forma se tiene:

$$\bar{X}_A = 401.2833 \quad \bar{X}_B = 401.85 \quad \bar{X}_C = 402.0833$$

Y los promedios de los rangos resultan ser:

$$\bar{R}_A = 2.9 \quad \bar{R}_B = 3.05 \quad \bar{R}_C = 3.15$$

Después se debe de calcular la media de los rangos promedio:

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{3} = 3.033 \quad (\text{Ecu. 3.5})$$

Y el rango de las medias de todos los operadores:

$$\bar{X}_{dif} = \bar{X}_{MAX} - \bar{X}_{MIN} = 0.8 \quad (\text{Ecu. 3.6})$$

Posteriormente se debe de calcular el límite superior de la carta de rangos (carta R). Existen muchos procesos industriales considerados de tipo “masivo”, en el sentido de que producen muchos artículos, partes o componentes durante un lapso de tiempo pequeño. Por ejemplo: líneas de ensamble, máquinas empacadoras, procesos de corte e impresión de papel, operaciones de soldadura en una línea de producción, moldeo de piezas de plástico, torneado de una pieza metálica, el corte de una tira en pedazos pequeños, etc. Algunos de estos procesos realizan miles de operaciones por día, mientras que otros efectúan varias decenas o centenas. En ambos casos se está ante un proceso masivo. [2, 5]

Si, además, las variables de salida de interés son de tipo continuo, entonces estamos ante el campo ideal de aplicación de las cartas de control  $\bar{X} - R$ .

La idea es la siguiente: imaginemos que a la salida del proceso fluyen (uno a uno o por lotes) las piezas resultantes del proceso, como se ilustra en la figura 3.8, cada determinado tiempo o cantidad de piezas se toma un número pequeño de piezas (subgrupo) a las que se les medirá una o más características de calidad. Con las mediciones de cada subgrupo se calculará la media y el rango, de modo que cada periodo de tiempo (media hora, por ejemplo) se tendrá una media y un rango muestral que aportarán información sobre la tendencia central y la variabilidad del proceso, respectivamente. Con la carta  $\bar{X}$  se analiza la variación entre las medias de los subgrupos, para detectar cambios en la media del proceso, como los que se muestran en la figura 3.9.

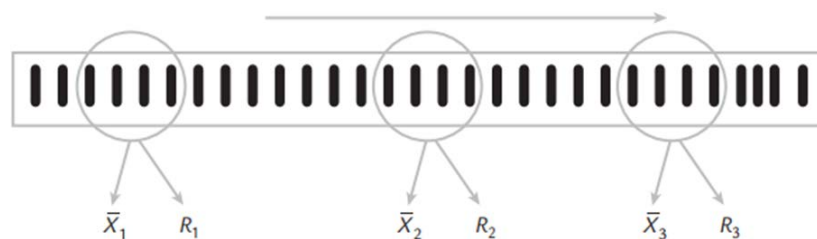


Figura 3.8 Operación de una carta  $\bar{X} - R$ . [5]

Mientras que con la carta R se analiza la variación entre los rangos de los subgrupos, lo cual permite detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso, como se ilustra en la figura 3.10.



Figura 3.9 La carta  $\bar{X}$  detecta cambios significativos en la medida del proceso. Cuando la curva se desplaza la carta manda una o varias señales de fuera de control. [5]

Con respecto a las figuras 3.9 y 3.10, al afirmar que el proceso es estable se está diciendo que es predecible en el futuro inmediato, lo que lleva a esperar básicamente la misma foto del proceso en el siguiente instante de tiempo. La distribución o comportamiento del proceso no necesariamente tiene la forma de campana como se sugiere en las figuras referidas. Éstas pueden ser una curva con sesgo o incluso otras formas más inusuales. Claro que, si la forma es poco usual, se recomienda investigar la causa.

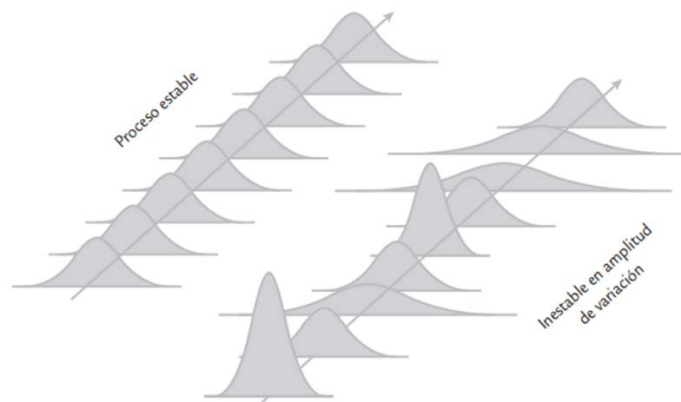


Figura 3.10 La carta R detecta cambios significativos en la amplitud de la dispersión. Por ejemplo, si la variabilidad aumenta (campana más amplia). La carta R lo detecta mediante uno o más puntos fuera de su LCS. [5]

La carta de rangos se utiliza para detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso, como se ilustra en la figura 3.10, y sus límites se determinan a partir de la media y la

desviación estándar de los rangos de los subgrupos, ya que en este caso es el estadístico  $W^6$  [2, 5] el que se grafica en la carta R. Por ello, los límites se obtienen con la expresión:

$$\mu_R \pm 3\sigma_R \quad (\text{Ecu. 3.7})$$

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

$$\mu_R = \bar{R} \quad \text{y} \quad \sigma_R = d_3\sigma \approx d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) \quad (\text{Ecu. 3.8})$$

Donde  $\bar{R}$  es la media de los rangos de los subgrupos,  $\sigma$  la desviación estándar del proceso y  $d_3$  es una constante que depende del tamaño de subgrupo que está tabulada en el anexo C<sup>7</sup>.

Como por lo general en un estudio inicial no se conoce  $\sigma$  ésta puede estimarse a través de  $\bar{R}/d_2$ , como yo lo habíamos explicado antes. En forma explícita, los límites de control para la carta R se calculan con:

$$LCI = \bar{R} - 3d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = \left[1 - 3\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\right]\bar{R} = D_3\bar{R} \quad (\text{Ecu. 3.9})$$

$$\text{Línea central} = \bar{R}$$

$$LCS = \bar{R} + 3d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = \left[1 + 3\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\right]\bar{R} = D_4\bar{R} \quad (\text{Ecu. 3.10})$$

Donde se han introducido las constantes  $D_3$  y  $D_4$  para simplificar los cálculos, y están tabulados en el anexo C para diferentes tamaños de subgrupo,  $n$ . Para este cálculo  $n = 3$ , porque son tres ensayos.

Mediante el anexo C,  $D_4\bar{R} = 3.033(2.57) = 7.8$ , donde  $D_4$  es una constante que depende del número de ensayos utilizados para calcular cada rango. Si algún rango es mayor que este límite, será señal de que el error de medición correspondiente está fuera de lo usual, por lo que es preciso identificar la causa; además, se deben repetir las mediciones involucradas utilizando el mismo operador y la misma pieza o muestra.

Posteriormente se debe de calcular la variación expandida del equipo (VE), que resulta de multiplicar por 5.15 veces la desviación estándar del error del equipo.

<sup>6</sup> También conocido como test de Shapiro-Wilkinson y sirve para contrastar la normalidad de un conjunto de datos.

<sup>7</sup> La constante  $d_3$  es la desviación estándar del rango relativo,  $q = \frac{R}{\sigma}$ .



La razón de esta expansión se debe a las propiedades de la distribución normal, en la que el intervalo  $\mu \pm 2.575\sigma$  abarca el 99% del área bajo una curva normal; luego, como en el caso de los errores de medición  $\mu = 0$ ; entonces  $\pm 2.575\sigma$  tiene una amplitud de  $5.15\sigma$ .

Para calcular la desviación estándar de la repetibilidad,  $\hat{\sigma}_{repeti}$ , se divide  $\bar{R}$  entre la constante  $d_2$  (anexo C) que se utilizó para estimar la desviación estándar a partir de los rangos. Se utiliza  $k_1$ , que es igual a  $5.15/d_2 = 5.15/1.693 = 3.042$  para tres ensayos, por lo que:

$$\hat{\sigma}_{repeti} = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{k_1 \bar{R}}{5.15} = \frac{3.042}{5.15} (3.033) = 1.792$$

Donde  $k_1$  es una constante que depende del número de ensayos, y  $\hat{\sigma}_{repeti} = \frac{VE}{5.15} = 1.792$ .

Así, de acuerdo con la anterior el error expandido es:

$$VE = 5.15 \hat{\sigma}_{repeti} = k_1 \bar{R} = 3.042 * 3.033 = 9.23 \quad (\text{Ecu. 3.11})$$

Es importante señalar que algunos autores sugieren que  $VE = 6 \hat{\sigma}_{repeti}$ , con lo cual se logra una cobertura de 99.73%. Por ello en algunos softwares, como Minitab, normalmente se puede elegir si la expansión se da con el factor 5.15 o si se hace con 6.

Después, se tiene que determinar la variación expandida del operador (VO) como:

$$VO = 5.15 \hat{\sigma}_{reprod} = \sqrt{(k_2 \bar{X}_{dif})^2 - \frac{(VE)^2}{nt}} \quad (\text{Ecu. 3.12})$$

Donde  $k_2$  es una constante que depende del número de operadores,  $n$  es el número de partes o piezas y  $t$  es el número de ensayos.

$$VO = 5.15 \hat{\sigma}_{reprod} = \sqrt{(2.7 * 0.8)^2 - \frac{(9.23)^2}{20 * 3}} = 1.8$$

Además,  $\hat{\sigma}_{reprod} = \frac{VO}{5.15} = \frac{1.8}{5.15} = 0.34$ .

La variación combinada o error de medición expandido (EM) debido a repetibilidad y reproducibilidad se calcula como:

$$EM = 5.15 \hat{\sigma}_{R\&R} = \sqrt{VE^2 + VO^2} = 9.4 \quad (\text{Ecu. 3.13})$$

Y por lo tanto,  $\hat{\sigma}_{R\&R} = \frac{EM}{5.15} = 1.82$ . De esta manera el error máximo de medición está dado por  $\pm 2.575\hat{\sigma}_{R\&R}$ , con una confianza del 99%.

Por ejemplo, si se mide una muestra y se reporta que su peso es de 411 g/m<sup>2</sup>, entonces se rechazaría porque es mayor que la especificación superior (EI=410 g/m<sup>2</sup>). Sin embargo, este peso puede estar dentro de las especificaciones, ya que su tamaño verdadero está en:

$$X \pm 2.575\hat{\sigma}_{R\&R} = 411 \pm (2.575 * 1.82) \quad (\text{Ecu. 3.14})$$

Que es un rango de 406.4 a 415.6 g/m<sup>2</sup>.

También se debe de calcular el índice *precisión/tolerancia*. En este caso la tolerancia, para el peso base es de 50 unidades, entonces el índice P/T se define por

$$\frac{P}{T} = \frac{EM}{ES-EI} \times 100 = \frac{9.4}{410-360} \times 100 = 18.46\% \quad (\text{Ecu. 3.15})$$

Nótese que este índice expresa en porcentaje la comparación entre el error de medición expandido (EM) y la variabilidad tolerada (ES – EI) para la característica de calidad que se está midiendo. De aquí que es deseable que el EM sea más pequeño que la tolerancia, a fin de asegurar que la calidad del proceso de medición es aceptable para discriminar entre piezas buenas y malas. Además, este índice hace evidente que un instrumento de medición será preciso en función de la característica de calidad que se pretende medir (no es lo mismo en términos de la precisión exigida, pesar oro que pesar hojalata). De manera específica, el índice P/T se interpreta como sigue [2, 5]:

*P/T ≤ 10%, excelente proceso de medición*

*10% < P/T ≤ 20 %, bueno*

*20% < P/T ≤ 30%, marginal (casi inaceptable)*

*P/T ≥ 30%, inaceptable y debe corregirse.*

En el ejemplo P/T = 18.46%; de manera que, con respecto a este criterio, el proceso de medición del peso base tiene calidad buena. El que sea buena significa que el proceso de medición está cerca de no tener la capacidad adecuada para discriminar el gramaje de los distintos tipos de papel, es decir marginal (casi inaceptable), por lo que debe buscarse su mejora. En el anexo A se resume de manera ordenada toda la información generada en el estudio R&R, desde la obtención de los datos hasta la interpretación del error de medición y sus componentes. En el anexo B se proporciona un ejemplo de la memoria de cálculo para este tipo de estudios.

Es importante calcular el índice de *precisión/variación total (EM/VarTot)*. Un criterio adicional para evaluar la calidad de un proceso o sistema de medición es comparar la magnitud del error de medición

expandida ( $EM$ ) con la variación total observada ( $VarTot$ ). Esto es particularmente necesario cuando la variable que se está midiendo no tiene doble especificación (EI y ES); asimismo, cuando el proceso es muy capaz o para fines de control y mejora de procesos. Para hacer este cálculo primero se necesita calcular la variación de las partes, que por el método de rangos se estima como  $\hat{\sigma}_{parte} = R_{parte}/d_2^*$ , donde para obtener  $R_{parte}$  primero se saca el promedio de la medición para cada parte, considerando todas las mediciones realizadas sobre esa parte por los distintos operadores. Por ejemplo, para este caso de estudio, el promedio por cada parte es:

*Tabla 3.3 Tabla con datos de ensayos de Peso Base, categorizados por número de partes y promedios globales.*

Numero de partes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Promedio global	399.67	401.22	401.56	403.67	404.33	401	400.67	401.44	406.78	407.33	404.67	401.67	403.56	402.44	396.11	397.22	400.56	399.22	397.67	404

De aquí se ve que la medición máxima es 407.33 y la mínima es 396.11. Por lo que

$$R_{parte} = 407.33 - 396.11 = 11.22$$

Por otro lado,  $d_2^*$  es una constante que depende del tamaño de muestra, que en este caso es la cantidad de piezas (vea la ecuación de VO).

La constante  $d_2^*$  es una corrección a la constante  $d_2$  usadas en las cartas de control para estimar la desviación estándar a partir de los rangos. Esta corrección es necesaria cuando se utilizan pocas muestras (menos de 15) y, en este caso, se tiene un conjunto de 20 muestras por lo que este factor no se aplica y se toma  $d_2$  para 20 muestras como  $d_2 = 3.735$ . Por lo tanto, la variación de las partes es:

$$\hat{\sigma}_{parte} = \frac{11.22}{3.735} = 3.004$$

La variación total se obtiene con:

$$\hat{\sigma}_{total} = \sqrt{\sigma_{parte}^2 + \sigma_{R\&R}^2} \quad (\text{Ecu. 3.16})$$

Por lo que en este caso, se llega a que  $\hat{\sigma}_{total} = \sqrt{(3.004)^2 + (1.79)^2} = 3.5$ , por lo que,

$$\left(\frac{EM}{VarTot}\right) \times 100 = \left(\frac{\hat{\sigma}_{R\&R}}{\hat{\sigma}_{total}}\right) \times 100 = \left(\frac{1.79}{3.5}\right) \times 100 = 51.1\% \quad (\text{Ecu. 3.17})$$

Por lo general, este porcentaje se considera grande, ya que  $EM/VarTot = 51.1\% > 30\%$ . Entonces, de acuerdo con este criterio el sistema de medición resulta inaceptable para fines de control de proceso.

Debemos calcular el número de categorías distintas o distinguibles,  $n_c$ . Este estadístico se calcula con:

$$n_c = \sqrt{2} \left( \frac{\hat{\sigma}_{parte}}{\hat{\sigma}_{R\&R}} \right) = \sqrt{2} \left( \frac{3.004}{1.79} \right) = 2.37 \quad (\text{Ecu. 3.18})$$

Y se interpreta como el número de intervalos de confianza al 97% no traslapados, y basados en el error de medición, que caben en el ancho de la variación de las partes. Por esto el valor de  $n_c$  indica el número de grupos diferentes de piezas que el sistema de medición es capaz de distinguir, lo cual tiene relación directa con la resolución con la que éste mide la característica de interés. La interpretación de la calidad del sistema de medición en términos del valor de  $n_c$  se hace de acuerdo con:

- Si  $n_c > 4$ , la resolución del sistema de medición es adecuada.
- Si  $n_c < 2$ , la resolución del sistema de medición es claramente inadecuada.
- Si  $2 \leq n_c \leq 4$ , tiene una resolución poco adecuada.

En este caso se tiene  $n_c = 2.37$ . Por lo tanto, el sistema de medición para medir el peso base tiene una resolución poco adecuada.

