



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estadística Aplicada

**CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE
MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE
MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

ING. CARLOS ALBERTO RÍOS CALDERÓN

Asesorado por el Dr. Ing. William Eduardo Fagiani Cruz
Co-Asesorado por el Ing. Israel de Jesús Guerra Rodríguez

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE
MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE
MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. CARLOS ALBERTO RÍOS CALDERÓN

ASESORADO POR EL DR. ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ
CO-ASESORADO POR EL ING. ISRAEL DE JESÚS GUERRA RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTADÍSTICA APLICADA

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL DE DEFENSA DE TESIS

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti
EXAMINADOR	Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
EXAMINADOR	Dr. Ing. William Eduardo Fagiani Cruz
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD
DE MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL
MEDIANTE MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE
VIBRACIONES MECÁNICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 6 de agosto de 2021.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

Ing. Carlos Alberto Ríos Calderón



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.494.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASONICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS**, presentado por: **Carlos Alberto Ríos Calderón**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Estadística aplicada después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, julio de 2022

LNG.EEP.OI.494.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS"

presentado por **Carlos Alberto Ríos Calderón** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Estadística aplicada** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cofi
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala 11 de mayo 2022.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado "**CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS**" del estudiante **CARLOS ALBERTO RÍOS CALDERÓN** quien se identifica con número de carné 100017078 del programa de Maestría en Estadística Aplicada.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MSc. Ing. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
Coordinador
Maestría en Estadística Aplicada
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 31 de julio de 2021

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Cotí

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE MECANISMO ALIMENTADOR PARA EQUIPO IMPRESOR INDUSTRIAL MEDIANTE MONITOREO CON INSTRUMENTACIÓN ULTRASÓNICA DE VIBRACIONES MECÁNICAS"** del estudiante **CARLOS ALBERTO RÍOS CALDERÓN** del programa de Maestría en **Estadística Aplicada**, identificado con número de carné: **1000-17078**.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



INGENIERO QUÍMICO
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ
COL. 1734

M.A. Ing. Qco. William Eduardo Fagiani Cruz

Colegiado No. 1,734

Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Jesucristo

Toda la honra y gloria es tuya. A quien debo mi salvación, sabiduría y salud.

Mis Padres

Luis Alberto (por dejarme la mejor herencia del mundo que fueron sus enseñanzas) y María Antonieta, por estar a mi lado brindándome su amor y apoyo.

Mis hermanos y familia

Luis Fernando, Martha Lucia y Ana Elsa, por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Ingeniero Israel Guerra	Por su apoyo como asesor y amigo.
Doctor William Fagiani	Por el apoyo como docente y asesor.
Máster Edwin Bracamonte	Por su valioso tiempo y apoyo brindado en estudios y correcciones efectuadas en esta tesis, como docente y revisor.
Máster André Choco Cedillos	Por su valiosa amistad, por el tiempo y conocimiento brindado durante todo el programa de maestría.
Mi grupo de estudio	Especialmente a los médicos veterinarios Dr. Erick de la Cruz y Dr. Marcelo Melini y al máster Nery Ruiz.
Mis amigos de la facultad	A la gloriosa “Sociedad de Los Estadísticos Muertos”. En especial al economista Lic. Luis López y al licenciado Luis Castellanos.
La Universidad de San Carlos	Mi <i>alma mater</i> .

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R)	5
2.2. Estudio de atipicidad de datos de Grubbs.....	7
2.3. Estadística descriptiva y análisis de datos	8
2.3.1. Construcción de datos mediante técnicas de agrupación..	8
2.3.2. Medidas de tendencia central y agrupación.....	10
2.3.2.1. Media aritmética	11
2.3.2.2. Mediana.....	11
2.3.2.3. Moda	11
2.3.2.4. Promedio geométrico.....	12
2.3.2.5. Promedio armónico	12
2.3.2.6. Cuartil 1 o Percentil 25	13
2.3.2.7. Cuartil 3 o Percentil 75	13

	2.3.2.8.	Decil 1 o Percentil 10	13
	2.3.2.9.	Decil 9 o Percentil 90	14
2.3.1.		Medidas de dispersión o variación	14
	2.3.1.1.	Varianza.....	14
	2.3.1.2.	Desviación estándar.....	15
	2.3.1.3.	Coeficiente de variación de Pearson	15
	2.3.1.4.	Amplitud entre el 80 %	15
	2.3.1.5.	Amplitud entre el 50 %	16
2.3.2.		Medidas de asimetría o sesgo	16
	2.3.2.1.	Rango intercuartílico	16
	2.3.2.2.	Cálculo de los momentos estadísticos	17
	2.3.2.3.	Coeficiente de asimetría α_1	18
	2.3.2.4.	Coeficiente de asimetría de Fisher	18
	2.3.2.5.	Coeficiente de asimetría de Bowley-Yule	19
2.3.3.		Medidas de agudez o curtosis	19
2.4.		Evaluación de aleatoriedad de datos	19
	2.4.1.	Prueba de Rachas para aleatoriedad.....	20
2.5.		Análisis de normalidad	21
	2.5.1.	Prueba de Chebyshev y regla empírica	21
	2.5.2.	Teorema del límite central.....	22
	2.5.3.	Prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov	22
		2.5.3.1. Frecuencia relativa observada	23
		2.5.3.2. Frecuencia relativa esperada acumulada	23
		2.5.3.3. Prueba de aproximación a la normal	24
2.6.		Estudio de control de proceso	24
	2.6.1.	Estudio de estabilidad estadística	25
		2.6.1.1. Cartas de control por variables.....	26
		2.6.1.2. Cálculo de factores para gráficos de Shewhart.....	27

2.6.1.3.	Definición de carta de control \bar{x} -R.....	31
2.6.1.4.	Definición de carta de control \bar{x} -S.....	32
2.6.1.5.	Índice de inestabilidad de proceso S_t	32
2.6.2.	Estudio de capacidad estadística	33
2.6.2.1.	Cálculo de índice de Capacidad C_p	34
2.6.2.2.	Índice de capacidad real C_{P_k}	35
2.6.2.3.	Cálculo de índice K.....	36
2.6.2.4.	Cálculo de índice de Taguchi.....	37
2.6.3.	Confiabilidad y disponibilidad del equipo	38
2.6.3.1.	Razón de capacidad potencial C_r	38
2.6.3.2.	Tiempo promedio entre fallas MTBF	38
2.6.3.3.	Tasa de fallas por hora λ	39
2.6.3.4.	Promedio de horas de una falla MTTR	39
2.6.3.5.	Disponibilidad probabilística de la maquina ..	40
2.6.3.6.	Cálculo de variable confiabilidad del equipo .	40
2.6.3.7.	Cálculo de variable disponibilidad del equipo	40
2.6.3.8.	Cálculo de variable mantenibilidad del equipo	41
2.6.4.	Estudios con métricas de Lean Six-Sigma	41
2.6.4.1.	Análisis a largo plazo del proceso	42
2.6.4.2.	Índice de rendimiento P_P	42
2.6.4.3.	Índice de rendimiento P_{P_k}	43
2.6.4.4.	Cálculo de índice Z.....	43
2.6.4.5.	Desplazamiento Z_m	44
2.6.4.6.	Estimación del DPMO Defectos por millón de oportunidades.....	44
2.6.4.7.	Nivel Lean Six-Sigma	45
2.7.	Fabrica Inteligente y el IloT	46