Ahora bien, después de haber obtenido los resultados de los criterios del estudio R&R se debe de tomar una decisión. Con base en los tres criterios de calidad del sistema de medición que se comentaron antes, se toma una decisión acerca de lo que se debe hacer. En caso de que se decida mejorar el sistema de medición es importante ver cuál de los componentes de  $\hat{\sigma}_{R\&R}$  es el que más contribuye al error de medición, ya que en primera instancia puede ser el instrumento, los operadores o ambos. De acuerdo con esto se tienen las siguientes posibilidades de acción:

Si la fuente dominante de variación es la repetibilidad se deben investigar las posibles causas, algunas de las cuales pudieran ser: la suciedad del instrumento, componentes gastados, variabilidad dentro del mensurando, instrumento mal diseñado, funcionamiento inadecuado, método inadecuado, condiciones ambientales o en caso extremo, el instrumento de medición utilizado no sea adecuado para realizar tal medición. En este caso se debe evaluar la posibilidad de sustituirlo. [1, 5]

Cuando la reproducibilidad es la fuente principal de variabilidad, los esfuerzos se deben enfocar a estandarizar los procedimientos de medición y entrenar a los operadores para que se apeguen a ellos. Esto se debe a que, por lo general, se encontrará que los operadores usan métodos distintos, carecen de entrenamiento en el uso del equipo o se tiene un diseño inapropiado del instrumento que permite evaluaciones subjetivas. Si existieran otras fuentes de variación (como temperatura, tiempo, instrumento, etc.) con posible impacto en la reproducibilidad, su contribución se puede estudiar mediante técnicas de diseño de experimentos. [1, 5]

Si a pesar de la mala calidad de las mediciones la capacidad del proceso de producción es adecuada ( $C_p > 1.33$  y centrado en el valor nominal), entonces el desempeño inadecuado del sistema de medición no necesariamente es un problema crítico, pero en caso de mejorar la precisión se observaría un  $C_p$  todavía mejor. Por el contrario, si el proceso de producción es incapaz ( $C_p < 1$ ), los resultados inaceptables del estudio R&R pueden ser la diferencia entre reportar o no el proceso como capaz.

El índice  $C_p$  se define como la capacidad potencial del proceso que resulta de dividir el ancho de las especificaciones (variación tolerada) entre la amplitud de la variación natural del proceso. Se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (\text{Ecu. 3.24})$$

Donde  $\sigma$  representa la desviación estándar del proceso, mientras que ES y EI son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad.

La variación excesiva del proceso de medición se puede reducir haciendo más de una medición independiente sobre la misma pieza y reportar el promedio de estas mediciones como la magnitud de la misma. Si bien esta estrategia incrementa el tiempo y los recursos invertidos, es una alternativa que puede ser viable mientras se logra llevar el sistema de medición a resultados aceptables.

En este caso, toda la información obtenida se resume en la tabla siguiente, donde se destaca que:

*Tabla 3.4 Tabla resumen con los valores de cada criterio.*

<i>Criterio</i>	<i>Valor</i>	<i>Comentario</i>
<i>P/T</i>	<i>18.43 % &lt; 20 %</i>	<i>Aceptable</i>
<i>EM/VarTot</i>	<i>51.1 % &gt; 30 %</i>	<i>Sistema de medición inaceptable para fines de control del proceso</i>
<i>n<sub>c</sub></i>	<i>2 &lt; 2.37 &lt; 4</i>	<i>Resolución poco adecuada</i>

Con base en lo anterior se debe evaluar seriamente la posibilidad de mejorar el proceso de medición. Para saber dónde actuar, en la misma tabla se observa que la repetibilidad contribuye más al error de medición. Por ello, primera instancia se buscaría atender aspectos relacionados con el instrumento mismo tomando en cuenta lo que se explicó con anterioridad.

### 3.3.2 ANOVA para el estudio R&R largo

El método de análisis de varianza (ANOVA) es más efectivo que el descrito antes, ya que permite identificar y cuantificar de mejor manera todas las fuentes de variación presentes en el estudio R&R. Para comprender los conceptos utilizados en la presente sección se recomienda revisar los conceptos de análisis de varianza. [2, 5]

El método de ANOVA no supone de antemano la inexistencia de interacción operador  $\times$  parte<sup>8</sup>, como lo hace el método basado en medias y rangos. De tal forma que cuando hay interacción significativa el método de medias y rangos subestima la magnitud del error de medición ( $\sigma_{R\&R}$ ). En cambio, el método de ANOVA reparte la variación total ( $\sigma_{total}^2$ ) de los datos en la siguiente forma:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{parte}^2 + \sigma_{oper}^2 + \sigma_{oper \times parte}^2 + \sigma_{instr}^2 \quad (\text{Ecu. 3.19})$$

Donde se agrega el componente  $\sigma_{oper \times parte}^2$  a la descomposición dada en la ecuación 3.2 para calcular  $\sigma_{R\&R}$  mismo que se considera parte de la reproducibilidad. Es decir, se cumplen las siguientes relaciones:

$$\sigma_{repeti}^2 = \sigma_{instr}^2 \quad y \quad \sigma_{reprod}^2 = \sigma_{oper}^2 + \sigma_{oper \times parte}^2 \quad (\text{Ecu. 3.20})$$

Y como antes  $\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repeti}^2 + \sigma_{reprod}^2$  estos componentes se estiman mediante la técnica de ANOVA aplicada a un diseño factorial con efectos aleatorios<sup>9</sup>. De los datos del estudio R&R largo se pueden calcular las llamadas sumas de cuadrados (SC) correspondientes a cada componente de variación dado en la ecuación 3.19, mismas que cumplen la relación:

$$SC_{total} = SC_{parte} + SC_{oper} + SC_{oper \times parte} + SC_{error} \quad (\text{Ecu. 3.21})$$

Donde la suma del error ( $SC_{error}$ ) corresponde a la repetibilidad. Al considerar  $p$  partes,  $t$  ensayos y  $o$  operadores, los grados de libertad correspondientes a cada suma de cuadrados de la ecuación anterior son, respectivamente,

$$pot - 1 = (p - 1) + (o - 1) + (p - 1) + po(t - 1) \quad (\text{Ecu. 3.22})$$

---

<sup>8</sup> Existe interacción *operador  $\times$  parte* cuando el desempeño de los operadores es diferente según el tipo de piezas; por ejemplo, con ciertas piezas un operador reporta mediciones sensiblemente más altas que los demás y con otras piezas el mismo operador reporta mediciones más bajas.

<sup>9</sup> En este caso, los factores parte y operador dan lugar a efectos aleatorios cuando las partes o piezas utilizadas en el estudio son una muestra de la población de partes y los operadores también son una muestra de los operadores que manejan el equipo de medición.

Al dividir cada suma de cuadrados por sus grados de libertad se obtienen los *cuadrados medios* ( $CM$ ), que son las cantidades relevantes de este análisis. Con los cuadrados medios se pueden construir pruebas estadísticas para verificar diferencias entre las partes, entre los operadores y la presencia de efecto de interacción *operador x parte*. Con toda esta información se construye la tabla de ANOVA. Además, de los valores esperados de los cuadrados medios se deduce que los estimadores de los componentes de varianza para cada caso están dados por:

$$\hat{\sigma}_{inst}^2 = CM_{error}$$

$$\hat{\sigma}_{inst}^2 = \frac{CM_{parte} - CM_{oper \times parte}}{to}$$

$$\hat{\sigma}_{oper}^2 = \frac{CM_{oper} - CM_{oper \times parte}}{tp}$$

$$\hat{\sigma}_{oper \times parte}^2 = \frac{CM_{oper \times parte} - CM_{error}}{t} \quad (\text{Ecu. 3.23})$$

Con base en esto se obtiene la repetibilidad, la reproducibilidad y el error de medición, los cuales, para su interpretación, se expresan como porcentajes de la variación total y de la tolerancia.

En la figura 3.11 se presentan, como ejemplo, seis gráficos que ayudan a la interpretación de los resultados del estudio R&R: el gráfico de barras permite representar la contribución y los índices  $P/T$  y  $VE/VarTot$ . El porcentaje de contribución es el cociente de cada componente de varianza con respecto a la varianza total ( $\sigma^2_{comp}/\sigma^2_{total}$ ), índice que provee una interpretación en la escala de las varianzas: si la contribución es menor que 10% el sistema de medición es aceptable, pero se requiere una contribución máxima de 1% para que sea excelente.

También en la figura se muestran las cartas  $\bar{X}$  – y  $R$  clasificando los puntos por operador en el orden de las piezas. La carta  $R$  representa variación debida a la repetibilidad, a la que contribuye más el operador C dada su mayor inconsistencia. La carta de medias que representa reproducibilidad se ve bastante bien, ya que los operadores reportan valores en promedio similares para cada pieza. Pero la repetibilidad más alta impacta en que los límites de control sean relativamente anchos en comparación con la dispersión de los puntos. El gráfico que representa las mediciones por parte permite ver la consistencia de las mismas sin considerar al operador, mientras que la gráfica por operador muestra la dispersión y localización de cada operador sin considerar las piezas; se nota una leve tendencia del operador A de reportar las mediciones más altas y del operador C a generar las más bajas. Por último, la gráfica de interacción  $operador \times parte$  nos muestra si el desempeño de los operadores depende de

la pieza que se mide, que como sabemos de la tabla de ANOVA, dicha interacción no es significativa, lo cual se refleja en que las líneas que representan los operadores se mantienen cerca de ser paralelas.

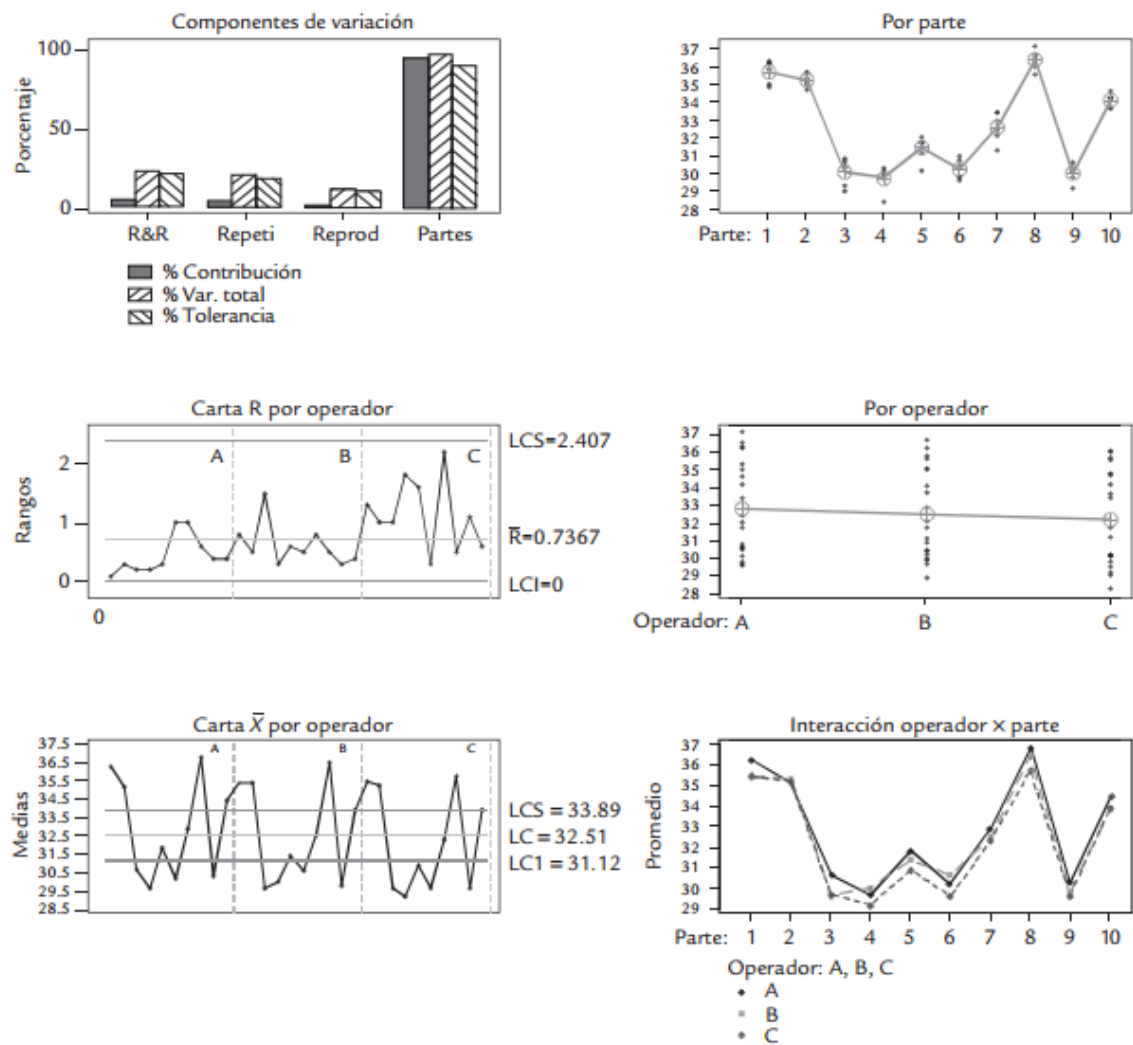


Figura 3.11 Gráficos que generalmente son utilizados en un estudio R&R. [5]

Es importante notar que las estimaciones a las que se llegan mediante los dos métodos (ANOVA, medias y rangos), no coinciden de manera exacta. Esto queda claro, sin embargo, en esencia, con ambos métodos se llega a las mismas conclusiones.



### 3.3.3 Estudios R&R para pruebas destructivas

En el contexto industrial existen pruebas destructivas en las que el operador sólo puede medir una vez la muestra porque de alguna forma ésta se destruye. Por ejemplo, pruebas de resistencia, dureza, tensión, etc. En estos casos, la estrategia es dividir la pieza en las porciones necesarias para que cada operador involucrado en el estudio pueda hacer por lo menos dos ensayos sobre la “misma pieza”.

Por supuesto, se debe buscar que estas porciones sean lo más representativas posibles de la pieza original. Como se mencionó en el capítulo 2, se desea realizar un estudio R&R de una prueba de integridad estructural, llamada “integrity test”, enfocándose en el haza de una canastilla, con tres distintos operadores, en el que cada uno mida tres veces la misma pieza. Como lo prueba es destructiva, entonces se selecciona una pieza de la producción y ésta es tomada del mismo lote o de piezas consecutivas producidas por la maquinaria. También se puede dividir en porciones, para que de esta forma se pueda lograr que cada operador haga tres mediciones sobre la misma pieza, pero en diferentes porciones. Claro, esto dependerá de que la pieza sea capaz de ser dividida de tal manera que no se afecten las propiedades que se pretenden medir. Después, los datos se colectan y se analizan de la manera usual. Un estudio de R&R anidado se aplica cuando cada parte es medida sólo por un operador, como en el caso de pruebas destructivas. [2, 5]

Es importante señalar que, si no se cumple el supuesto de homogeneidad de las porciones de la misma pieza, la repetibilidad y la reproducibilidad pueden resultar sobreestimadas, por lo que en caso de que resulten grandes, habrá que verlo con reservas, ya que puede deberse a que las porciones son demasiado variables. En caso de que las piezas no sean lo suficientemente grandes como para obtener nueve o seis porciones, entonces es posible reducir el número de ensayos y operadores; o incluso, hacer un estudio corto.

Un estudio de repetibilidad y reproducibilidad “corto” (estudio R&R corto) permite estimar de manera rápida la variabilidad con la que contribuye el proceso de medición; sin embargo, con este estudio no es posible separar la repetibilidad (instrumento) de la reproducibilidad (operadores). Los pasos a seguir en un estudio corto son similares a los de los del estudio largo, la principal diferencia es que cada operador sólo mide una vez cada pieza.

Esto no sólo hace que el estudio sea más rápido, sino que también es probable que bajo ciertas circunstancias sea lo único que se puede hacer.

## 4

## Metodología de aplicación para el estudio R&R ampliado

### 4.1 Procedimientos de recibo de materia prima y control de calidad.

Como se mencionó en el capítulo 1 existen mecanismos implementados por la empresa para llevar un control de calidad que se basen en términos de aceptación y rechazo de los atributos de los materiales y del producto terminado. Para lo cual se usa un Plan de Calidad y su respectiva Matriz de Impacto Ambiental.

La matriz de impacto ambiental tiene como objetivo la identificación del proceso o la actividad, identificación de los aspectos ambientales, evaluación de los aspectos ambientales y su significancia, requisito legal aplicable, objetivos metas y programas relacionados a la disminución de los aspectos ambientales, control operacional, criterio operacional, característica fundamental, frecuencia de seguimiento y medición, procedimiento documentado, responsables, registros de seguimiento y medición.

Por ejemplo, las actividades administrativas hacen uso de papel para imprimir documentos, el aspecto ambiental que corresponde es la generación de residuos de manejo especial, el impacto es la contaminación del suelo. Después se tiene que calificar los impactos como normales o anormales.

Por ejemplo, en extensión, si está asociado a un producto peligroso o a un problema ambiental global, existen quejas o interés declarado por partes interesadas, la severidad, la frecuencia de la actividad, etc. Es de importancia el uso de este documento, porque permite medir si las actividades destinadas a asegurar la calidad tienen un impacto ambiental y si es así, ayudan a la cuantificación del impacto.

Por otro lado, el Plan de Calidad tiene como objetivo determinar las causas y los controles para identificar y resolver un problema, por ejemplo, en la tabla 4.1 y 4.2 se muestra cuáles son algunos de los controles operacionales para los defectos de pegado.

Tabla 4.1 Plan de calidad, defecto de pegado. [26]

Característica	Impacto	Objetivo	Método o equipo de medición	Instructivo	Tamaño de la muestra
Defecto de pegado (Ampollas, arrugas)	M	Asegurar que la lámina corrugada esté libre de ampollas o arrugas para evitar que se despegue o tenga un pegado deficiente	Visual	I-FEE-E-01-21 Aprobar primera pieza laminado	1 lámina

Tabla 4.2 Plan de calidad, defecto de pegado. [26]

Frecuencia	Especificación	Responsable	Referencia	Plan de reacción
En aprobación de primera pieza y en la revisión de las muestras de la escalera de calidad	De acuerdo a los establecido en I-FEE-E-01-21 Aprobar primera pieza laminado	<b>Valida:</b> Inspector de calidad, Supervisor de producción. <b>Ajusta:</b> 1er Maquinista de single face, 1er Maquinista de laminadora.	*I-FEE-E-02-45 Realizar escalera de calidad *F-35-FEE-E-02 Validación de arranque de primera pieza *F-11-FEE-E-01 Monitoreo en proceso de Producción *F-22-FEE-E-01 Monitoreo en proceso de producción P3	* Revisar humedad y encolado de los papeles (liner, médium y preimpreso), cambio de rollos, cuando así se determine. * Revisar rodillos dosificadores de almidón y rodillos dosificadores de adhesivo PVA. * Revisar calidad y características de adhesivos (PVA y almidón). * Utilizar rodillo precalentador en laminadora II. * Disminuir velocidad. * Revisar material. * Verificar cumplimiento del plan de proceso. * Detener material y proceder conforme a procedimiento de producto no conforme.

El plan de calidad es un documento de gran ayuda para la resolución de problemas que surgen de manera frecuente y también otros que no se presentan con regularidad. Todos los documentos que

conforman el plan de calidad deben de contener un código de identificación, una fecha de vigencia, un número de versión, número de edición y número de páginas.

Para el caso de la materia prima también se cuenta con documentos dentro del plan de calidad, que ayudan a determinar si la materia prima es aceptada para su posterior procesamiento en la planta o de lo contrario es rechazada y devuelta al proveedor por no cumplir con las especificaciones y criterios de calidad. Por ejemplo, a continuación, se muestra el plan de calidad para determinar la dureza de las bobinas de papel, en el proceso recepción de material, arribado a la planta. Ver tabla 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3 Plan de calidad, dureza. [26]

Característica	Impacto	Objetivo	Método o equipo de medición	Instructivo	Tamaño de la muestra
Dureza fuera de especificaciones	A	Asegurar que la dureza a lo ancho de la bobina sea uniforme y mayor a 35 N/mm <sup>2</sup>	Esclerómetro	I-FEE-E-04-03 Prueba de dureza para bobinas de papel	"n" bobinas según MIL. STD.

Tabla 4.4 Plan de calidad, dureza. [26]

Frecuencia	Especificación	Responsable	Referencia	Plan de reacción
En toda recepción de material enviado por el proveedor, en la revisión a pie de máquina por posibles defectos en los productos.	De acuerdo a los establecido en I-FEE-E-04-03 Aprobar si se cumple con todas las bobinas de muestreo (Military Estándar)	<b>Valida:</b> Laboratorista, Auxiliar de materia prima.	*F-FEE-E-08-45 Métodos de muestreo. *F-35-FEE-E-11 Muestreo por Military Estándar *F-35-FEE-E-07 Calibración Esclerómetro.	* Revisar fecha de calibración del instrumento. * Verificar posición del brazo al momento de ejecutar la medición. * Comprobar la dureza en distintos puntos a lo ancho de la bobina. * Detener material y proceder conforme a procedimiento de producto no conforme.

Con esta documentación se puede realizar una rápida y organizada gestión de los materiales que son enviados por el proveedor. Muchos de los procedimientos ayudan en la gestión integral del control de calidad, incluso, existen procedimientos para gestionar la materia prima que presenta algún tipo de contaminación física (vidrio, metal, polvo), química (aceite, sales, solventes) o biológica (excremento de aves, insectos, o fauna nociva).

Como se pudo observar con el ejemplo anterior, la mayoría de los procedimientos echan mano del sistema de medición; ya que son las variables y atributos que son cuantificadas a través de equipos e

instrumentos de medición, de ahí la importancia de conocer la calidad de las mediciones y la variabilidad que presenta el sistema. Si el sistema presenta sesgos, estos sin duda alguna, contribuirán a interpretar la realidad de forma distinta, debido a que la información (datos) son poco confiables.

Cuando se detecta alguna desviación o parámetros fuera de especificación se inicia un proceso administrativo para justificar el rechazo de la materia prima hacia el proveedor, el cual consiste en someter a un análisis de laboratorio la propiedad, atributo o variable que no cumpla con las especificaciones de entrega pactadas con el proveedor.

Este procedimiento se denomina “No Conformidad” el cual consiste en un reporte de laboratorio que especifica el defecto, propiedad, atributo o variable fuera de especificaciones; así como las consecuencias que este material provocó o pudo haber provocado en caso de procesarse, los cuales pueden ser merma de material por productos defectuosos o tiempo muerto.

Tanto el tiempo muerto, provocado por el paro de producción debido a problemas operativos relacionados con la materia prima, como la merma de material, pueden tener impactos económicos significativos en el negocio. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una “No conformidad”.


FECHA:	08-sep-17	FOLIO:	L-249	DETECTADO EN:	A LA RECEPCIÓN
PROVEEDOR:	EMG	CANTIDAD NO CONFORME (BOBINAS/PIEZAS):	3	CANTIDAD EN Kg:	3,184
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:	LINER 180 g/m <sup>2</sup> -36.5 IN			NÚMERO DE MATERIAL:	400358
REMISIÓN / FACTURA:	80882349	LOTE:	1722693A, 1722693B, 1722697B	FECHA DE RECEPCIÓN:	08-sep-17
<b>DESCRIPCIÓN DEL DEFECTO:</b>					
<p>Informe se detecta al recibo antes de realizar la descarga por parte de EPM y se observan 3 ROLLOS DE PAPEL KRAFT 180 grs.LADEADOS dentro de la unidad de transporte, dichos rollos fueron "GOLPEADOS" entre sí lo que daña una gran cantidad de capas por lo que son desviados a APNC para validación por parte de proveedor, ya que de Ingresarse a proceso el saneo del mismo generaría una cantidad considerable de merma, se informa a transportista sobre las bobinas defectivas y firma remisión de enterado. Se pide envíen sus acciones correctivas al respecto para evitar reincidencias con este tipo de eventos.</p>					
<b>EVIDENCIA DE LA DESVIACIÓN</b>					
					
					
<b>DISPOSICIÓN DEL MATERIAL</b>					
NOTIFICACIÓN	<input type="radio"/>	RECHAZO	<input checked="" type="radio"/>	DEVOLUCIÓN	<input type="radio"/>

Figura 4.1 Ejemplo de una “no conformidad” por capas rotas por transportación. [26]

El procedimiento general para el recibimiento de la materia prima se muestra de forma general en el siguiente diagrama, figura 4.2.

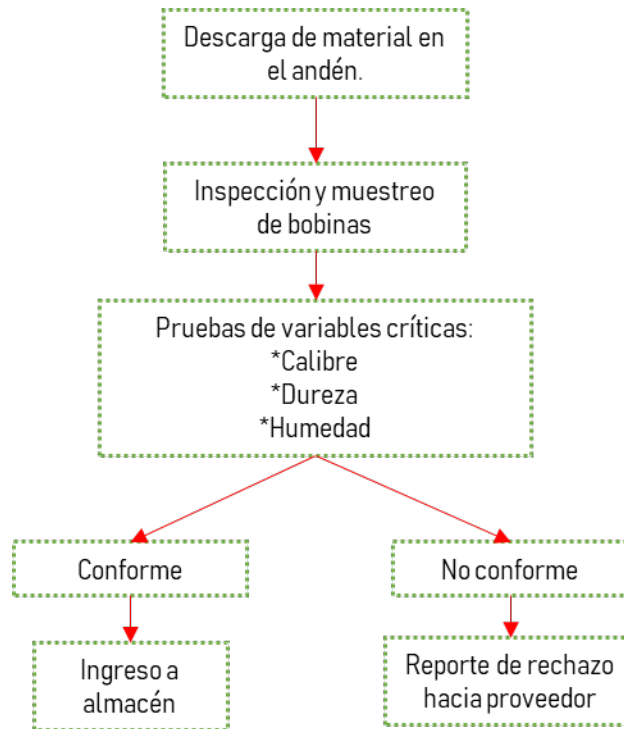


Figura 4.2 Procedimiento general para la recepción de material en planta. [26]

Cuando la materia prima no cumple con las especificaciones y es rechazada, se tiene que enviar el reporte de “no conformidad” hacia el proveedor. Mientras que el proveedor da respuesta para la disposición del material, este se almacena temporalmente en una zona especial del almacén llamada “cuarentena”. La zona de cuarentena está destinada a segregar el material que no es apto para procesarse debido a un defecto o contaminación. El proveedor por lo regular envía a un inspector para validar el defecto y comenzar los trámites de devolución. Cuando al proveedor no le es posible enviar a un inspector, solo procede a aceptar el rechazo y envía una nota de crédito para procesar el material en la planta o regresarlo a sus instalaciones. En algunas ocasiones, por cuestiones económicas, el proveedor prefiere negociar el procesamiento de su materia prima, aunque absorba los costos por tiempo muerto o merma de material, que pagar los costes de transportación por el proceso de devolución.

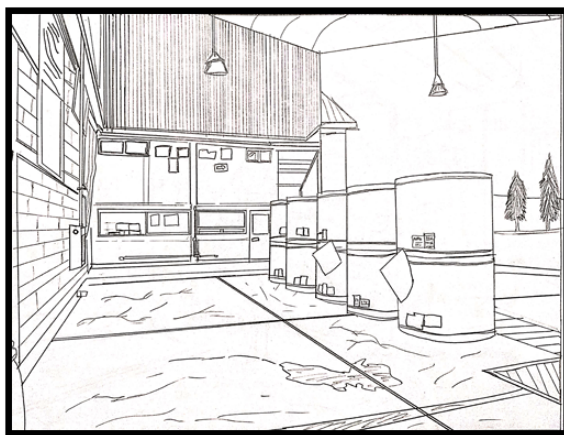
## 4.2 Selección de variables y ensayos de laboratorio

Para aplicar el estudio de reproducibilidad y repetibilidad se consideran aquellas variables que tienen un impacto crítico en la calidad de los productos y que pueden ser detectadas desde la recepción del material a la planta, además de ser responsables de la ocurrencia de problemas durante el procesamiento del material. También se tomará en cuenta una variable de producto terminado, con el objetivo de tener una visión global del sistema de medición y su relación con la materia prima.

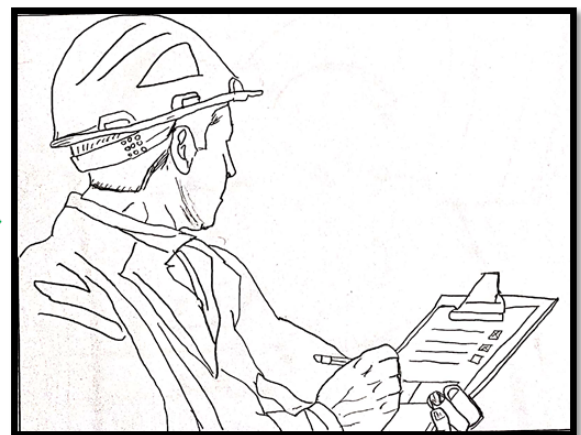
Debido a lo anterior, las variables de calibre, dureza de la bobina serán seleccionadas para evaluar el sistema de medición en el control de calidad de materia prima, mientras que la prueba de Integrity Test corresponderá al control de calidad de producto terminado. Para las dos primeras pruebas se utilizará un estudio de R&R largo, mientras que para la tercera se utilizará un estudio de R&R para pruebas destructivas. Esto permitirá la evaluación del sistema de forma global a lo largo del proceso.

### 4.2.1 Procedimiento para realizar la prueba de calibre y dureza.

A continuación, se muestra la figura 4.3 y 4.4 en donde se muestra como realizar la prueba de calibre.



**Descarga de materia prima al andén de almacén.**

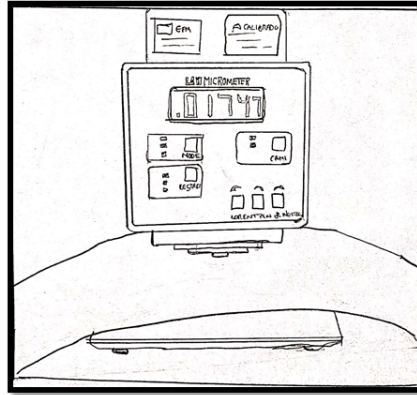


**Inspección de material arribado y validación de lote.**

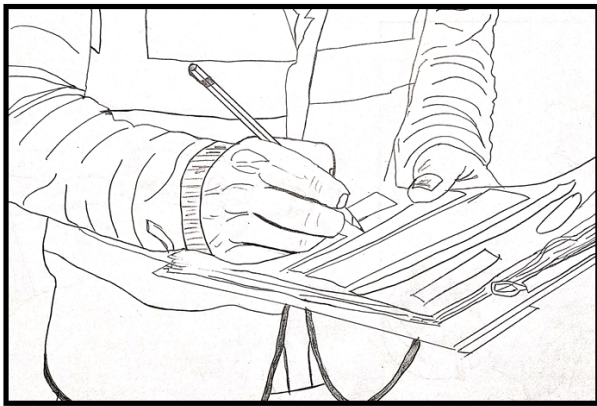
*Figura 4.3 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de calibre. [26]*



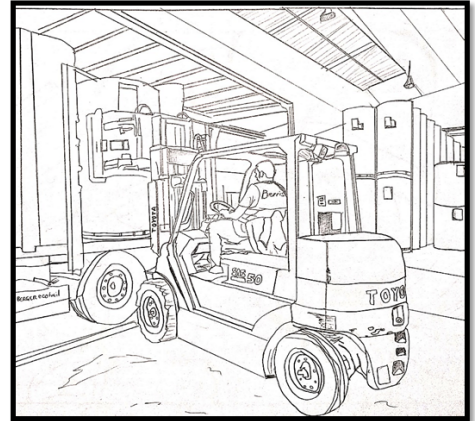
Muestra de bobina de papel.



Medición del calibre (micrómetro)



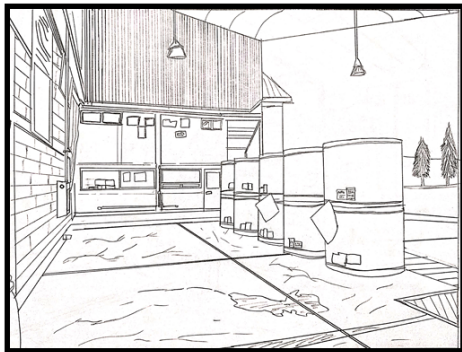
Registro de resultados de la prueba.



Si el material es conforme, se ingresa al almacén.

Figura 4.4 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de calibre. [26]

De manera análoga en la figura 4.5, se muestra el procedimiento para la prueba de dureza.

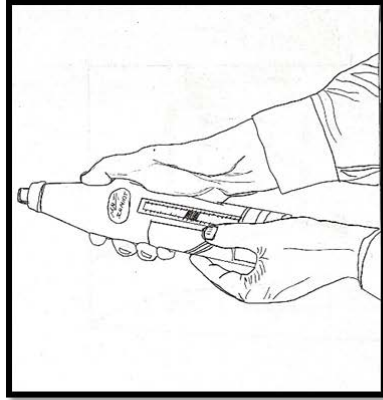


Descarga de materia prima al andén de almacén.

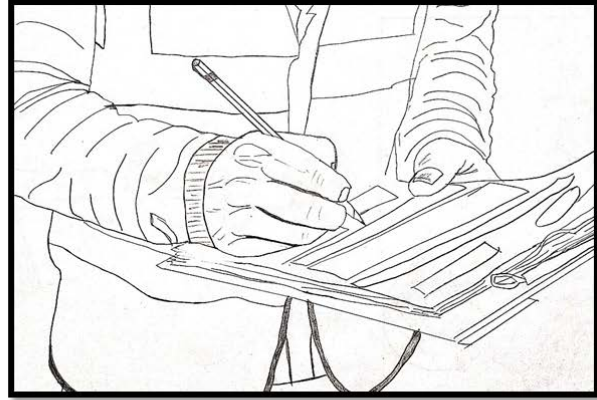


Inspección de material arribado y validación de lote.