3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	49
3.1.	Descripción de los datos de desplazamiento horizontal.....	49
3.2.	Construcción del diseño de instrumentación	53
3.3.	Obtención de datos del plan piloto.....	55
3.4.	Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) para instrumentos	57
3.5.	Recopilación y tratamiento de datos.....	63
3.5.1.	Análisis exploratorio de datos	64
3.5.1.1.	Prueba de atipicidad de datos de Grubbs	65
3.6.	Análisis con estadística descriptiva	66
3.6.1.	Análisis estadístico de datos agrupados	66
3.6.1.1.	Histograma y polígono de frecuencias	68
3.6.2.	Calculo y análisis de estadígrafos descriptivos	74
3.7.	Evaluación de aleatoriedad de datos.....	77
3.7.1.	Grafica de corridas y recorrido	79
3.8.	Pruebas de normalidad	79
3.9.	Estudio de control del proceso	81
3.9.1.	Análisis de estabilidad	83
3.9.1.1.	Cartas de control \bar{x} -R.....	83
3.9.1.2.	Cartas de control \bar{x} -S	85
3.9.1.3.	Índice de inestabilidad de proceso S_t	92
3.9.2.	Análisis de capacidad	92
3.9.1.	Cálculo de la confiabilidad y disponibilidad	93
3.9.2.	Cálculo y resultados de métricas Lean Six-Sigma	94
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
4.1.	Análisis interno	97
4.1.1.	Resultados del estudio de control	98

4.1.2. Resultados del estudio de confiabilidad y disponibilidad..	99
4.2. Análisis externo	102
CONCLUSIONES.....	103
RECOMENDACIONES.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
APÉNDICES.....	111
ANEXOS	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Espina de Ishikawa para el estudio.....	XVI
2.	Diagrama de cajas y bigotes para el rango intercuartílico.....	17
3.	Resultados para la prueba de rachas.....	21
4.	Industria 4.0.....	47
5.	Área de trabajo.....	50
6.	Visualización del equipo.....	51
7.	Descripción del tren de mecanismo.....	53
8.	Diagrama de funcionamiento del instrumento ultrasónico.....	54
9.	Instrumentación TI-CBR2 y IIoT HC-SR04.....	55
10.	Gráfico de dispersión de datos comparativo.....	57
11.	Captador ultrasónico de laboratorio TI-CBR2.....	58
12.	Dispersión para el análisis de R&R de los instrumentos.....	59
13.	Gráfico de R&R del sistema de instrumentación.....	62
14.	Box-Plot del R&R del sistema de medición anidado.....	63
15.	Diagrama de líneas exploratorio de datos.....	64
16.	Gráfico de atipicidad de Grubbs.....	65
17.	Histograma de los datos agrupados.....	68
18.	Polígono de frecuencias para los datos agrupados.....	70
19.	Gráfico de ojiva de frecuencias acumuladas.....	72
20.	Gráfico de corridas para los datos observados.....	79
21.	Dispersión de datos y la regla empírica.....	82
22.	Gráfico de dispersión de desviación estándar diaria.....	82
23.	Carta de control \bar{R}	84

24.	Carta de control \bar{x}	84
25.	Carta de control S.....	85
26.	Carta de control promedio-desviación.....	86

TABLAS

I.	VARIABLES DEL ESTUDIO.....	XXIII
II.	Factores para el cálculo de los gráficos de Shewhart	28
III.	Nivel de capacidad sigma	45
IV.	Análisis de Varianza del sistema de medición.....	60
V.	Evaluación del sistema Gage R&R	61
VI.	Intervalos con límites reales para datos agrupados	67
VII.	Medidas de tendencia central y agrupación del proceso	74
VIII.	Medidas de dispersión o variabilidad del proceso	75
IX.	Medidas de asimetría o sesgo	76
X.	Medidas de agudez o curtosis	77
XI.	Prueba de rachas para la aleatoriedad de las lecturas.....	78
XII.	Porcentaje de observaciones contenidas dentro del intervalo	80
XIII.	Cálculos para estimadores de prueba de Kolmogórov-Smirnov	81
XIV.	Valores calculados para las variables	83
XV.	Tabulación del índice de estabilidad	92
XVI.	Resultados para estudios de capacidad.....	93
XVII.	Intervalos de confianza para los indicadores de capacidad	93
XVIII.	Disponibilidad probabilística del equipo en el plan piloto.....	94
XIX.	Tiempo medio de reparación MTTR y Tiempo medio entre fallas	94
XX.	Resultados de los estudios a largo plazo	95
XXI.	Registro promedio de los fallos ocurridos en el equipo	100

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
g	Gramos
hr	Horas
kHz	Kilo Hertz
m	Metro
μ	Media poblacional
mm	Milímetro
min	Minutos
%	Porcentaje
s	Segundos

GLOSARIO

Arduino	Es un hardware que contiene una placa con microcontrolador y software de código abierto empleado para la creación de dispositivos de IoT.
Espina de Ishikawa	Metodología grafica de análisis de causa y efecto, utilizada para clasificar las posibles fuentes de un problema de manera ordenada y visual. Es una de las herramientas de calidad.
Grados de libertad	Variable de análisis estadístico, que representa el número de valores asignados de forma arbitraria con el fin de compensar un resultado.
IIoT	Refiere a los dispositivos de instrumentación industrial autónomos, interconectados mediante software para análisis y monitoreo de variables.
Kaizen	Significa un cambio y mejora continua. Es una metodología desarrollada en Japón, de gestión de la calidad y mantenimiento autónomo muy conocido en el mundo de la industria. Implica un cambio de actitud en todos los niveles y es muy utilizado para los programas de TPM. Significa muchos pequeños cambios, muchas mejoras acumuladas.

Mantenimiento autónomo	Uno de los pilares del TPM, es el <i>Jishu Hozen</i> , y está sustentado en que cada operario y miembro del equipo está constituido como un dueño del equipo. Su trabajo consiste en un plan de limpieza y cuidado profundo, inspección y análisis de detección temprana de fallos, mediante ajustes y calibraciones.
Minitab	Software de análisis estadístico de aplicación.
TPM	Mantenimiento productivo total, es un programa de mantenimiento industrial que se ejecuta mediante técnicas de gestión y conservación industrial. Está constituido por 8 pilares, que son los principios y fundamentos básicos que sustentan el programa.
6M	Las 6M de Ishikawa o del proceso, se definen como variables que forman parte de las posibles fuentes de variación de los procesos productivos o fuentes de fallos.

RESUMEN

El propósito de la presente investigación fue conocer y aplicar las distintas técnicas estadísticas que se involucran al momento de realizar un estudio de control de procesos. Se consideró utilizar todos los elementos que pudieran involucrar un análisis completo y sustantivo en relación al estudio.

El objetivo del proyecto consistió en realizar un estudio cuantitativo de la operación y crear un control estadístico, para lo que se utilizó análisis de estabilidad y capacidad del proceso. Fue mediante la captación de los desplazamientos horizontales del mecanismo de alimentación de la máquina, donde se obtuvo los datos mediante instrumentación ultrasónica.

Debido a que se han detectado desajustes en la operación, para cumplir con el propósito trazado en la metodología se planteó realizar un análisis estadístico descriptivo que permitió conocer el comportamiento de los datos para su posterior análisis. Se obtuvo resultados mediante un diseño no experimental, que permitieron construir un modelo estadístico de control, que aportó información valiosa al momento de tomar decisiones respecto a los tiempos del mantenimiento autónomo y ajustes. El estudio se enfocó propiamente en el equipo seleccionado, realizando algunas recomendaciones que permitan mejorar la operación del mismo.