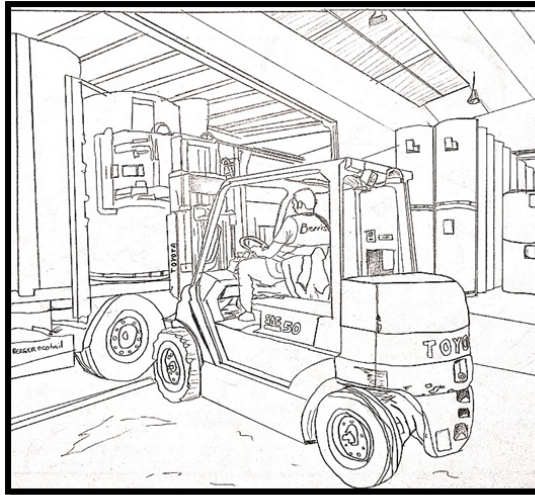




Medición de dureza  
(esclerómetro)



Registro de resultados  
de la prueba.



Si el material es conforme, se  
ingresa al almacén.

Figura 4.5 Procedimiento general para el recibo y muestreo de material para la prueba de dureza. [26]

#### 4.2.2 Procedimiento para realizar la prueba de Integrity Test.

De la misma forma en la figura 4.6 se muestra un procedimiento general para realizar la prueba de Integrity Test.

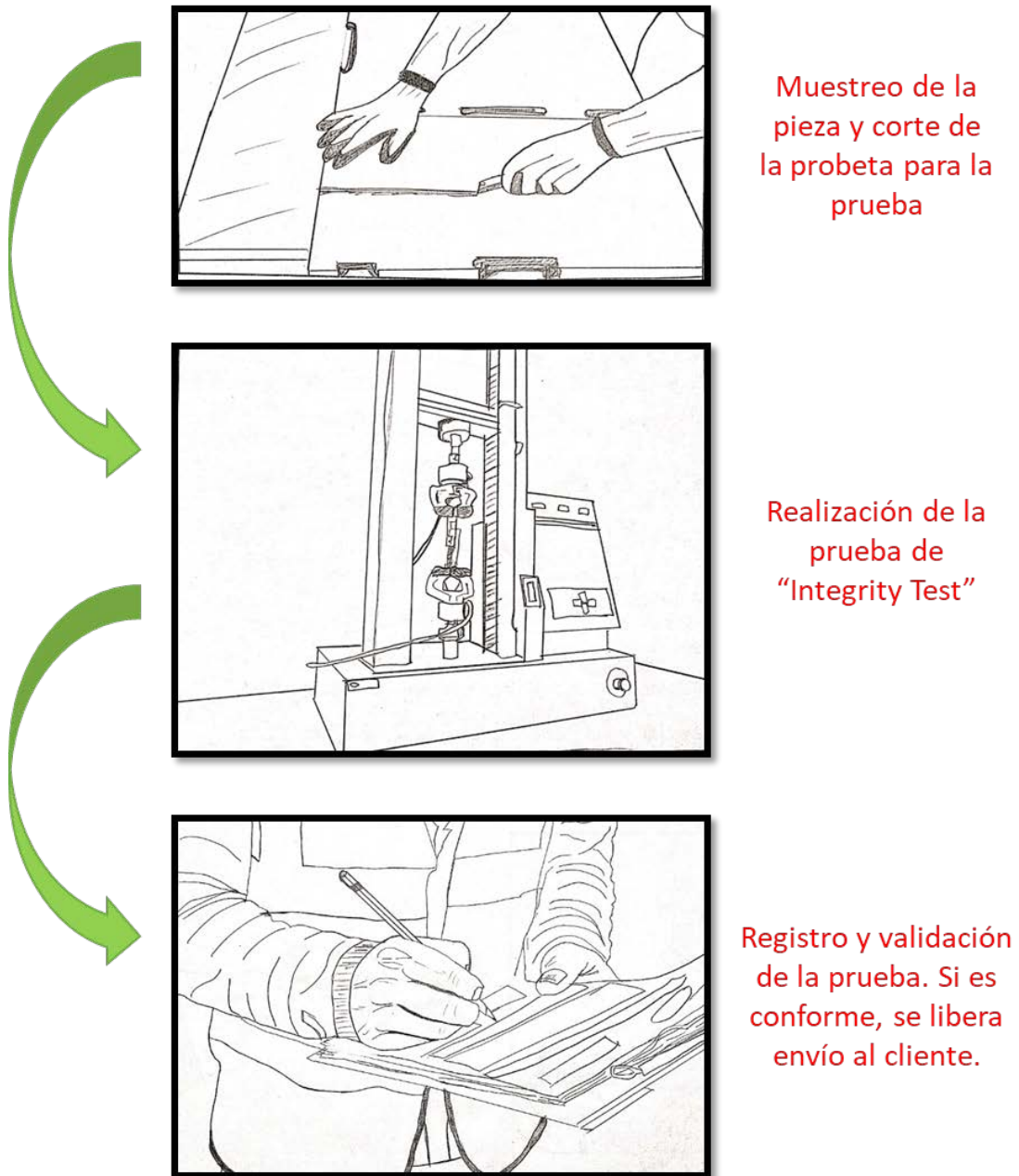


Figura 4.6 Procedimiento general de muestreo de producto terminado para la prueba de IT. [26]

## 4.3 Aplicación de estudio R&R

Como se trató en la sección 3.3, existen muchas formas de aplicar un estudio de R&R, así como, diversos tipos de estudios. Sin embargo, existe una metodología estándar para que la aplicación sea menos variable y más confiable. En la sección 3.3 se enumeran el orden y la secuencia de actividades para aplicar el estudio, por lo que, tomando como referencia esa metodología, se diseñó los procedimientos para aplicar el estudio de R&R que se realizó en este trabajo.

A continuación, se presenta de la de la metodología diseñada, en donde se indica paso a paso la secuencia de actividades, así como recomendaciones generales:

- 1** Se seleccionaron tres operadores, en este caso se tratan de laboratoristas, para la realización de las mediciones.
- 2** Se seleccionaron un conjunto de 10 partes o piezas (muestras) que fueron medidas varias veces por cada operador. Se procuró que la selección se haya realizado a partir de piezas que reflejaron las diferentes dimensiones de piezas que se producen. Para pruebas destructivas el número de partes será equivalente al número de ensayos, debido a que una parte no puede ser medida más de una vez. Para realizar el muestreo se usaron tablas militares (Military Standard).
- 3** Se consideró dos ensayos o número de veces que cada operador midió la parte o muestra, en un estudio largo se deben hacer por lo menos dos ensayos por operador.
- 4** Se identificó cada muestra o parte con un número y se dieron a cada operador en forma aleatoria. Se identificó la zona o punto en la parte donde la medición se tomó, así como la técnica que aplicó el operador.
- 5** Cuando el operador “A” realizó en orden aleatorio sus primeras mediciones se vuelven a aleatorizar las partes o piezas y se le dan al operador “B” para que realice sus primeras mediciones. Este procedimiento se repite con el operador “C” y así sucesivamente con el total de operadores elegidos.
- 6** Cuando los operadores hayan realizado las primeras mediciones de todas las partes se repite el paso anterior hasta completar el número total de ensayos elegidos.
- 7** Se realiza el registro de los valores obtenidos por cada operador, en cada uno de los ensayos.
- 8** Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio acerca de la calidad del proceso de medición y decidir acciones futuras sobre el mismo.

---

Aunque existen diferentes tipos de metodologías para aplicar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad, en términos generales, el procedimiento descrito anteriormente cumple con los requisitos básicos del diseño de experimentos R&R, principalmente el uso de la secuencia aleatoria para la medición de cada parte.

Dentro de las recomendaciones, si se desea utilizar este procedimiento, se debe de asegurar de que los resultados previos de un ensayo no sean conocidos por los operadores. Es decir, en cada medición realizada el operador no debe conocer cuál pieza está midiendo, ni cuáles fueron sus mediciones anteriores sobre ella, menos las reportadas por los demás operadores.

También se recomienda que los operadores ya hayan trabajado por lo menos 2 horas de su jornada laboral rutinaria antes de realizar la prueba, con el propósito de que se tenga la suficiente destreza física para no cometer errores en la medición. Sobre todo, en pruebas donde se requiere aplicar fuerza con los brazos. Es recomendable que la prueba se realice con las mínimas distracciones posibles, por ejemplo, evitar contestar el teléfono, el radio walkie-talkie o que el personal de los demás departamentos interrumpa cuando se está aplicando el estudio; ya que estos factores pueden provocar desconcentración en los operarios.

## 5

## Resultados de los estudios de Reproducibilidad y Repetitividad

### 5.1 Procesamiento de los datos.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los estudios de reproducibilidad y repetibilidad (R&R). Es importante recordar que los estudios de R&R aplicados para las pruebas de calibre y dureza de bobina son del tipo estudio R&R largo, mientras que el estudio aplicado para la prueba de Integrity Test, que como se mencionó en la sección 3.3.3, es un estudio de R&R para pruebas destructivas.

A continuación, se presentan los datos obtenidos del estudio para cada prueba; cabe mencionar que antes de aplicar la metodología estadística para la evaluación del sistema de medición es necesario efectuar pruebas de normalidad a las mediciones para saber si se comportan como una distribución normal. Los datos obtenidos del estudio R&R para la prueba de calibre se pueden observar en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 para cada operador. Así mismo los resultados para la prueba de dureza de bobina que realizó cada operador se pueden observar en la tabla 5.4, 5.5, y 5.6.

Estas pruebas fueron realizadas utilizando la metodología de un estudio R&R largo.

Tabla 5.1 Resultados para la prueba de calibre, operador A. [26]

N° de Prueba	Pieza	Replica	Medición (pts)
1	1	1	19.48
2	2	1	18.68
3	3	1	19.5
4	4	1	19.38
5	5	1	19.21
6	6	1	19.44
7	7	1	19.42
8	8	1	19.24
9	9	1	19.09
10	10	1	18.83
11	1	2	19.45
12	2	2	18.65
13	3	2	19.24
14	4	2	19.47
15	5	2	19.28
16	6	2	19.39
17	7	2	19.43
18	8	2	19.56
19	9	2	18.98
20	10	2	18.94

Tabla 5.2 Resultados para la prueba de calibre, operador B. [26]

N° de Prueba	Pieza	Replica	Medición (pts)
1	1	1	19.38
2	2	1	18.52
3	3	1	19.42
4	4	1	19.29
5	5	1	19.26
6	6	1	19.4
7	7	1	19.39
8	8	1	19.19
9	9	1	19.15
10	10	1	18.77
11	1	2	19.24
12	2	2	18.54
13	3	2	19.31
14	4	2	19.01
15	5	2	19.47
16	6	2	19.23
17	7	2	19.46
18	8	2	19.12
19	9	2	19.34
20	10	2	18.84

Tabla 5.3 Resultados para la prueba de calibre, operador C. [26]

N° de Prueba	Pieza	Replica	Medición (pts)
1	1	1	19.29
2	2	1	18.55
3	3	1	19.47
4	4	1	19.34
5	5	1	19.24
6	6	1	19.43
7	7	1	19.41
8	8	1	19.22
9	9	1	19.13
10	10	1	18.81
11	1	2	19.35
12	2	2	18.64
13	3	2	19.42
14	4	2	19.45
15	5	2	19.17
16	6	2	19.5
17	7	2	19.13
18	8	2	19.26
19	9	2	18.99
20	10	2	18.57

Tabla 5.4 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador A. [26]

N° de prueba	Parte	Replica	Medición (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	1	40
2	2	1	42
3	3	1	40
4	4	1	42
5	5	1	45
6	6	1	43
7	7	1	43
8	8	1	40
9	9	1	43
10	10	1	40
11	1	2	40
12	2	2	42
13	3	2	41
14	4	2	43
15	5	2	45
16	6	2	43
17	7	2	43
18	8	2	41
19	9	2	42
20	10	2	39

Tabla 5.5 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador B. [26]

N° de prueba	Pieza	Replica	Medición (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	1	41
2	2	1	40
3	3	1	40
4	4	1	42
5	5	1	42
6	6	1	41
7	7	1	40
8	8	1	40
9	9	1	40
10	10	1	41
11	1	2	39
12	2	2	40
13	3	2	40
14	4	2	42
15	5	2	43
16	6	2	40
17	7	2	40
18	8	2	40
19	9	2	41
20	10	2	41

Tabla 5.6 Resultados para la prueba de dureza de bobina, operador C. [26]

N° de prueba	Pieza	Replica	Medición (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	1	42
2	2	1	40
3	3	1	40
4	4	1	42
5	5	1	44
6	6	1	39
7	7	1	41
8	8	1	41
9	9	1	40
10	10	1	40
11	1	2	43
12	2	2	40
13	3	2	40
14	4	2	42
15	5	2	43
16	6	2	40
17	7	2	40
18	8	2	40
19	9	2	39
20	10	2	41



Tabla 5.7 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador A. [26]

N° de prueba	Parte	Replica	Medición (N)
1	1	1	20.43
2	2	1	21.56
3	3	1	19.41
4	4	1	20.02
5	5	1	19.65
6	6	1	19.34
7	7	1	27.07
8	8	1	28.69
9	9	1	23.68
10	10	1	22.49
11	1	2	21.09
12	2	2	21.65
13	3	2	21.25
14	4	2	21.05
15	5	2	20.84
16	6	2	19.89
17	7	2	28.04
18	8	2	29.07
19	9	2	22.53
20	10	2	21.87

Tabla 5.8 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador B. [26]

N° de prueba	Parte	Replica	Medición (N)
1	1	1	20.68
2	2	1	21.34
3	3	1	20.75
4	4	1	20.23
5	5	1	19.2
6	6	1	19.62
7	7	1	26.79
8	8	1	28.39
9	9	1	24.32
10	10	1	22.07
11	1	2	20.98
12	2	2	21.53
13	3	2	20.94
14	4	2	20.87
15	5	2	20.09
16	6	2	19.99
17	7	2	27.33
18	8	2	28.67
19	9	2	24.15
20	10	2	21.74

Tabla 5.9 Resultados para la prueba de Integrity Test, operador C. [26]

N° de prueba	Parte	Replica	Medición (N)
1	1	1	21.24
2	2	1	21.47
3	3	1	20.56
4	4	1	20.19
5	5	1	20.58
6	6	1	19.45
7	7	1	26.84
8	8	1	29.54
9	9	1	24.1
10	10	1	21.98
11	1	2	20.84
12	2	2	21.02
13	3	2	20.04
14	4	2	21.03
15	5	2	19.89
16	6	2	20.11
17	7	2	26.88
18	8	2	29.06
19	9	2	23.86
20	10	2	22.69

Para realizar la prueba de normalidad se utilizó el software Minitab 17 que se incluye dentro de su paquete estadístico. Aunque el objetivo de este trabajo no es explicar en qué consisten estas pruebas de inferencia estadística es conveniente explicar que estas pruebas son de gran utilidad para saber si un conjunto de datos proviene de una población distribuida normalmente.

Existen tres tipos de pruebas de normalidad sin embargo en este trabajo se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05. A continuación, se presentan las pruebas de normalidad para cada prueba que realizaron los operadores.

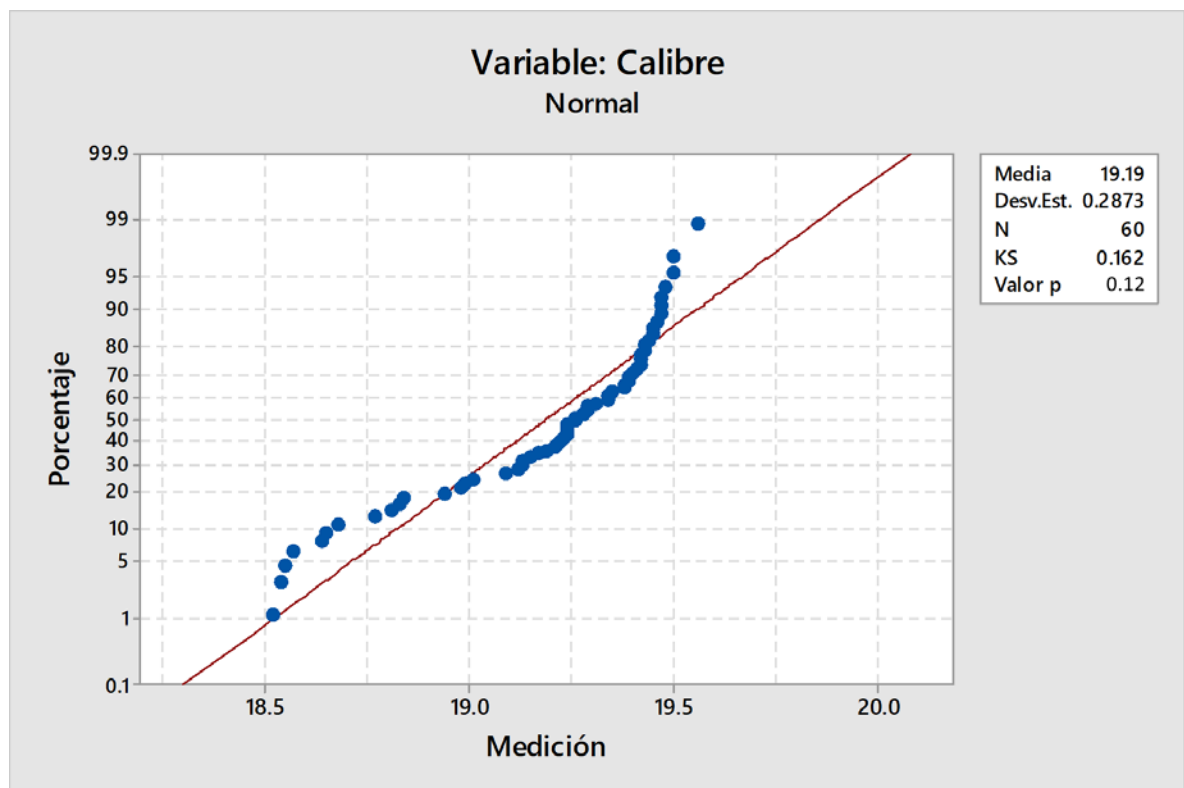


Figura 5.1 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de calibre. [26]

Para determinar si los datos no siguen una distribución normal, se compara el valor p con el nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como  $\alpha$ ) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que los datos no siguen una distribución normal, cuando los datos sí siguen una distribución normal.

Para el caso de la variable de calibre se plantea las siguientes hipótesis:

$h_0$  = Los datos de calibre tienen una distribución normal sí el estadístico valor p es mayor que el nivel de significancia alfa.

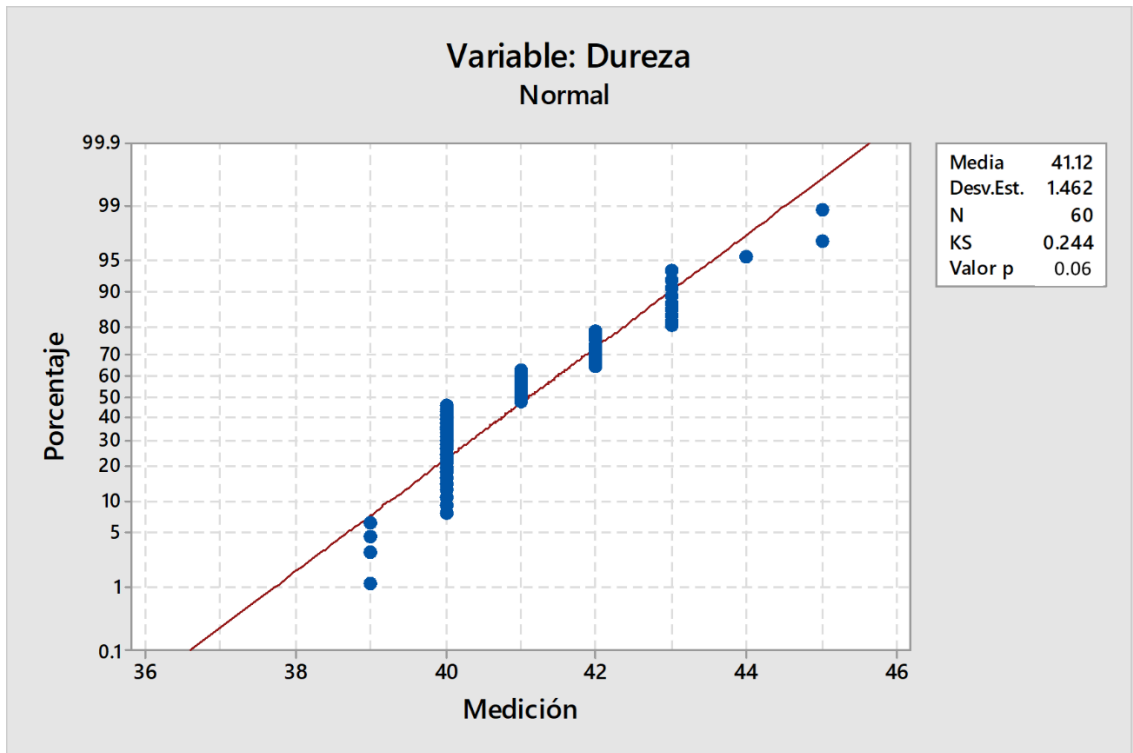


Figura 5.2 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de dureza. [26]

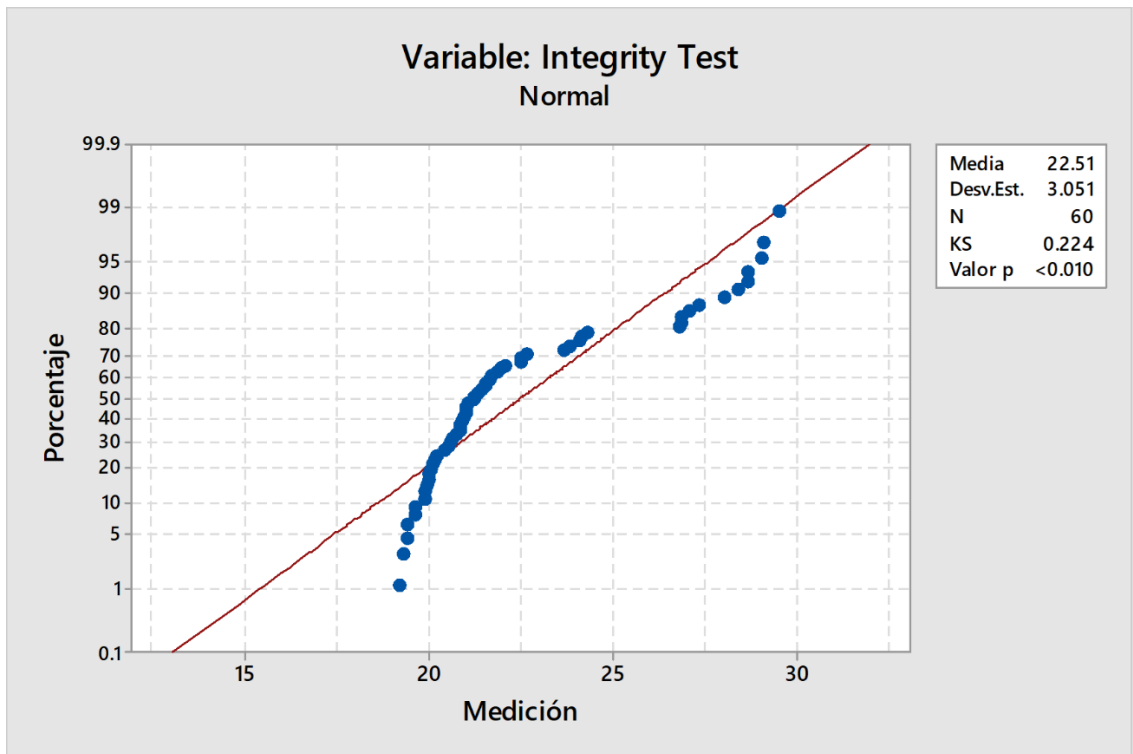


Figura 5.3 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov para la variable de Integrity Test. [26]

Luego entonces, la hipótesis alterna queda de la siguiente forma:

$h_1$  = Los datos de calibre no tienen una distribución normal si el estadístico valor p es menor que el nivel de significancia alfa.

Dado lo anterior y de acuerdo con la figura 5.1, el valor reportado en la gráfica de valor p es de 0.12 para el caso de la variable de calibre, por lo que no se rechaza la hipótesis nula  $h_0$ , ya que no hay evidencia suficiente para concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Lo mismo ocurre para las variables de dureza e integrity test, se plantean las mismas hipótesis y se realizan los cálculos para obtener el valor p de la prueba. Como podemos observar en la figura 5.2 y 5.3, para la variable de dureza y calibre respectivamente, no se rechaza la hipótesis nula, debido a que los valores p calculados son mayores que el valor de significancia alfa.

Sin embargo, podemos ver para estos dos últimos casos, el valor p está apenas por arriba del valor de significancia, por lo que es probable que, si se tuvieran más datos, quizás podríamos observar que los valores reportados en la prueba no sigan dicha distribución. La importancia de que los datos se comporten como una distribución normal es porque esta distribución proporciona la base para la estadística inferencial clásica, por su relación con el teorema de límite central. Haciendo la suposición de que los datos para las variables de dureza e integrity test se lleguen a comportar siguiendo una distribución diferente, pero se aproximen a una distribución normal, existe una ventaja, ya que la distribución normal sirve para acercarse a diversas distribuciones de probabilidad discreta, como la distribución binomial y la distribución de Poisson. Por lo tanto, como podemos ver en las figuras 5.2 y 5.3, los valores p para ambas variables pueden ser aceptables para interpretarse como una distribución normal.

Después de haber realizado las pruebas de normalidad para conocer el comportamiento y la distribución que siguen los datos, es posible aplicar el análisis de medición. Se utilizó el paquete de herramientas de calidad que contiene Minitab 17, en donde se incluye la opción para realizar un estudio de medición. Ver figura 5.4.

Después se selecciona el tipo de estudio R&R adecuado para cada caso, de acuerdo con lo especificado al inicio de la sección 5.1. Una vez seleccionado el tipo de análisis, el software permite personalizar los parámetros estadísticos para desarrollar el cálculo. Entre los parámetros que se pueden ajustar se encuentran: el número de variaciones estándar que considera el cálculo, la tolerancia del proceso, la desviación estándar histórica, el término de interacción alfa, probabilidades de clasificación errada, contribución porcentual, variación porcentual del estudio, etc.

Para el caso de la tolerancia del proceso, se pueden personalizar los límites de las especificaciones superior o inferior, lo cual es de ayuda para poder detectar valores fuera del rango de aceptación para una variable ya estandarizada.

## 5.2 Resultados del estudio.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la variable de **Calibre**:


<i>Tabla 5.10</i>	Resultados para: Calibre	<b>Minitab</b> 
Estudio R&R del Sistema de Medición - Método ANOVA		

Tabla ANOVA de dos factores con interacción						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Parte	9	4.16591	0.462879	25.5402	0.000	
Operario	2	0.05724	0.028622	1.5793	0.233	
Parte * Operario	18	0.32622	0.018124	1.7012	0.096	
Repetibilidad	30	0.31960	0.010653			
Total	59	4.86897				

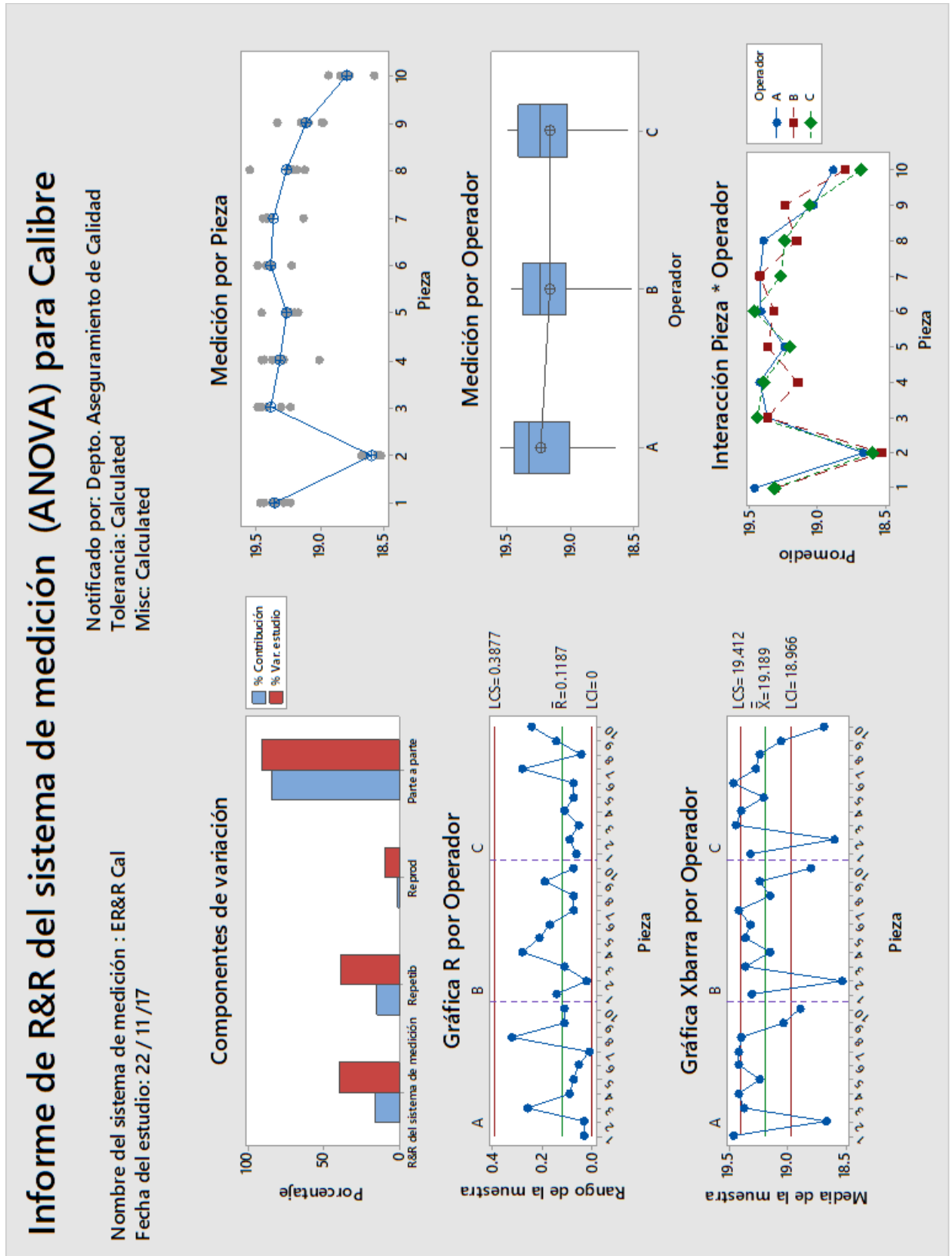
$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Tabla ANOVA dos factores sin interacción						
Fuente	GL	SC	MC	F	P	
Parte	9	4.16591	0.462879	34.4029	0.000	
Operario	2	0.05724	0.028622	2.1273	0.130	
Repetibilidad	48	0.64582	0.013455			
Total	59	4.86897				

R&R del sistema de medición				
Fuente	CompVar	(de CompVar)		
Gage R&R total	0.0142130	15.95		
Repetibilidad	0.0134547	15.10		
Reproducibilidad	0.0007584	0.85		
Operario	0.0007584	0.85		
Parte a parte	0.0749040	84.05		
Variación total	0.0891170	100.00		
		%Var.		
Fuente	Desv.Est.	Var. estudio	estudio	
	(DE)	(6 × DE)	(%VE)	
Gage R&R total	0.119218	0.71531	39.94	
Repetibilidad	0.115994	0.69597	38.86	
Reproducibilidad	0.027538	0.16523	9.22	
Operario	0.027538	0.16523	9.22	
Parte a parte	0.273686	1.64212	91.68	
Variación total	0.298525	1.79115	100.00	

Número de categorías distintas = 7

Figura 5.4. Resultados estudio R&R, Calibre. [26]