Se concluyó mediante la realización de estas pruebas que el equipo se encuentra bajo control estadístico y que mantiene un buen nivel de confiabilidad y disponibilidad, mediante las pruebas y estudios realizados.

Se recomendó el ajuste de las horas de realización de los mantenimientos autónomos para poder mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la máquina, para lo cual se hizo una presentación de los datos procesados y analizados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- **Contexto general**

En la industria de impresión industrial, la precisión y confiabilidad de los equipos es indispensable para el correcto desempeño de las actividades productivas. Actualmente se cuenta con un proceso productivo muy importante para la empresa objetivo, el alimentador de un equipo de impresión industrial, en este equipo se ha presentado fallos, detectándose problemas de operación.

Durante el último año se ha ido aumentando la cantidad de fallos en la máquina, en un periodo de operación. Por ello se instaló un programa de mantenimiento productivo total TPM, y se busca crear un control estadístico de procesos para estudiar cómo mejorar los tiempos de ajustes y ejecuciones de mantenimiento autónomo.

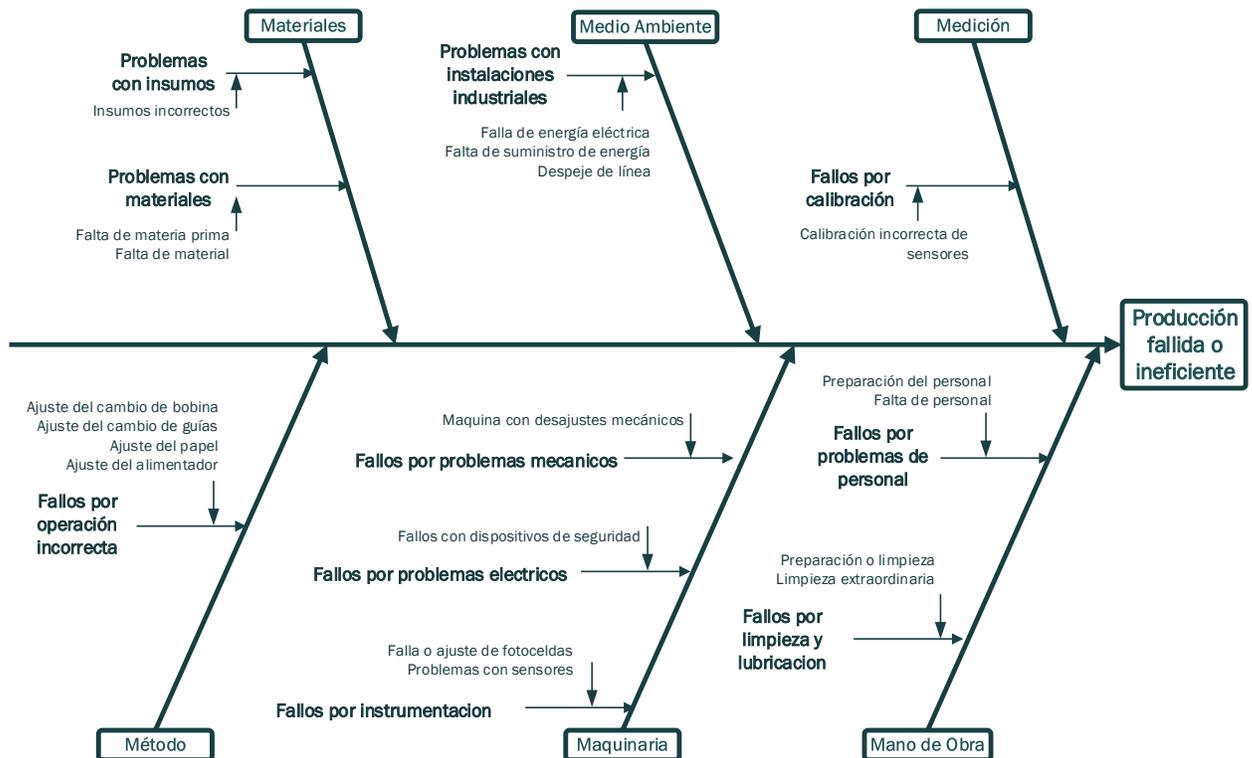
No se ha realizado un análisis diagnóstico de la máquina, que permita encontrar todas las posibles fuentes de variación y de fallos. Solo una evaluación previa, que permitió identificar los indicios de estos posibles elementos de fallo.

- **Descripción del problema**

Se puede deducir que el equipo, al tener horas de operación continua comienza a sufrir desajustes, que al final terminan en fallos y paros no programados del equipo. Se realizó un estudio preliminar, a través de un diagrama de espina de Ishikawa, demostrando que los problemas se centran mayormente en la M-Maquinaria, debido a los registros de paros no programados

por continuos desajustes, fallos mecánicos o algún derivado de la falta de un mantenimiento adecuado. Se considerarán los costos de paros, desperdicios, reprocesos y costos de la No Calidad.

Figura 1. Espina de Ishikawa para el estudio



Fuente: elaboración propia, basado en análisis de información preliminar, realizado con Visio

El problema estadístico se plantea al momento de carecer de información que permita realizar de forma más eficiente el control de fallos, sin embargo, ya identificadas las posibles fuentes de variación, es posible analizar los datos de desplazamiento horizontal producidos por las vibraciones mecánicas recopilados por un instrumento de monitoreo, permitiendo el análisis, a través de un método

que sea confiable. Es necesario definir los estudios de estabilidad y capacidad, ya hacer las evaluaciones de disponibilidad y confiabilidad del equipo.

- **Formulación del problema**

- **Pregunta central**

¿Cuáles son los estudios de control estadístico de procesos que se necesitan construir para poder interpretar, y con ello controlar el proceso, mediante el análisis del comportamiento de las vibraciones mecánicas del equipo?

- **Preguntas auxiliares**

- ¿Cuál es el comportamiento de los desplazamientos horizontales de la máquina de estudio en función del tiempo, para su control?
- ¿Qué estudios de estabilidad de proceso explicarían mejor, para evaluar las condiciones de operación del proceso?
- ¿Cuál es el nivel de capacidad del equipo para desempeñar las funciones de operación propias, para evaluar su confiabilidad?

- **Delimitación del problema**

El problema se limita al mecanismo de alimentación del equipo de estudio. El alcance del programa se centrará puntualmente en los análisis estadísticos de procesos para la máquina, desarrollando un estudio del proceso, planificando las recomendaciones para las actividades y mejoras necesarias.

Los datos serán capturados directamente del equipo, mediante el dispositivo de instrumentación ultrasónico diariamente cada hora, de manera que se tengan juegos de datos diarios con los reportes de las horas de operación. La captura de datos será ejecutada en el periodo comprendido de agosto del año dos mil veinte a mayo del año dos mil veintiuno, por lo que se contará con diez meses de monitoreo continuo.

El programa puede ser limitado por las aprobaciones, hallazgos o cambios en el programa de mantenimiento, por la discrepancia en los resultados esperados u otra limitación que podría darse, la cual puede ser derivada de la falta de seguimiento del programa, una incorrecta asignación de presupuesto o alguna variable externa, que pueda afectar el estudio.