Resultados obtenidos para la variable de: **Dureza**


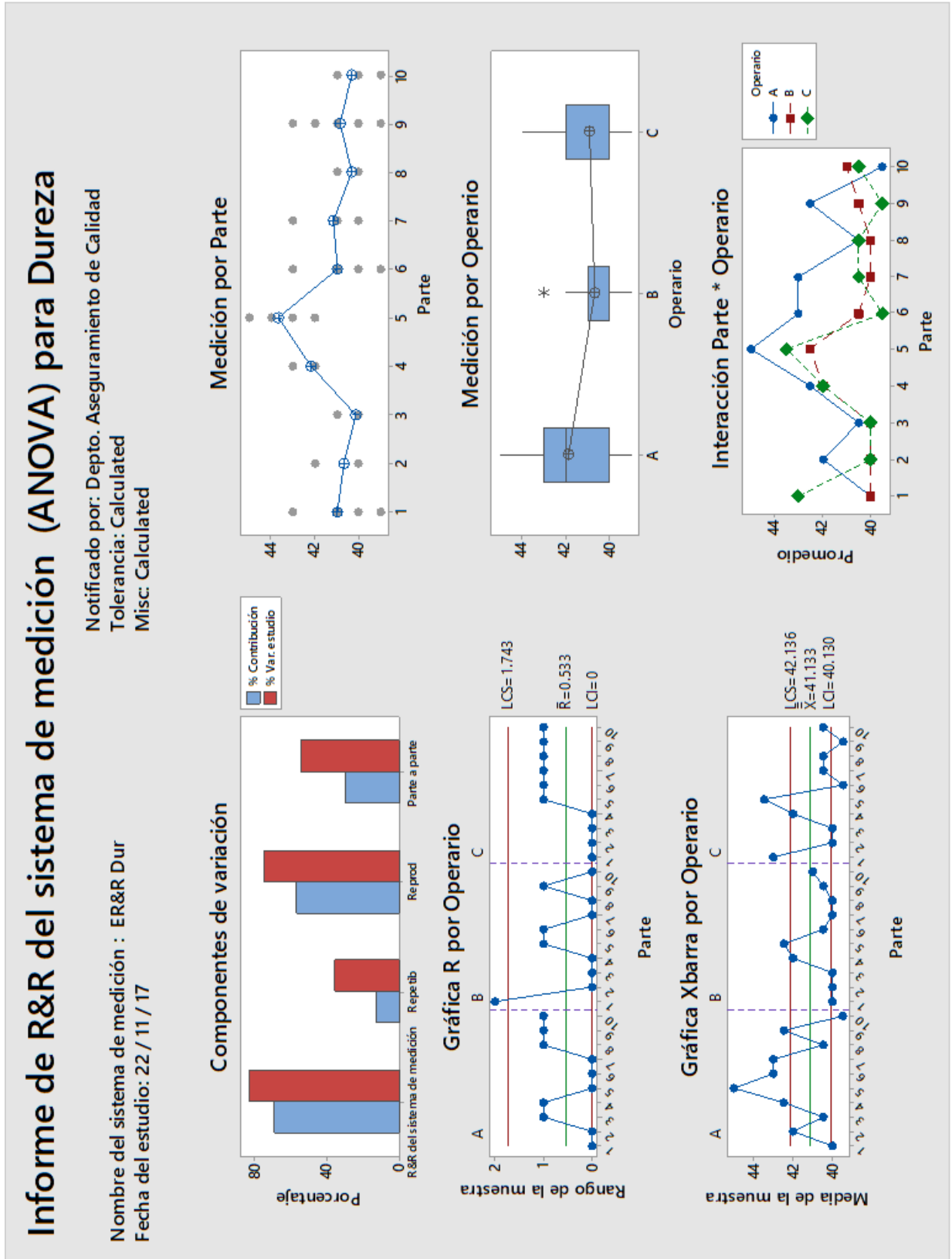
<i>Tabla 5.11</i>	Resultados para: Dureza	Minitab 
Estudio R&R del Sistema de Medición - Método ANOVA		

Tabla ANOVA de dos factores con interacción					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parte	9	60.267	6.69630	2.76241	0.032
Operario	2	16.033	8.01667	3.30710	0.060
Parte * Operario	18	43.633	2.42407	8.08025	0.000
Repetibilidad	30	9.000	0.30000		
Total	59	128.933			
α para eliminar el término de interacción = 0.05					


R&R del sistema de medición			
Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)	
Gage R&R total	1.64167	69.75	
Repetibilidad	0.30000	12.75	
Reproducibilidad	1.34167	57.00	
Operario	0.27963	11.88	
Operario*Parte	1.06204	45.12	
Parte a parte	0.71204	30.25	
Variación total	2.35370	100.00	
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	1.28128	7.68765	83.52
Repetibilidad	0.54772	3.28634	35.70
Reproducibilidad	1.15830	6.94982	75.50
Operario	0.52880	3.17280	34.47
Operario*Parte	1.03055	6.18331	67.17
Parte a parte	0.84382	5.06294	55.00
Variación total	1.53418	9.20507	100.00
Número de categorías distintas = 3			



Figura 5.5. Resultados estudio R&R, Dureza. [26]



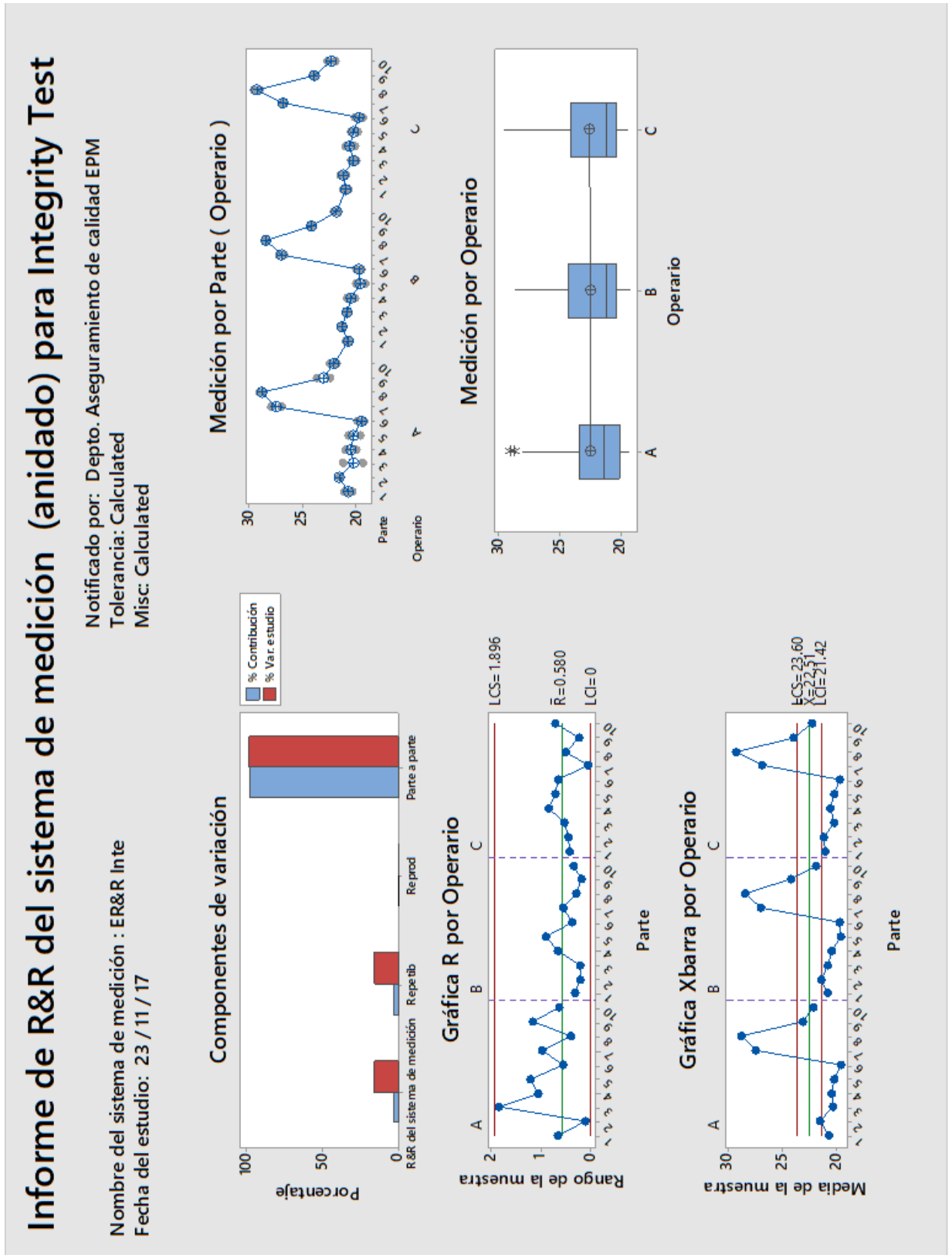
Resultados obtenidos para la variable de: **Integrity Test**

<i>Tabla 5.12</i>	Resultados para: Integrity Test	<b>Minitab</b> 
Estudio R&R del sistema de Medición - ANOVA anidado		

R&R del sistema de medición (anidado) para Integrity Test					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parte	9	60.267	6.69630	2.76241	0.032
Operario	2	16.033	8.01667	3.30710	0.060
Parte * Operario	18	43.633	2.42407	8.08025	0.000
Repetibilidad	30	9.000	0.30000		
Total	59	128.933			
α para eliminar el término de interacción = 0.05					

R&R del sistema de medición			
Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)	
Gage R&R total	0.2409	2.37	
Repetibilidad	0.2409	2.37	
Reproducibilidad	0.0000	0.00	
Parte a parte	9.9163	97.63	
Variación total	10.1572	100.00	
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.49081	2.9448	15.40
Repetibilidad	0.49081	2.9448	15.40
Reproducibilidad	0.00000	0.0000	0.00
Parte a parte	3.14901	18.8941	98.81
Variación total	3.18703	19.1222	100.00
Número de categorías distintas = 9			

Figura 5.6. Resultados estudio R&R, Integrity Test. [26]



## 5.3 Análisis de resultados.

### 5.3.1 Calibre

Una vez obtenido los resultados del estudio R&R para cada variable que se evaluó, podemos observar que, para la variable de **calibre**, el componente varianza (CompVar) ayuda a distinguir la variación de cada fuente de error de medición con la variación total. En los resultados de la columna **%Contribución** de la tabla R&R del sistema de medición, tabla 5.7, muestra que la variación entre las partes (Parte a parte) es de **84.05%**. Este valor es mucho mayor que el **R&R total del sistema de medición**, que es **15.95%**. por lo tanto, gran parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes. Lo que significa que gran parte de la variación se debe al proceso de fabricación de las piezas.

La columna de **%Var del estudio**, tabla 5.7, demuestra la variación del sistema de medición con respecto con la variación total. El R&R total del sistema de medición equivale al **39.94%** de la variación del estudio.

Para estos datos, el **número de categorías distintas** es **7**. De acuerdo con la AIAG, se necesitan al menos **5** categorías distintas para tener un sistema de medición adecuado.

El número de categorías distintas representa el número de intervalos de confianza no superpuestos que abarcarán el rango de variación del producto. También puede entenderse como el número de grupos dentro de los datos del proceso que el sistema de medición puede discernir.

$$\text{Número de categorías distintas} = \frac{\text{desviación estándar para Partes}}{\text{desviación estándar para sistema de medición}} * 1.41$$

Minitab trunca este valor, excepto cuando el valor es menor que 1. En ese caso, Minitab establece el número de categorías distintas de 7.

Dicho de otra forma, es un criterio de aceptación estadístico que nos indica el número de categorías en las cuales el proceso puede dividirse. En la tabla 5.10 se puede observar con mayor claridad este concepto.

Las gráficas que se pueden observar en la figura 5.4, para la variable de calibre, también son de mucha utilidad para poder interpretar los resultados del estudio:

En la gráfica **“Componentes de variación”**, figura 5.4, el porcentaje de contribución de “Parte a parte” es mayor que el total del sistema de medición. Por lo tanto, gran parte de la variación se debe

a las diferencias entre las partes. Es decir, prácticamente toda la variación se debe a la variabilidad que poseen las partes con base a su fabricación.

La **gráfica R** por operador muestra que todos los operadores miden las partes de manera consistente.

*Tabla 5.13. Número de categorías distintas como criterio de aceptación. [26]*

Número de categorías	Control	Análisis
	Puede ser usado para control solo si: <ul style="list-style-type: none"> <li>- La variación del proceso es pequeña al compararla a las especificaciones.</li> <li>- La función perdida es plana sobre la variación del proceso esperado.</li> </ul> La fuente principal de variación causa un cambio promedio.	- <b>Inaceptable</b> para la estimación de parámetros del proceso e índices Sólo indica si el proceso está produciendo partes conformes o no conformes.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede ser utilizado con técnicas de control semi-variables basadas en la distribución del proceso.</li> </ul> Puede producir cartas de control por variables insensibles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generalmente no aceptable para estimación de parámetros de proceso e índices ya que sólo proporciona estimados gruesos.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede ser utilizado con cartas de control por variables.</li> </ul>	<b>Recomendado.</b>

En la **gráfica X barra** por operador, se puede observar que algunos de los puntos se encuentran fuera de los límites de control. Por lo tanto, la mayor parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes.

La **gráfica Medición por Pieza**, muestra que las diferencias entre las partes son ligeramente grandes.

En la **gráfica Por Operador**, las diferencias entre los operadores son medianamente más pequeñas que las diferencias entre las partes, pero son significativas (valor  $p = 0.233$ ). Las mediciones del operador A son ligeramente mayores que las mediciones de los otros operadores.

En la **gráfica Interacción pieza\*operador**, las líneas no son paralelas respecto una de otra y el valor p de la interacción pieza\*operador que se encuentra en la tabla 5.7 es de **0.096**. Estos resultados indican que existe una interacción significativa entre cada parte y operador.

### 5.3.2 Dureza

Para la variable de **dureza**, el componente varianza (CompVar) ayuda a distinguir la variación de cada fuente de error de medición con la variación total. En los resultados de la columna **%Contribución** de la tabla R&R del sistema de medición, tabla 5.8, muestra que la variación entre las partes (Parte a parte) es de **30.25%**. Este valor es menor que el **R&R total del sistema de medición**, que es **69.75%** por lo tanto, gran parte de la variación se debe a los procedimientos de medición que realizan los operadores. Lo que significa que gran parte de la variación se debe a como miden las piezas los operadores y que no siguen los procedimientos correctos para medir o que existen factores que alteran la medición (medio ambiente, operador, etc.).

La columna de **%Var del estudio**, tabla 5.8, demuestra la variación del sistema de medición con respecto con la variación total. El **R&R total del sistema de medición** equivale al **83.52%** de la variación del estudio.

Para estos datos, el **número de categorías distintas** es **3**. De acuerdo con la AIAG, se necesitan al menos **5** categorías distintas para tener un sistema de medición adecuado.

Las gráficas que se pueden observar en la figura 5.5, para la variable de dureza, también son de mucha utilidad para poder interpretar los resultados del estudio:

En la gráfica **“Componentes de variación”**, figura 5.5, el porcentaje de contribución de **“R&R del sistema de medición”** es mayor que el total del sistema de medición. Por lo tanto, gran parte de la variación se debe a las diferencias entre como miden las partes los operadores.

La **gráfica R por operador**, figura 5.5, muestra que todos los operadores miden las partes de manera más o menos consistente, sin embargo, el operador B presenta mucho mayor variación al momento de realizar sus mediciones. Incluso la primera medición que realiza el operador B esta fuera del límite de control superior, lo que significa, que el operador no solo realiza mal la medición desde el punto de vista estadístico, también representa un problema si el operador basa su criterio de rechazo en este dato. Es decir, este tipo de datos influyen en la toma de decisiones del operador o laboratorista para

aceptar o rechazar, lotes de materia prima o de producto terminado que quizás cumplen o no cumplen con los criterios de calidad.

En la **gráfica X barra** por operador, figura 5.5, se puede observar que algunos de los puntos se encuentran fuera de los límites de control. Por lo tanto, se puede aseverar que también existe variación con respecto a las partes.

La **gráfica Medición por Pieza**, figura 5.5, muestra que las diferencias entre las partes son significativas con cada respecto a cada operador.

En la **gráfica Por Operador**, figura 5.5, las diferencias entre los operadores son significativas, al igual que las diferencias entre las partes, (valor  $p = 0.060$ ). Las mediciones que realiza el operador B son valores más bajos en magnitud que las reportadas por los otros operadores.

En la **gráfica Interacción pieza\*operador**, figura 5.5, las líneas no son paralelas respecto una de otra y el valor  $p$  de la interacción pieza\*operador que se encuentra en la tabla 5.8 es de **0.00**. Estos resultados indican que existe interacción entre cada parte y operador. Las líneas que no son paralelas o que se cruzan indican que la capacidad de un operador para medir una parte de manera consistente depende de la parte que se está midiendo. Una línea que es consistentemente más alta o más baja que las demás indica que un operador agrega sesgo a la medición.

### 5.3.3 Integrity Test

Para la variable de **Integrity Test**, en donde se utilizó un estudio de R&R anidado, el componente varianza (CompVar) ayuda a distinguir la variación de cada fuente de error de medición con la variación total. En los resultados de la columna **%Contribución** de la tabla R&R del sistema de medición, tabla 5.9, muestra que la variación entre las partes (Parte a parte) es de **97.63%**. Este valor es mayor que el **R&R total del sistema de medición**, que es **2.37%** por lo tanto, prácticamente toda la variación se debe a la variabilidad que poseen las partes con base a su fabricación.

La columna de **%Var del estudio**, tabla 5.9, demuestra la variación del sistema de medición con respecto con la variación total. El **R&R total del sistema de medición** equivale al **15.40%** de la variación del estudio.

Para estos datos, el **número de categorías distintas** es **9**. De acuerdo con la AIAG, se necesitan al menos **5** categorías distintas para tener un sistema de medición adecuado.