OBJETIVOS

General

Implementar un control estadístico del proceso operacional para el monitoreo de vibraciones mecánicas del equipo, por medio de análisis descriptivo, estudios estadísticos de capacidad y de estabilidad, que permitan interpretar y controlar de mejor forma el tiempo de operación y mantenimiento.

Específicos

- Describir el comportamiento de los desplazamientos horizontales mecánicos en función del tiempo, para desarrollar un estudio estadístico del proceso operativo por medio de análisis de estadística descriptiva.
- Definir y construir los estudios de estabilidad que describan mejor el comportamiento de los datos a través de la metodología de control estadístico de procesos, que permita evaluar las condiciones del proceso.
- Definir y construir un estudio de capacidad de proceso, para establecer y evaluar la confiabilidad del equipo, para desempeñar las funciones de operación propias.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Debido a que, en algunas partes, sobre todo internas, de los equipos es muy complicado el monitoreo por parte de métodos tradicionales o predictivos de medición, y para evitar fallos, que podrían significar una pérdida de productividad, tiempo y recursos, es necesario el análisis estadístico. Mediante un control estadístico de procesos se puede hacer predecible en el tiempo el estado del proceso, permitiendo una correcta planificación y programación de mantenimientos productivos, por ello es necesario considerar algunas herramientas que son valiosas para adquirir esa información.

El estudio consistió en la obtención cuantitativa de datos de la variable definida, que serviría para estudiar el comportamiento del equipo. Dicha variable estaba definida por los desplazamientos horizontales, que se estarían estudiando en el tiempo y el impacto a la operación correcta del equipo. Se detalló la metodología a utilizar iniciando con la descripción y definición de alcance y enfoque propuesto. Se definió la variable de estudio para desarrollar una solución al problema identificado en la unidad de análisis y luego se realizó la explicación y solución propuesta.

- **Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto fue cuantitativo, debido a que se buscó una medición de las características cuantitativas del desplazamiento evaluado y establecer el patrón de comportamiento que presentaron los datos observados en un intervalo de tiempo definido.

El alcance del estudio fue descriptivo, sobre el equipo delimitado, dado a que lo que se buscó fue realizar un estudio del comportamiento del proceso, en la variable definida, a través de la recolección de datos históricos. Estos datos se analizaron de forma independiente.

El estudio fue de tipo descriptivo transversal, ya que el análisis de la información generada fue necesario para conocer los comportamientos que tiene el elemento de estudio. El diseño adoptado fue no experimental, ya que se realizó una observación cuantitativa de la variable de estudio. La información fue obtenida a través de la captación de datos mediante instrumentación especializada al monitorear el equipo, obteniendo las mediciones sin ninguna manipulación, directamente del equipo de estudio.

- **Unidad de análisis**

La población del estudio se consideró a los datos obtenidos por las lecturas de desplazamientos en el equipo analizado, el alimentador de una máquina de impresión industrial, durante cada hora de operación diario, en un periodo de diez meses, la cual fue el objeto de estudio, definido como la unidad de análisis.

El estudio se centró en el monitoreo del desplazamiento horizontal que pudo presentar el eje central del equipo, donde fue identificado previamente que se presentan desajustes, propios de la operación. El X_0 es una variable independiente, cuantitativa, y continua.

- **Variables**

Tabla I. **Variables del estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Desplazamiento Horizontal (X_0)	Esta es la variable de monitoreo del instrumento. Describe la distancia recorrida por una onda acústica en determinada frecuencia, bajo las condiciones definidas por el instrumento y tomando como base las ecuaciones de desplazamiento de Newton.	Esta variable devolverá el dato de desplazamiento que se ha tenido del eje monitoreado de la máquina con respecto a su posición inicial (\pm) capturando las lecturas registradas, durante el proceso de operación en el tiempo. Realiza una medición en centímetros (cm) de la distancia recorrida por la onda ultrasónica, desde el punto inicial, (instrumento); hasta el punto de monitoreo del equipo dentro de un intervalo de operación. Es un número real en la escala de intervalo esperado.

Fuente: elaboración propia.

- **Fases del estudio**

Se realizó un etapa investigativa y descriptiva, donde se estudiaron comportamientos previos. Luego se ejecutó la parte de análisis de acuerdo a las fases siguientes:

- Fase 1: revisión de documentación

Aquí se revisó la documentación del fabricante para poder tomar los elementos de condiciones ideales de operación. También se revisaron los historiales de fallos y documentación competente al objeto de estudio que aportó información para el enfoque y diseño correcto. Esto se realizó de manera previa en el lugar de trabajo, al considerar algún criterio de utilidad en el estudio.

- Fase 2: recolección de la información

Esta fue la etapa más crítica de todo el proceso, ya que aquí fue donde se capturaron los datos que sirvieron para el estudio. Cabe mencionar que el diseño correcto del instrumento fue vital para la recopilación de información veraz. Dados los comportamientos del equipo que debían ser monitoreados por dispositivos de instrumentación industrial, se seleccionó la medición de desplazamiento por ultrasonido, para el monitoreo del comportamiento oscilatorio de las vibraciones propias del equipo, donde se encontró la magnitud de la distancia impartidos por el instrumento.

El alcance del estudio estuvo definido por el equipo seleccionado, centrado en técnicas descriptivas. El instrumento fue programado a través de una *protoboard* con el software *Python* y este quedó con las instrucciones deseadas. Luego fue colocado en una placa *Arduino* y encapsulado en un *case* especial para ser instalado convenientemente en el equipo. Se realizaron unas pruebas y se verificó su calibración a través de lecturas controladas, es decir corroboradas con un instrumento de medición.

En el caso de los desplazamientos, se comprobó mediante la homologación con el colector de datos *Texas Instruments CBR-2*. Una vez se validaron y se realizaron pruebas de repetitividad y reproducibilidad (R&R), se procedió a la inserción en el equipo para la captación de datos mediante monitoreo constante, durante toda la operación del equipo.

- Fase 3: análisis de información

La información resultante, la cual consistió en un plan piloto de un mes, fue tratada a través de software, se procesó con hojas de cálculo y para el análisis estadístico a través de Minitab. Se llevo a cabo el proceso de análisis exploratorio, limpieza de datos y su correcta clasificación. Luego de ello se procedió a realizar los estudios estadísticos definidos anteriormente en la metodología. El proyecto se centró en tres ramas de investigación. Estudio de estadística descriptiva, estudio de estabilidad y estudio de capacidad. Inicialmente se elaboró un monitoreo del desplazamiento horizontal, utilizando un dispositivo de instrumentación electrónica industrial, conocido como IIoT (internet de las cosas industrial), a través de ondas ultrasónicas, con el fin de captar y monitorear en tiempo real los datos de las variables de estudio, de la maquina objeto. Estos datos se depuraron conforme el estudio, evaluando su comportamiento.

Para poder contar con una herramienta que permitiera ser oportuna en la toma de decisiones fue necesario crear un modelo de análisis de datos valido. Fue por ello que se hizo necesario un análisis estadístico detallado de la información. Se utilizó herramientas de estadística descriptiva para evaluar los datos y estudiar su comportamiento. Se desarrolló un diseño de control

estadístico de procesos, mediante evaluaciones de estabilidad y capacidad del proceso, y una evaluación de la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

- Control estadístico del proceso

Se desarrollo un control de procesos, mediante las herramientas definidas, se hizo evaluaciones de estabilidad y de capacidad, para evaluar si el proceso se encontraba bajo control estadístico.