Las gráficas que se pueden observar en la figura 5.6, para la variable de Integrity test, al igual que las anteriores, son de mucha utilidad para poder interpretar los resultados del estudio:

En la gráfica “**Componentes de variación**”, figura 5.6, el porcentaje de contribución de “Parte a parte” es mayor que el total del sistema de medición. Por lo tanto, gran parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes. Lo que significa que gran parte de la variación se debe al proceso de fabricación de las piezas.

La **gráfica R** por operador, figura 5.6, muestra que todos los operadores miden las partes de manera consistente, sin embargo, el operador A presenta mucho mayor variación al momento de realizar sus mediciones. Mientras que los operadores B y C presentan una tendencia muy parecida. Desde el punto de vista estadístico, ninguna medición esta reportada por encima de los límites inferior o superior de control, lo que significa que todos los operadores realizan la medición correctamente.

En la **gráfica X barra** por operador, figura 5.6, se puede observar que la mayoría de los puntos se encuentran fuera de los límites de control. Por lo tanto, se puede aseverar que también existe variación con respecto a las partes, dicho de otra forma, las partes seleccionadas, para el estudio R&R del sistema de medición, si representan la variabilidad típica entre las piezas fabricadas.

La **gráfica Medición por Pieza**, figura 5.6, muestra que las diferencias entre las partes no son significativas con cada respecto a cada operador.

En la **gráfica Por Operador**, figura 5.6, las diferencias entre los operadores tampoco son significativas. Prácticamente las mediciones que realizan los tres operadores son precisas y por lo tanto denotan exactitud en torno a los valores medidos.

## 5.4 Criterios de aceptación.

En general, cada estudio R&R que se realizó tiene como objetivo determinar qué tan bueno es el proceso de medición en el laboratorio de aseguramiento de calidad.

Por lo común un proceso de medición tiene los siguientes criterios de aceptación:



Tabla 5.14. Criterios de aceptación para un sistema de medición [26]

Criterio de aceptación		
% Gage R&R		Proceso de medición
Abajo de 10%	→	Excelente
De 10 a 20%	→	Bueno, aceptable
De 20 a 30%	→	Marginalmente aceptable
Arriba de 30%	→	Inaceptable y debe ser corregido

Para el caso de la variable **calibre**, de acuerdo a la tabla 5.8, el **R&R total del sistema de medición** equivale al **39.94%** de la variación del estudio, con base a la tabla 5.11, el sistema es inaceptable y debe ser corregido. La variable **dureza** tiene un **R&R total del sistema de medición** equivalente al **83.52%** de la variación del estudio, por lo que, al igual que la variable de calibre, el sistema de medición para cuantificar la dureza es inaceptable y debe ser corregido.

Para el caso de la variable de **Integrity Test** tiene un **R&R total del sistema de medición** equivalente al **15.4%** de la variación del estudio, por lo que, a diferencia de los otros dos sistemas, el sistema de medición para cuantificar la tendencia a la ruptura es bueno y aceptable. En la siguiente tabla se puede observar un resumen de los resultados.

Tabla 5.15. Tabla resumen de resultados. [26]

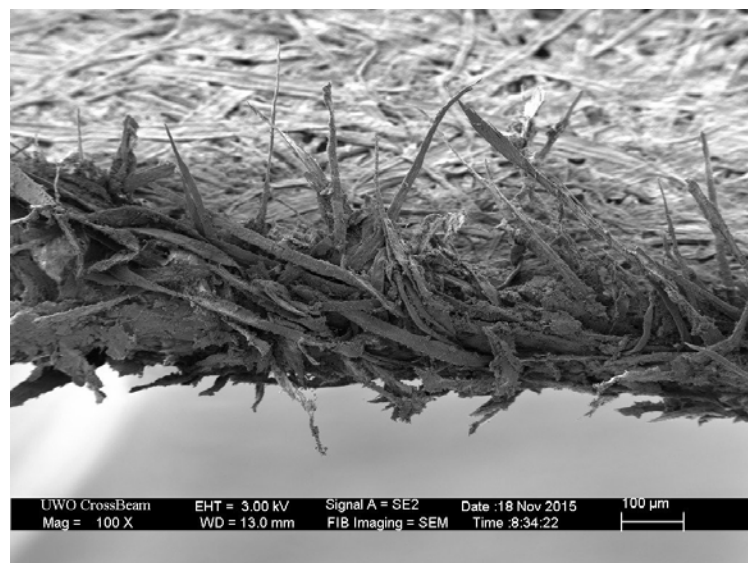
Variable	% R&R total del sistema de medición	Estatus
Calibre	39.94	Inaceptable y debe ser corregido
Dureza	83.52	Inaceptable y debe ser corregido
Integrity Test	15.4	Bueno, aceptable

Podemos concluir que solo un sistema de medición, de los tres considerados, cumple con los criterios de calidad suficiente para considerarlo confiable. El sistema de medición para la variable de **Integrity Test** es clave, ya que se trata de las últimas pruebas de resistencia física que se utiliza para empaques plegadizos y las cajas, para después ser enviados al cliente final. Como se explicó en la sección 2.5, esta variable reporta menos variación debido a que se realiza con un instrumento que no requiere de la destreza de una persona y además se evalúa una propiedad relacionada con la fabricación del

producto final, en donde casi no hay intervención de operarios sino de máquinas, por lo que se evalúa la variación de cómo opera la maquinaria.

Como vemos el sistema funciona adecuadamente y se recomienda que se realicen calibraciones programadas al instrumento y se refuerce la capacitación a los operadores, con el objetivo de conseguir que el sistema sea excelente.

Para el sistema de medición correspondiente a la variable de **calibre** se asume que resultó inaceptable debido a que es una prueba donde interviene mucho la destreza física del personal para realizar la medición, por lo que eso puede explicar el por qué existe variación. Sin embargo, de acuerdo al estudio realizado (tabla 5.10) también existe variación entre las partes, que está relacionado directamente con la calidad de la materia prima, lo cual es importante recordar, ya que a simple vista una hoja de papel puede tener el mismo grosor a lo largo de toda su superficie, sin embargo, cuando se mide con el micrómetro se puede observar que esta hoja no es uniforme u homogénea en su grosor, ver figura 5.10. Es por esto que se deben tomar mediciones por lo menos en 5 puntos a lo largo de un perfil que cubra el ancho de la bobina. Se recomienda que para mejorar el sistema de medición se debe de verificar la calibración del instrumento (micrómetro) ya que existe una mayor % Contribución de la repetibilidad que, de la reproducibilidad, ver figura 5.4. Se recomienda también reforzar la capacitación de los operadores y realizar un estudio para identificar si existen factores ambientales que afecten en el proceso de medición.



*Figura 5.7. Fotografía, en micrómetros, del grosor de una hoja de papel. [25].*

En el caso del sistema de medición correspondiente a la variable de **dureza**, debido a que también es una prueba donde se involucra mucho la destreza física del personal para realizar la medición,

presenta una gran variación atribuida a esta causa. Con base al estudio realizado (tabla 5.11) la variación entre las partes es menor, sin embargo, se debe de tener cuidado y no formular conclusiones incorrectas. Si bien el porcentaje de reproducibilidad y repetibilidad en el sistema de medición es alto, no se debe pensar que las bobinas de papel cumplen con los criterios de aceptación de dureza, si se observa la figura 5.5, también la gráfica de “componentes de variación” nos demuestra que existe variabilidad entre las partes, por lo tanto, esto significa existencia de variación en la dureza de las bobinas que arriban a la planta. En consecuencia, probablemente no presentan la suficiente calidad para ser aceptadas, ya que cuando se realiza la medición, quizás los valores obtenidos de la medición tentarían al operador de aceptar el lote, con la problemática de que quizás no cumplen con la especificación mínima. Esto resulta un problema, ya que como se explicó en la sección 2.2.2, la dureza está relacionada con la tensión de la hoja cuando es procesada en la maquina rotativa, cuando la dureza no es lo suficientemente alta y uniforme a lo largo del ancho de la bobina se presentan problemas con la impresión de las imágenes sobre el papel, lo que se ve reflejado en una mala calidad de producto, perdidas de material (merma) y tiempo muerto. Se recomienda que, para mejorar el sistema de medición, se debe de reforzar la capacitación de los operadores, verificar la calibración del instrumento (esclerómetro) y realizar un estudio para identificar si existen factores ambientales que afecten en el proceso de medición.

En la siguiente página se presenta una tabla a manera de resumen, con los principales puntos analizados con base a los resultados obtenidos para cada sistema.

Tabla 5.16 Resumen de resultados [26]

Variable	%R&R Total del sistema	Componentes de variación	Estatus	Causas	Recomendaciones												
Calibre	39.94	<p>Componentes de variación</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Componente</th> <th>% Contribución</th> <th>% Var. estudio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Repetibilidad</td> <td>~30</td> <td>~30</td> </tr> <tr> <td>Reproducibilidad</td> <td>~10</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>Variación de la materia prima</td> <td>~60</td> <td>~60</td> </tr> </tbody> </table>	Componente	% Contribución	% Var. estudio	Repetibilidad	~30	~30	Reproducibilidad	~10	~10	Variación de la materia prima	~60	~60	Inaceptable y debe ser corregido	Procedimiento incorrecto de medición, variación en la materia prima, factores ambientales.	Verificar la calibración del instrumento (micrómetro), realizar mediciones por lo menos en 5 puntos de un perfil que cubra el ancho de bobina, reforzar la capacitación de los operadores y realizar un estudio para identificar si existen factores ambientales que afecten en el proceso de medición.
Componente	% Contribución	% Var. estudio															
Repetibilidad	~30	~30															
Reproducibilidad	~10	~10															
Variación de la materia prima	~60	~60															
Dureza	83.52	<p>Componentes de variación</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Componente</th> <th>% Contribución</th> <th>% Var. estudio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Repetibilidad</td> <td>~80</td> <td>~80</td> </tr> <tr> <td>Reproducibilidad</td> <td>~20</td> <td>~20</td> </tr> <tr> <td>Variación de la materia prima</td> <td>~100</td> <td>~100</td> </tr> </tbody> </table>	Componente	% Contribución	% Var. estudio	Repetibilidad	~80	~80	Reproducibilidad	~20	~20	Variación de la materia prima	~100	~100	Inaceptable y debe ser corregido	Procedimiento incorrecto de medición, variación en la materia prima, factores ambientales.	Reforzar la capacitación de los operadores y realizar un estudio para identificar si existen factores ambientales que afecten en el proceso de medición.
Componente	% Contribución	% Var. estudio															
Repetibilidad	~80	~80															
Reproducibilidad	~20	~20															
Variación de la materia prima	~100	~100															
Integrity Test	15.4	<p>Componentes de variación</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Componente</th> <th>% Contribución</th> <th>% Var. estudio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Repetibilidad</td> <td>~100</td> <td>~100</td> </tr> <tr> <td>Reproducibilidad</td> <td>~0</td> <td>~0</td> </tr> <tr> <td>Variación de la materia prima</td> <td>~100</td> <td>~100</td> </tr> </tbody> </table>	Componente	% Contribución	% Var. estudio	Repetibilidad	~100	~100	Reproducibilidad	~0	~0	Variación de la materia prima	~100	~100	Bueno, aceptable	Variación de la materia prima, factores ambientales.	Mantener las buenas practicas de laboratorio y aplicar los controles operacionales adecuados para mantener al sistema en orden.
Componente	% Contribución	% Var. estudio															
Repetibilidad	~100	~100															
Reproducibilidad	~0	~0															
Variación de la materia prima	~100	~100															

## 6

## Conclusiones

Como se ha explicado a lo largo de este trabajo, el objetivo de un sistema de medición es controlar, monitorear e identificar las variables que representan un impacto negativo durante el proceso de fabricación de los productos y que por lo tanto perjudican el nivel de calidad de estos.

Debido a que todo proceso de medición conlleva un error inherente, en este trabajo se aplicó un estudio de reproducibilidad y repetibilidad (R&R) ampliado para evaluar los procedimientos de medición de las variables de calibre, dureza de bobina e Integrity Test, con el propósito de determinar la variación debida al proceso, el instrumento y el operador. De esta forma se puede asegurar que el sistema de calidad de la organización es lo suficientemente robusto para generar información confiable que ayude en la toma de decisiones de la empresa.

En este trabajo se logró comprobar que es necesario evaluar de forma constante la calidad del sistema de medición de cada variable a través de un estudio de R&R; ya que se encontró que, dos de ellos no cumplen con los requisitos mínimos para ser considerados fuentes confiables para la discriminación del error.

Para el sistema de medición de la variable calibre se encontró que el R&R total del sistema de medición equivale al 39.94% de la variación del estudio, lo que significa que el sistema es inaceptable

y debe ser corregido, se descubrió que gran parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes. Lo que significa que gran parte de la variación se debe al proceso de fabricación de las piezas.

Para el caso de la variable dureza se estimó un R&R total del sistema de medición equivalente al 83.52% de la variación del estudio, por lo que, al igual que la variable de calibre, el sistema de medición para cuantificar la dureza es inaceptable y debe ser corregido. Se encontró que gran parte de la variación se debe a los procedimientos de medición que realizan los operadores. Lo que significa que gran parte de la variación se debe a como miden las piezas los operadores y que no siguen los procedimientos correctos para medir o que existen factores que alteran la medición (medio ambiente, operador, etc.).

Mientras que para la variable de Integrity Test tiene un R&R total del sistema de medición equivalente al 15.4% de la variación del estudio, por lo que, a diferencia de los otros dos sistemas, el sistema de medición para cuantificar la tendencia a la ruptura es bueno y aceptable. Se encontró que la variación entre las partes (Parte a parte) es de 97.63%. Este valor es mayor que el R&R total del sistema de medición, que es 2.37% por lo tanto, prácticamente toda la variación se debe a la variabilidad que poseen las partes con base a su fabricación.

Una vez analizados los resultados de los estudios, de forma general, se propusieron recomendaciones que pueden ser de utilidad para corregir las desviaciones del sistema de medición; entre las que destacan: calibración y estudio metrológico del instrumento, reforzar la capacitación de los operadores y realizar un estudio para identificar si existen factores ambientales que afectan el proceso de medición. Se pudo demostrar que a pesar de que una empresa cuente con un laboratorio de calidad lo suficientemente robusto, no puede darse por un hecho, que las mediciones y en general la información que el laboratorio genera son cien por ciento confiables. Ya que como se explicó en los capítulos de este trabajo, existen factores que alteran el proceso de medición de la realidad y que, por lo tanto, lo que se mide es la realidad más un error.

Este trabajo demostró la importancia que debe de otorgar una empresa para la inversión en personal y software, con el propósito de lograr un monitoreo constante de su sistema de medición a través de un estudio de reproducibilidad y repetibilidad, de esta forma se asegura la confiabilidad de la información que este laboratorio genera y que soporta en cierta forma la toma de decisiones a nivel operativo y gerencial. Además, se comprueba que el departamento de aseguramiento de calidad de la empresa tiene la capacidad para realizar un estudio R&R corto, utilizando Excel o cualquier hoja de cálculo, en caso de que no cuente con los suficientes recursos económicos para la adquisición de software especializado.

---

## IV. Referencias bibliográficas y digitales

## Referencias Bibliográficas

- [1] AIAG Automotive Industry Action Group. (2010). *Análisis de Sistemas de Medición Manual de Referencia Español*. USA: Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- [2] Burdick Richard K., Borrer Connie M., Montgomery Douglas C. (2005). *Design and Analysis of Gauge R&R Studies*. USA: American Statistical Association & Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [3] Cortés José Manuel. (2017). *Sistema de gestión de calidad: ISO 9001:2015*. Bogotá, Colombia: ICB editores.
- [4] Escamilla Esquivel Adolfo. (2014). *Metrología y sus aplicaciones*. Ciudad de México: Grupo Editorial Patria.
- [5] Gutierrez Pulido, Humberto. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. Ciudad de México: McGraw Hill Interamericana.
- [6] ISO 9001:2008. (2008). *Sistemas de Gestión de Calidad – Requisitos*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Certificación y Normalización.
- [7] Llamosa Rincón Luis E., Holguín Tabares Carlos A., Cruz Muñoz Beatriz. (2014). *Aseguramiento de la calidad de las mediciones en el laboratorio de física*. Cali, Colombia: Universidad Libre Seccional Cali.
- [8] Navidi William. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. Ciudad de México: McGraw Hill Interamericana
- [9] Revoil Gilles. (1998). *Aseguramiento de la calidad en los laboratorios de análisis y de ensayos*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [10] Reyes Ponce Ysabel. (2014). *Fundamentos de metrología*. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.