Con el fin de evaluar posibles elementos que causen variabilidad, se estudió los niveles de capacidad a largo plazo del proceso.

- Fase 4: interpretación de información

Una vez se tuvo realizado el estudio, se procedió a evaluar la confiabilidad y disponibilidad del equipo. Se definieron los estudios de estabilidad y estudios de capacidad, para tener una herramienta de información veraz y acertada, acerca del comportamiento del equipo.

Con los resultados obtenidos, se evaluó el proceso con el fin de tener criterios para toma de decisiones en cuanto a planificación de paros de máquina y para la ejecución de mantenimientos autónomos.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto fue estudiar el comportamiento de los desplazamientos horizontales del equipo como respuesta natural a su operación y analizarlos mediante un control estadístico de procesos. En este caso el equipo de estudio es el mecanismo de alimentación de una máquina de impresión industrial, la cual ha presentado desajustes en su operación. Se evaluaron datos cuantitativos, obtenidos del monitoreo en el equipo, descritos como magnitudes de desplazamientos horizontales, consecuencia de las vibraciones mecánicas.

La metodología describió un estudio no experimental, evaluado mediante el uso de estadística descriptiva, la realización de un análisis de los datos obtenidos por el equipo de monitoreo, esto incluye medidas de tendencia central, análisis de estabilidad y capacidad.

El objetivo fue obtener un estudio del comportamiento del proceso y verificar con estadística descriptiva, como se encuentra en relación a su estado deseado para la operación. Seguidamente un estudio de control estadístico de procesos, el cual incluye el estudio de centrado y los desgastes que podrían darse en el tiempo, así como la construcción de cartas de control, para el monitoreo del proceso.

Con estos estudios se concluyó que, mediante una evaluación de confiabilidad y disponibilidad, se tiene información que permitió mejorar el proceso de mantenimiento autónomo del equipo.

El estudio consistió en el capítulo uno, la definición del marco referencial y en el capítulo dos el sustento teórico general del estudio de procesos, como lo son capacidad y variabilidad del proceso en el tiempo.

En el tercer capítulo se definieron y construyeron los estudios estadísticos del proyecto, mediante un análisis estadístico descriptivo de los datos recopilados que permitieron obtener información pertinente del estado del equipo. Se presentó la información y los indicadores previamente definidos, donde se analizó la información generada, sustentando la toma de decisiones que podría darse en relación con la definición y mejora del plan de mantenimiento autónomo.

El cuarto capítulo consistió en una discusión e interpretación de los resultados de forma detallada, donde a través de los hallazgos del estudio, se presentó la información para poder sustentar las decisiones consideradas. Se realizaron también las conclusiones recomendaciones pertinentes en cuanto a la mejora continua en la operación y las posibles fuentes de variación del proceso que afecten el estado deseado del equipo.

1. MARCO REFERENCIAL

En las distintas disciplinas, la estadística ha resultado ser una ciencia que brinda una solución bastante acertada para el uso e interpretación de los datos que se obtienen al monitorear o evaluar ciertos procesos. En los años ochenta, se desarrolló como parte de las tendencias de calidad total, una metodología japonesa denominada mantenimiento productivo total, donde parte de su estructura, está en el monitoreo de ciertas variables que permiten evidenciar la próxima aparición de un fallo a través de la interpretación de datos y variables de control.

Linares (2012), afirmó que, según lo planteado por el ingeniero Japonés Seiichi Nakajima quien en 1991 ya definía las condiciones ideales de eficacia de los equipos, teniendo en cuenta el comportamiento óptimo de las variables definidas y controladas estadísticamente. El control estadístico de procesos es entonces, donde obtiene una importancia relevante en el ámbito del mantenimiento.

Si se considera esta afirmación, es posible tomar lo mencionado por Hernández-Pedreira y da Silva (2016), acerca del uso de herramientas del control estadístico de procesos para analizar posibles errores, e identificar las fuentes de variación mediante la utilización de gráficos de control de Shewhart. Como resultado de evaluar y comparar las variables identificadas, se logró evidenciar por medio de monitoreo directo en línea de producción, la identificación y contribución de estas fuentes de variación para apoyar acciones correctivas del mantenimiento.

El mantenimiento productivo total o TPM, por sus siglas en inglés, es la metodología que al ser aplicada correctamente eleva el nivel de eficacia de los equipos, aumentando la eficiencia del desempeño. Al obtener una mejora de los factores de disponibilidad, se incrementa el porcentaje de productos de calidad, se minimiza los desperdicios y los tiempos perdidos. Linares (2012), afirma también que, esta metodología japonesa incorpora nuevos conceptos a la aplicación práctica del mantenimiento, debido a que se incorporan dentro del programa las prácticas propias de la predicción y mejoras. Una de estas prácticas es el monitoreo de vibraciones mecánicas en las predicciones de fallos.

Singiresu (2012), también afirma, sustentando, que un sistema vibratorio es dinámico, cuando las variables que entran al sistema como entradas, se pueden definir como excitaciones al sistema y las salidas como respuestas, dependen del tiempo. Estas respuestas en un sistema vibratorio, suelen depender tanto de las condiciones iniciales como de las excitaciones externas. Es necesario considerar que la mayoría de los sistemas vibratorios prácticos son muy complejos, debido a que el estudio de esta naturaleza es confuso y muchas veces es imposible considerar todos los detalles para un análisis matemático. Sin embargo, en el análisis de vibraciones mecánicas práctico y que genere valor, sólo se consideran los detalles más importantes para predecir el comportamiento del sistema en condiciones de entrada específicas.

Es importante que se considere que a menudo es posible determinar el comportamiento total del sistema, a través de un modelo simple del sistema físico complejo. A pesar de la complejidad a la cual un estudio de este tipo puede llegar a presentar, también es posible simplificar prácticamente el análisis del sistema vibratorio, para la correcta interpretación de los resultados. Es por esto que el

estudio de vibraciones permitirá apoyar el modelo predictivo, incluso en la mayor parte de los sistemas que trabajan con metodología de mantenimiento productivo total, consideran esta variable como una pieza central del monitoreo de predicción.

Por este motivo considerando lo que Olarte y Botero (2011), concluyen en su publicación acerca de las técnicas empleadas en el mantenimiento predictivo, sobre el estudio de los impulsos ultrasónicos o de las ondas sonoras. Se afirma que, a través de monitoreos temporales de estas frecuencias, se ha permitido conocer características y propiedades propias de operación de un equipo, para luego ser utilizadas en múltiples aplicaciones de tipo industrial. El análisis de ultrasonido es una técnica útil en el mantenimiento, porque sirve como predictor para detectar, no solo el sitio exacto donde está ocurriendo algún tipo de problema, sino poder prevenirlo.

Besterfield (2009), menciona la importancia de la confiabilidad en equipos automatizados, como un componente estadístico que permite monitorear estadísticamente la capacidad de un equipo de desempeñar sus funciones propias durante un periodo de tiempo.

Si se considera lo mencionado por Gutiérrez y de la Vara (2013), que mencionan que la confiabilidad es la probabilidad que un equipo funcione de la manera correcta en el desempeño de la función establecida, es importante conocer estos valores. Es por ello que se ha decidido la implementación de un sistema de monitoreo del equipo a través de instrumentación ultrasónica, la cual se encargará de monitorear los desplazamientos horizontales que se generan en el vibrar la máquina, con el fin de obtener los datos deseados. Estos datos generarán el *input* de entrada, de los elementos que serán estudiados mediante

un análisis estadístico de procesos (CEP). Es importante mencionar que estos datos deben estar estudiados y analizados para que pueda existir una congruencia.

En cuanto al uso de las cartas de control, Cobos, J. (2015), indica que es válido e importante el uso de las mismas, sobre todo en el ámbito industrial, sin importar que las corridas de producción sean grandes, o que sean cortas. Esto se mediante la integración de lotes de producción con sus respectivas especificaciones de calidad. Para el caso del control de estos procesos, los cuales tienen una alta variabilidad se utilizaron cartas de control como la herramienta estadística adecuada.

Lo que indican Gasca, Camargo y Medina (2017) , es que no es suficiente solo con la estimación de la confiabilidad de los equipos industriales mediante historiales de fallas propiamente, es indispensable que se tenga un correcto análisis estadístico, registros de datos asociados a los atributos y requerimientos. Existen diversas herramientas como el análisis del modo, catálogos de fallas identificadas o manual de defectos, AMEF, efectos de falla, todo en dependencia de los equipos y el tratamiento de los datos históricos que se deben hacer para asegurar la confiabilidad de las máquinas, mediante la correcta gestión del mantenimiento.

2. MARCO TEÓRICO

La industria 4.0, como se les denomina actualmente a los procesos automatizados en la industria moderna de todo tipo, está sustentada en el tratamiento de la información y sistemas de control. La estadística es de suma importancia, no solo en los diseños de estos dispositivos, sino en el procesamiento de la información y su correcta interpretación. La ingeniería ha evolucionado dando paso a las denominadas plantas inteligentes, donde la robótica va tomando un papel más trascendental en los procesos.

Es por ello que las máquinas deben contar con un correcto programa de mantenimiento, para su óptimo funcionamiento. El control estadístico es la herramienta trascendental para optimizar el funcionamiento de estos equipos como medio para la toma de decisiones durante un evento externo.

2.1. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R)

El estudio de repetibilidad y reproducibilidad, es una herramienta que se desarrolla para considerar que el equipo de medición evaluado es capaz de desarrollar las mediciones de forma confiable. Uno de los efectos inmediatos que podrían generarse en el estudio es aceptar información que estuviera errónea o que se tuviera mediciones incorrectas. Esto podría considerarse un error demasiado alto para el experimento, ya que se estaría perdiendo completamente su objetividad. Se consideró el siguiente postulado:

H₀: Los datos emitidos por el instrumento de medición son correctos

H_a: Los datos emitidos por el instrumento de medición no son correctos

Lo que se busca en el estudio era descartar que la fuente de variación provenga de los instrumentos, debido a que estos no tienen la capacidad de reproducir y replicar la información registrada. Esto también evita que se cometa el error Tipo I, denominado error de tipo alfa α o falso positivo, donde se rechaza la hipótesis nula.

Según lo definen Gutiérrez y de la Vara (2015), la fuente de variabilidad debe provenir del proceso propiamente y no de los instrumentos, para ello se definen los conceptos siguientes:

- **Calibración:** la cual se define en la exactitud y linealidad que el instrumento tiene por naturaleza.
- **Estabilidad:** Esta variable se refiere al cambio que sufre el instrumento dentro del transcurso del tiempo.
- **Repetibilidad:** Esta variable es la variación observada en el instrumento para poder registrar de manera repetida la misma medición.
- **Linealidad:** Es la exactitud en las mediciones que presenta un instrumento dentro de un rango de operación.

El concepto primordial del estudio de repetibilidad y reproducibilidad está definido en la expresión siguiente.

$$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_{Instrumento} + \sigma^2_{Error} \quad (\text{Ec. 01})$$

2.2. Estudio de atipicidad de datos de Grubbs

Los datos atípicos, puedan presentarse en todos los estudios observacionales, pudiendo alterar o afectar en la objetividad del análisis estadístico, es por ello que se recomienda que se ejecute. El estudio consiste en hacer una prueba con los datos observados y compararlos con el valor comparativo teórico para desestimarlos. La hipótesis nula de la prueba es asumir que los datos trazan una distribución gaussiana y su objetivo es demostrar que ninguno o alguno de los datos, es atípico. De ser así la prueba lo identifica para que este dato sea evaluado y se verifique su tratamiento. Para cada dato se realiza una prueba, mediante la utilización de la ecuación siguiente:

$$G_{calc} = \frac{|X_o - \bar{X}|}{s} \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde G_t es el valor tabulado o teórico, comparativo correspondiente a la cantidad de observaciones, para ello se utiliza la tabla de valores G. Supuestos del método de Grubbs para atipicidad

H₀: Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

H_a: El valor mínimo o máximo de los datos del estudio es un valor atípico

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Como lo interpretan en su publicación Lina y Parra (2020), esta prueba debe aplicarse en los datos para poder tomar una decisión correcta y lo consideran uno de los criterios de aceptación de su estudio.

2.3. Estadística descriptiva y análisis de datos

La estadística descriptiva es el primer elemento para el tratamiento de los datos. Según Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Yeng, K. (2012), esta herramienta es útil, como un conjunto descriptivo que ofrece estadísticamente un sentido de análisis preliminar de los datos, así como estudiar la variabilidad y la distribución de las observaciones que se tienen en los datos obtenidos o de la muestra seleccionada.

Al considerar la estadística descriptiva en el estudio exploratorio se puede precisar que es posible incluir ciertas herramientas estadísticas específicas que permiten investigar a fondo la información adquirida, la cual servirá en el desarrollo de inferencia.

Cuando se define el análisis exploratorio es necesario evaluar los gráficos, medidas de tendencia, dispersión y estudios adicionales que permitan describir de forma analítica la naturaleza de las observaciones.

Debe considerarse la representación gráfica de los valores o conjunto de datos, partiendo del supuesto que las observaciones deben ser agrupadas en una tabla de frecuencias, por cuestiones de practicidad y analizar de forma más representativa los datos asociados a las observaciones.

2.3.1. Construcción de datos mediante técnicas de agrupación

Las definiciones anteriores, fortalecidas por Besterfield (2009), cuando establece que es necesario una agrupación de datos, para poder considerarlos

como una aglomeración representativa de observaciones semejantes, ya que los datos al estar ordenados tienen un mejor y mayor sentido de análisis y es mejor para su procesamiento.

Para la construcción de datos agrupados, se definen las ecuaciones propias y que apliquen en el estudio, las cuales se irán construyendo y utilizando mediante el estudio avance. Se menciona la importancia de estos elementos estadísticos descriptivos agrupados como una forma adecuada de visualizar los datos y realizar las pruebas pertinentes a continuación. Se considera almacenar, ordenar y calcular parámetros sobre el conjunto de datos recogidos en la investigación.

Según lo menciona Besterfield (2009), los pasos a seguir son los siguientes para la construcción de un modelo de datos agrupado para una variable continua:

- Recolección de datos, y su respectiva dispersión.
- Determinación del rango o recorrido.
- Determinación del intervalo de clase.
- Determinación de la marca de clase.
- Determinar los límites de clase.
- Construir y analizar las frecuencias de los datos distribuidos.