## Referencias Digitales

- [11] American Society for Quality (6 de junio de 2018). *Quality Assurance & Quality Control*. Recuperado de <https://asq.org/quality-resources/quality-assurance-vs-control>
- [12] American Society for Quality (7 de julio de 2018). *What is ISO 9001:2015 – Quality management systems?* Recuperado de <https://asq.org/quality-resources/iso-9001>
- [13] American Society for Quality (15 de julio de 2018). *What Is a Quality Management System (QMS)?* Recuperado de <https://asq.org/quality-resources/quality-management-system>
- [14] American Society for Quality (22 de julio de 2018). *Fishbone Diagram*. Recuperado de <https://asq.org/quality-resources/fishbone>
- [15] American Society for Quality (22 de julio de 2018). *Gage Repeatability and Reproducibility*. Recuperado de <https://asq.org/quality-resources/gage-repeatability>
- [16] Minitab Support (4 de noviembre de 2017). *Cómo diseñar, analizar e interpretar los resultados de un estudio R&R ampliado del sistema de medición*. Recuperado de <https://www.minitab.com/es-mx/Published-Articles/C%C3%B3mo-dise%C3%B1ar,-analizar-e-interpretar-los-resultados-de-un-estudio-R-R-ampliado-del-sistema-de-medici%C3%B3n/>
- [17] Minitab Support (5 de noviembre de 2017). *Revisión general de Estudio de linealidad y sesgo del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/gage-linearity-and-bias-study/before-you-start/overview/>
- [18] Minitab Support (5 de noviembre de 2017). *Interpretar los resultados clave para Estudio de linealidad y sesgo del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/gage-linearity-and-bias-study/interpret-the-results/key-results/>
- [19] Minitab Support (11 de noviembre de 2017). *Revisión general de Estudio R&R cruzado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/crossed-gage-r-r-study/before-you-start/overview/>
- [20] Minitab Support (11 de noviembre de 2017). *Interpretar los resultados clave para Estudio R&R cruzado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/crossed-gage-r-r-study/interpret-the-results/key-results/>

- [21] Minitab Support (25 de noviembre de 2017). *Revisión general de Estudio R&R anidado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/nested-gage-r-r-study/before-you-start/overview/>
- [22] Minitab Support (25 de noviembre de 2017). *Interpretar los resultados clave para Estudio R&R anidado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/nested-gage-r-r-study/interpret-the-results/key-results/>
- [23] Minitab Support (9 de diciembre de 2017). *Todos los estadísticos y gráficas para Estudio R&R anidado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/nested-gage-r-r-study/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>
- [24] Minitab Support (16 de diciembre de 2017). *Todos los estadísticos y gráficas para Estudio R&R cruzado del sistema de medición*. Recuperado de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/crossed-gage-r-r-study/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>
- [25] Imágenes descargadas de Motor de búsqueda Google Images.
- [26] Elaboración propia.

## IV. Glosario

### A

**AIAG:** Automotive Industry Action Group es una asociación sin fines de lucro fundada en 1982 y con sede en Southfield, Michigan. Fue creado originalmente para desarrollar recomendaciones y un marco para la mejora de la calidad en la industria automotriz de América del Norte.

**Análisis Causa – Raíz:** Método para la resolución de problemas que intenta evitar la recurrencia de un problema o defecto a través de identificar sus causas.

### C

**Canastilla:** Estructura plegadiza de papel tipo couche, que se utiliza principalmente para transportar botellas de vidrio.

**Caja corrugada:** Caja de cartón, elaborada con diferentes tipos de papel.

**Caja fibra:** Caja elaborado con distintos tipos de papel resistentes a la rotura.

**Carta R:** Carta de rangos.

**Cinta de refuerzo:** Cinta de poliamida o polímeros similares utilizada para aumentar la resistencia del papel en las fajillas.

**COBB:** Prueba de laboratorio que permite medir la capacidad de absorción del recubrimiento (estucado) para el papel Couche o del papel liner. Es útil para conocer la resistencia de absorción de agua u otras sustancias químicas.

**Combado:** Defecto de curvatura en los laterales de las cajas corrugadas, también conocido como cara curva o torcida.

**Couche:** Tipo de papel elaborado a base de fibras vírgenes o recicladas con estucado en una cara.

### E

**Esclerómetro:** El esclerómetro es un instrumento de medición empleado, generalmente, para la determinación de la resistencia a compresión en hormigones ya sea en pilares, muros, pavimentos. En la industria del papel se utiliza para medir la “dureza” en las bobinas de papel, que estima indirectamente la compresión de las capas del rollo.

---

**Estiba:** Se define estiba de una carga a la colocación, distribución, protección y fijación adecuada en el interior del vehículo de una mercancía que ha sido entregada al porteador convenientemente embalada, si procede, para que vaya segura hasta su destino

**Estucado:** Capa delgada a base de sustancias esmaltantes y colorantes, que ofrecen un acabado lustroso y blanco. Se utiliza como recubrimiento para producir el papel couche.

## **F**

**Fajilla:** Plegadizo de papel tipo couche que es utilizado como collarín para transportar botellas de vidrio por la parte superior

**Flauta:** Estructura ondulada de papel que se forma entre las dos caras externas de una pieza de cartón o corrugado, por medio de un aglutinante y calor.

## **G**

**Glue Bond:** Prueba de laboratorio que se utiliza para estimar la calidad de los adhesivos y su comportamiento en las superficies de papel.

## **I**

**Industria 4.0:** Expresión que denomina una hipotética cuarta mega etapa de la evolución técnico-económica de la humanidad, contando a partir de la Primera Revolución Industrial. Esta cuarta etapa habría comenzado recientemente y su desarrollo estaría proyectado hacia la tercera década del siglo XXI. La inteligencia artificial es señalada como elemento central de esta transformación, íntimamente relacionada a la acumulación creciente de grandes cantidades de datos (“big data”), el uso de algoritmos para procesarlos, y la interconexión masiva de sistemas y dispositivos digitales.

**Inocuidad:** Incapacidad para hacer daño.

**Integrity Test:** Prueba de laboratorio que mide la resistencia a la ruptura de una estructura de cartón o papel.

## **L**

**Liner:** Papel de fibras recicladas tipo Kraft que se utiliza para la elaboración de las caras externas de una caja de cartón.

## **M**

---

**Machine Learning:** El aprendizaje automático o aprendizaje automatizado o aprendizaje de máquinas es el subcampo de las ciencias de la computación y una rama de la inteligencia artificial, cuyo objetivo es desarrollar técnicas que permitan que las computadoras aprendan.

**Medición:** La medición es un proceso básico de la ciencia que se basa en comparar una unidad de medida seleccionada con el objeto o fenómeno cuya magnitud física se desea medir, para averiguar cuántas veces la unidad está contenida en esa magnitud.

**Medium:** Papel de fibras recicladas tipo Kraft que se utiliza para la elaboración de las flautillas de una caja de cartón.

**Mensurables:** Que puede ser medido.

**Merma:** Material desperdiciado, generalmente por defectos de origen o problemas ocasionados durante el procesamiento del material.

## N

**No conformidad:** Reporte de laboratorio enviado al proveedor y que especifica el defecto, propiedad, atributo o variable fuera de especificaciones; así como las consecuencias que este material provocó o pudo haber provocado en caso de procesarse, los cuales pueden ser merma de material por productos defectuosos o tiempo muerto.

## P

**Plegadizo:** Estructura de papel o cartón que puede ser doblada sin sufrir un corte o deformación.

**Prueba destructiva:** Prueba de laboratorio que mide una magnitud una sola vez, debido a que la probeta, muestra o parte se destruye y pierde sus propiedades originales.

**Prueba no destructiva:** Prueba de laboratorio que puede medir más de una vez, una magnitud, debido a que la probeta, muestra o parte no se destruye o pierde sus propiedades originales.

## R

**Reproducibilidad:** Precisión o variabilidad de las mediciones del mismo objeto, pero en condiciones variables.

**Repetibilidad:** La repetibilidad de un instrumento de medición se refiere a la precisión o variabilidad de sus mediciones cuando se obtienen varias mediciones del mismo objeto en condiciones similares.

## S

**SAI:** Sistema de Administración Integral, sistema de gestión de la empresa

**Seis Sigma:** Estrategia de mejora continua.

---

## **T**

**TAPPI:** Derivación de las normas ASTM para la industria del papel.

**Tiempo muerto:** Intervalo de tiempo en el que es interrumpida la producción debido a causas no deseadas.

## **V**

**Variabilidad:** Que presenta variación.

---

## V. Anexos

## V.1 Anexo A

### ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD LARGO Método de medias y rangos.

Persona Responsable: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_  
 Especificaciones: El= \_\_\_\_\_ ES= \_\_\_\_\_ Estudio: \_\_\_\_\_  
 Tolerancia = \_\_\_\_\_ Departamento: \_\_\_\_\_  
 Tipo de gage: \_\_\_\_\_  
 Núm de gage: \_\_\_\_\_

Número de partes	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
Total												

$\bar{R}_A$ Suma $\bar{X}_A$	$\bar{R}_B$ Suma $\bar{X}_B$	$\bar{R}_C$ Suma $\bar{X}_C$
---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

$\bar{R}_A$	$\bar{R}_B$	$\bar{R}_C$	Suma $\bar{R}$
-------------	-------------	-------------	----------------

Máx $\bar{X}$	Mín $\bar{X}$	$\bar{X}$ Dif
---------------	---------------	---------------

LCS = $(\bar{R})(D_4)$	LCS = ( ) ( )	Ensayos	$D_4$
------------------------	---------------	---------	-------

Marque aquellos rangos que se encuentran arriba de LCS. Identifique la causa y corrijala.  
 Repita esas mediciones usando el mismo operador y la misma unidad. Recalcule  $\bar{R}$  y LCS

Repetibilidad (variación del equipo):

$$VE = \bar{R}k_1 = ( ) ( ) = \square$$

$$\sigma_{repeti} = \frac{VE}{5.15} =$$

Reproducibilidad (variación de operador):

$$VO = \sqrt{\left(\frac{(\bar{X}_{dif})k_2}{nt}\right)^2 - \frac{(VE)^2}{nt}}$$

$$\hat{\sigma}_{reprod} = \frac{VO}{5.15} =$$

Reproducibilidad y repetibilidad

$$EM = R\&R = \sqrt{VE^2 + VO^2} =$$

$$\hat{\sigma}_{R\&R} = \frac{R\&R}{5.15} =$$

$k_1$ ensayos y $k_2$ operación	2	3
$k_1$		
$k_2$		
n = número de partes		
t = número de ensayos		

Análisis en % de tolerancias:

$$\%VE = \frac{100(VE)}{\text{tolerancia}} = \frac{\square}{\square} =$$

$$\%VO = \frac{100(VO)}{\text{tolerancia}} = \frac{\square}{\square} =$$

$$P/T = \%R\&R = \sqrt{O^2 + O^2} =$$

#### Criterio de aceptación

- Abajo de 10% → Excelente proceso
- De 10 a 20% → Bueno, aceptable
- De 20 a 30% → Marginalmente aceptable
- Arriba de 30% → Inaceptable y debe ser corregido



## V.2 Anexo B

### ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD LARGO Método de medias y rangos.

Fecha: 20/10/2017  
 Persona Responsable: Laboratorista / Metrólogo  
 Especificaciones: El= 360 ES= 410 g/m<sup>2</sup>  
 Tolerancia = 50 g/m<sup>2</sup>  
 Estudio: R&R Peso Base  
 Departamento: Calidad  
 Tipo de gage: Estudio Largo  
 Núm de gage: ERR - 001

Número de partes	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Rango
1	403	400	398	5	403	397	398	6	398	403	397	6
2	405	404	404	1	402	400	400	2	400	398	398	2
3	408	405	406	3	395	396	398	3	403	403	400	3
4	405	408	408	3	405	405	409	4	395	399	399	4
5	405	406	407	2	405	402	403	3	405	403	403	2
6	402	400	399	3	397	397	396	1	407	406	405	2
7	398	400	396	4	407	404	404	3	403	397	397	6
8	400	398	397	3	401	401	396	5	405	408	407	3
9	404	403	400	4	407	408	410	3	411	409	409	2
10	405	405	406	1	410	409	410	1	410	404	407	6
Total	8035				8044				8050			
	8021			$R_A$ 2.9	8023			$R_B$ 3.05	8038			$R_C$ 3.15
Suma	8021				8044				8037			
$\bar{X}_A$	24077			Suma	24111			Suma	24125			
	401.28			$\bar{X}_B$	401.85			$\bar{X}_C$	402.08			

$R_A$	2.9
$R_B$	3.05
$R_C$	3.15
Suma	9.1
$\bar{R}$	3.0333

Máx $\bar{X}$	402.08
Mín $\bar{X}$	401.28
$\bar{X}$ Dif	0.8

$$LCS = (\bar{R})(D_4)$$

Ensayos	$D_4$
2	3.27
3	2.57

Marque aquellos rangos que se encuentran arriba de LCS. Identifique la causa y corrijala. Repita esas mediciones usando el mismo operador y la misma unidad. Recalcule  $\bar{R}$  y LCS

Repetibilidad (variación del equipo):

$$VE = \bar{R}k_1 = (3.033)(3.042) = 9.23$$

$$\sigma_{repeti} = \frac{VE}{5.15} = 1.792$$

Reproducibilidad (variación de operador):

$$VO = \sqrt{\left(\frac{(\bar{X}_{dif})k_2}{n}\right)^2 - \frac{(VE)^2}{nt}} = 1.8$$

$$\hat{\sigma}_{reprod} = \frac{VO}{5.15} = \frac{1.8}{5.15} = 0.34$$

Reproducibilidad y repetibilidad

$$EM = R\&R = \sqrt{VE^2 + VO^2} = 9.43$$

$$\hat{\sigma}_{R\&R} = \frac{R\&R}{5.15} = 1.82$$

$k_1$ ensayos y $k_2$ operación	2	3
$k_1$		3.042
$k_2$		2.7
n = número de partes		
t = número de ensayos		

Análisis en % de tolerancias:

$$\%VE = \frac{100(VE)}{\text{tolerancia}} = \frac{923}{50} = 18.46$$

$$\%VO = \frac{100(VO)}{\text{tolerancia}} = \frac{180}{50} = 3.6$$

$$P/T = \%R\&R = \sqrt{(18.46)^2 + (3.6)^2} = \%18.8$$

#### Criterio de aceptación

Abajo de 10% → Excelente proceso  
 De 10 a 20% → Bueno, aceptable  
 De 20 a 30% → Marginalmente aceptable  
 Arriba de 30% → Inaceptable y debe ser corregido

### V.3 Anexo C

**TABLA A1.** Factores para la construcción de las cartas de control

Tamaño de muestra, $n$	Carta $\bar{X}$ $A_2$	Carta $R$			Carta $S$ $c_4$	Estimación de $\sigma$ $d_2$
		$d_3$	$D_3$	$D_4$		
2	1.880	0.853	0.0000	3.2686	0.7979	1.128
3	1.023	0.888	0.0000	2.5735	0.8862	1.693
4	0.729	0.880	0.0000	2.2822	0.9213	2.059
5	0.577	0.864	0.0000	2.1144	0.9400	2.326
6	0.483	0.848	0.0000	2.0039	0.9515	2.534
7	0.419	0.833	0.0758	1.9242	0.9594	2.704
8	0.373	0.820	0.1359	1.8641	0.9650	2.847
9	0.337	0.808	0.1838	1.8162	0.9693	2.970
10	0.308	0.797	0.2232	1.7768	0.9727	3.078
11	0.285	0.787	0.2559	1.7441	0.9754	3.173
12	0.266	0.778	0.2836	1.7164	0.9776	3.258
13	0.249	0.770	0.3076	1.6924	0.9794	3.336
14	0.235	0.763	0.3281	1.6719	0.9810	3.407
15	0.223	0.756	0.3468	1.6532	0.9823	3.472
16	0.212	0.750	0.3630	1.6370	0.9835	3.532
17	0.203	0.744	0.3779	1.6221	0.9845	3.588
18	0.194	0.739	0.3909	1.6091	0.9854	3.640
19	0.187	0.734	0.4031	1.5969	0.9862	3.689
20	0.180	0.729	0.4145	1.5855	0.9869	3.735
21	0.173	0.724	0.4251	1.5749	0.9876	3.778
22	0.167	0.720	0.4344	1.5656	0.9882	3.819
23	0.162	0.716	0.4432	1.5568	0.9887	3.858
24	0.157	0.712	0.4516	1.5484	0.9892	3.898
25	0.153	0.708	0.4597	1.5403	0.9896	3.931

## V.4 Anexo D

### TABLA MILITARY ESTANDARD 105 NIVEL II

BASED ON "SAMPLING PROCEDURES AND TABLES FOR INSPECTION BY ATTRIBUTES"

SINGLE SAMPLING PLANS FOR NORMAL INSPECTION-ANSI/ASQC Z1.4(1993).

TABLA MIL STD 105 NIVEL II		
TAMAÑO DE LOTE		TAMAÑO MUESTRA
2	8	2
9	15	3
16	25	5
26	50	8
51	90	13
91	150	20
151	280	32
281	500	50
501	1200	80
1201	3200	125
3201	10000	200
10001	35000	315
35001	150000	500
150001	500000	800
500001	1000000	1250