Los datos agrupados es una forma más objetiva del análisis de una cantidad grande de datos, para poder construir el número de clase (k), fue necesario utilizar la ecuación de Sturges, ya que el número de datos n , es mayor que 100.

$$k = 1 + 3.3 (\text{Log } (n)) \quad (\text{Ec. 03})$$

El rango o amplitud se calcula mediante la diferencia entre los datos máximo y mínimo.

$$R = Xi_{max} - Xi_{min} \quad (\text{Ec. 04})$$

Con estos datos se procede al cálculo del intervalo de clase, con el que se procede al cálculo de los intervalos.

$$i = \frac{R}{k} \quad (\text{Ec. 05})$$

Para este caso los datos ajustados representan casi la totalidad de las observaciones, ya que los datos fuera de especificación fueron únicamente un 0.0280 % que es una fracción despreciable. Esto permitió que se calculara la marca de clase para la definición de los límites aparentes.

$$Xi = \frac{(\text{Limite Superior} + \text{Limite Inferior})}{2} \quad (\text{Ec. 06})$$

2.3.2. Medidas de tendencia central y agrupación

Para este estudio se analiza la información que evidencie el comportamiento en los datos, se realizan los cálculos para los estadígrafos de medida de tendencia central, mediante las expresiones siguientes, como lo menciona Besterfield (2009).

2.3.2.1. Media aritmética

Este estadígrafo muestra la representación central de la distribución observada de las frecuencias de datos.

$$\bar{X} = X_0 + \frac{\sum d'_i f_i}{\sum f_i} * i \quad (\text{Ec. 07})$$

Donde:

$$d'_i = \frac{X_i - X_0}{i} \quad (\text{Ec. 08})$$

2.3.2.2. Mediana

Este estadígrafo representa el valor del centro de la distribución de frecuencia de los datos. Muestra el equivalente al percentil 50, es decir el punto medio de la distribución de frecuencias o el cuartil 2.

$$M_e = L_i + \frac{\left(\frac{\sum f_i}{2}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 09})$$

2.3.2.3. Moda

El dato con la mayor frecuencia observada. Sin embargo, en este caso al trabajarlo como un conjunto agrupado de datos se concibe como el valor que más se repite en el conjunto de datos, pero se refiere al valor aproximado dentro de la clase que presenta una mayor frecuencia absoluta.

$$M_o = L_i + \frac{(f_o - f_a)}{(f_o - f_a) + (f_o - f_p)} * i \quad (\text{Ec. 10})$$

2.3.2.4. Promedio geométrico

Este estadígrafo tiene una aplicación importante en este estudio, ya que no se ve afectado por valores extremos al calcular el promedio. Algunos autores la refieren como medida de posición no central.

$$M_g = \text{antilog} \left(\frac{\sum(\log X_i) * f_i}{\sum f_i} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

2.3.2.5. Promedio armónico

Al promediar los datos de variación de forma inversamente proporcional se obtiene este estimador. Algunos autores la refieren como medida de posición no central. Se le puede referir también como cuantil.

$$M_h = \frac{1}{\left(\frac{\sum \left(\frac{1}{X_i} * f_i \right)}{\sum f_i} \right)} \quad (\text{Ec. 12})$$

2.3.2.6. Cuartil 1 o Percentil 25

Aquí se acumula en 25 % de la distribución de frecuencias de los datos observados.

$$Q_1 = L_i + \frac{\left(\frac{\sum f_i}{4}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 13})$$

2.3.2.7. Cuartil 3 o Percentil 75

Aquí se acumula en 75 % de la distribución de frecuencias de los datos observados.

$$Q_3 = L_i + \frac{\left(\frac{3 * \sum f_i}{4}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 14})$$

2.3.2.8. Decil 1 o Percentil 10

Aquí se indica la cantidad que se acumula en el 10 % de la distribución de frecuencias de los datos observados.

$$D_1 = L_i + \frac{\left(\frac{\sum f_i}{10}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 15})$$

2.3.2.9. Decil 9 o Percentil 90

Indica que por debajo de esta curva se acumula el 90 % de la distribución de frecuencias de los datos observados.

$$D_9 = L_i + \frac{\left(\frac{9 * \sum f_i}{10}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 16})$$

2.3.3. Medidas de dispersión o variación

Para conocer el nivel en el que se alejan los datos agrupados respecto a la media aritmética, es necesario realizar los cálculos de las medidas de dispersión o variación.

Para conocer el parámetro de dispersión se procede de forma similar, evaluando los estadígrafos necesarios para el análisis.

2.3.3.1. Varianza

Medida de dispersión que representa el cuadrado del promedio de las diferencias que existen entre los valores observados y el promedio.

$$s^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2 * f_i}{\sum f_i} \quad (\text{Ec. 17})$$

2.3.3.2. Desviación estándar

Este estadígrafo es la medida de dispersión de los datos respecto a la media aritmética, se calcula como sigue.

$$s = \sqrt{n * \sum_{i=1}^h (f_i X_i^2) - \left(\sum_{i=1}^h f_i X_i\right)^2 / n (n - 1)} \quad (\text{Ec. 18})$$

2.3.3.3. Coeficiente de variación de Pearson

Se define como el valor que indica porcentualmente la relación entre la desviación estándar y el promedio aritmético, para ver qué tan alejados se encuentran.

$$V = \frac{s}{\bar{X}} * 100 \quad (\text{Ec. 19})$$

2.3.3.4. Amplitud entre el 80 %

El 80 % de los datos tienen una amplitud. Fue necesario calcular los deciles 1 y 9.

$$Amp (80) = D_9 - D_1 \quad (\text{Ec. 20})$$

2.3.3.5. Amplitud entre el 50 %

El 50 % de los datos tienen una amplitud. Para ello fue necesario calcular los cuartiles 1 y 3.

$$Amp (50) = Q_3 - Q_1 \quad (\text{Ec. 21})$$

2.3.4. Medidas de asimetría o sesgo

Para el estudio de asimetría del proceso se procede a realizar el análisis correspondiente, para entender si existe o no un corrimiento en los datos.

2.3.4.1. Rango intercuartílico

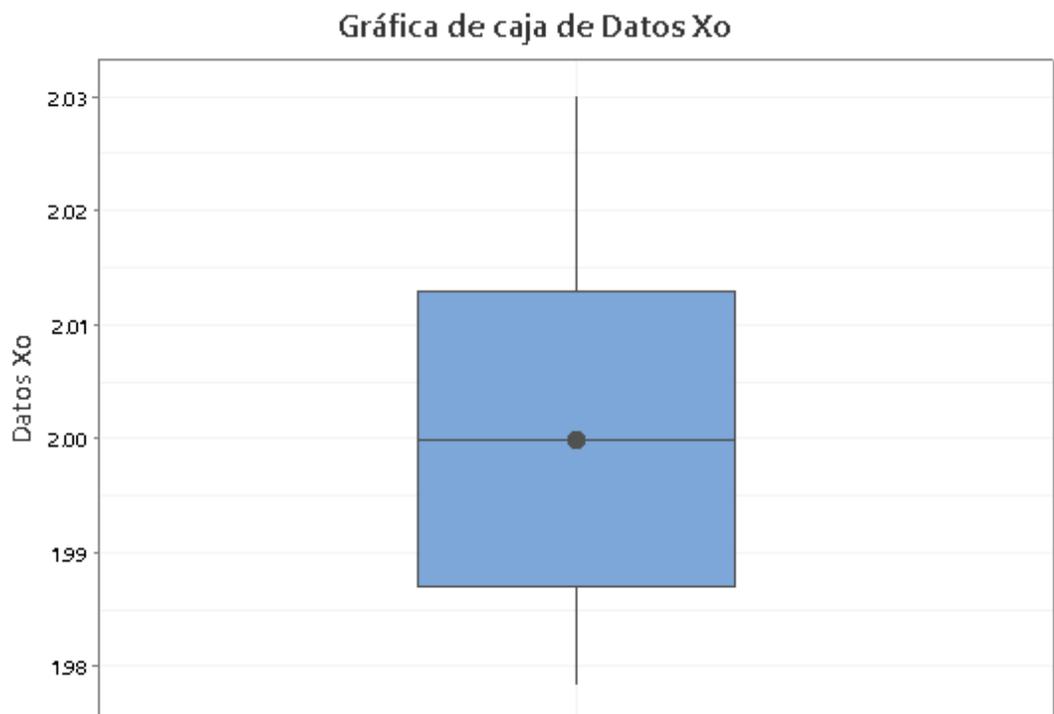
Para este caso se calcula el rango intercuartílico, el cual queda definido para conocer por medio de un estadístico robusto, que tanta dispersión existe entre el 75 % y el 25 % de la distribución de los datos.

Debido que se tiene una baja exposición a valores extremos este dato expresa cuantas observaciones entre el tercer cuartil y el primer cuartil se tienen, considerando la mediana como la medida de tendencia central.

$$RIC = L_i + \frac{\left(\frac{3 * \sum f_i}{4}\right) - F_i}{f_i} * i - L_i + \frac{\left(\frac{\sum f_i}{4}\right) - F_i}{f_i} * i \quad (\text{Ec. 22})$$

Para la interpretación de este estadístico se puede realizar un gráfico de Box-Plot o de cajas y bigotes, el cual explica de forma gráfica los puntos extremos observados y los datos acumulados.

Figura 2. **Diagrama de cajas y bigotes para el rango intercuartílico**



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

2.3.4.1. Cálculo de los momentos estadísticos

Los momentos estadísticos son una medida cuantitativa específica de los datos, los cuales son necesarios para encontrar las medidas de asimetría.

$$m_2 = \frac{\sum[(X_i - \bar{X})^2 * f_i]}{\sum f_i} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$m_3 = \frac{\sum[(X_i - \bar{X})^3 * f_i]}{\sum f_i} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$m_4 = \frac{\sum[(X_i - \bar{X})^4 * f_i]}{\sum f_i} \quad (\text{Ec. 25})$$

2.3.4.2. Coeficiente de asimetría α_1

Se realiza mediante el cálculo del coeficiente de asimetría α_1 para poder evaluar de una mejor forma los datos.

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{m_3^2}}{\sqrt{m_2^3}} \quad (\text{Ec. 26})$$

2.3.4.3. Coeficiente de asimetría de Fisher

Se realiza una prueba con el coeficiente de Asimetría de Fisher para poder evaluar el comportamiento de la asimetría, como un indicador adicional. Se tuvo una respuesta similar al coeficiente de asimetría α_1 .

$$Y_1 = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (\text{Ec. 27})$$

2.3.4.4. Coeficiente de asimetría de Bowley-Yule

Se realiza esta prueba para conocer el valor de la asimetría mediante un estadígrafo más robusto. Este coeficiente de asimetría de Bowley-Yule considera los datos agrupados en los cuartiles Q_3 y Q_1 , adicional de la mediana.

$$A_{BY} = \frac{Q_3 + Q_1 - 2 M_e}{Q_3 - Q_1} \quad (\text{Ec. 28})$$

2.3.5. Medidas de agudez o curtosis

Para este análisis es necesario calcular unos momentos, de orden $r = 4$ y $r = 2$, y luego hacer un análisis de acuerdo a las ecuaciones definidas. Lo que se busca es el grado de apuntamiento de la distribución de datos.

$$\alpha_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 \quad (\text{Ec. 29})$$

2.4. Evaluación de aleatoriedad de datos

Para poder concluir que los datos provienen de un proceso que se comporta de forma aleatoria, fue necesario realizar una prueba de Rachas. La aleatoriedad de los datos es de suma importancia en un control estadístico de procesos ya que evita y reduce al mínimo, que se produzca un sesgo en la información y que al procesarla esta sea incorrecta.

2.4.1. Prueba de Rachas para aleatoriedad

Con la finalidad de comprobar el supuesto en que el proceso cumpliera con el criterio de ser aleatorio en cuanto a la distribución de sus datos, es posible concluir que todos los datos tienen igual probabilidad de ocurrencia.

Para el desarrollo de esta prueba a la distribución de datos, se postuló la siguiente hipótesis.

H₀: Si hay aleatoriedad en la lectura de los datos

H_a: No hay aleatoriedad en la lectura de los datos

Lo que se busca con este tipo de prueba fue tener en consideración que se tiene una fuente de datos aleatoria y que esta misma cumple este supuesto.

$$\mu_r = \frac{2 * n_1 * n_2}{n_1 + n_2} + 1 \quad (\text{Ec. 30})$$

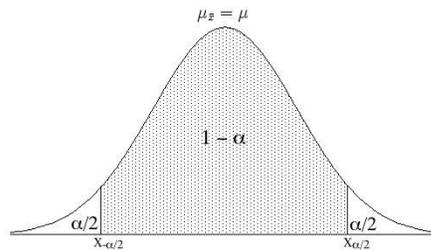
$$\sigma_r = \sqrt{\frac{2 n_1 n_2 (2 n_1 n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)}} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$Z = \frac{r - \mu_r}{\sigma_r} \quad (\text{Ec. 32})$$

Luego se construyen las pruebas necesarias para contrastar la hipótesis del estudio.

Figura 3. Resultados para la prueba de rachas

Valor Critico	Estadístico de Prueba
$\alpha/2$: 0.025	$Z = -0.54272$
Z (alfa/2): -1.95996	p-valor : 0.29366



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

2.5. Análisis de normalidad

El requisito que debe cumplirse para que la validez de los estudios de estabilidad y capacidad sea válida es que los datos tracen una distribución normal o que tiendan a serlo. Por lo que se utilizaron los fundamentos siguientes.

2.5.1. Prueba de Chebyshev y regla empírica

El teorema de Chebyshev postula que, para los datos de cualquier distribución que tenga una varianza pequeña, se tiene el 75 % de sus datos concentrados en dos desviaciones estándar de la media. Esto aplicaría, aunque los datos tracen cualquier forma de distribución (o incluso no ser conocida), y no necesariamente para una distribución gaussiana. El teorema dicta la afirmación que, si se tiene una variable aleatoria y esta, cumple con tener una desviación

estándar lo suficientemente pequeña, podría asumirse que la probabilidad de contener estos datos y la mayor parte de ellos agrupados en un intervalo muy cerca de la media, es muy grande.

$$[\bar{X} \pm k \sigma] \quad \text{Es al menos } 100 * \left[1 - \frac{1}{k^2}\right] \% \quad (\text{Ec. 33})$$

2.5.2. Teorema del límite central

El teorema del límite central se utilizó para poder sustentar el comportamiento de normalidad de los datos a largo plazo. Por esto se definió

$$Z_i = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (\text{Ec. 34})$$

Al recolectar muestras simples aleatorias de tamaño n , de cualquier población que posea una media \bar{x} y desviación típica σ , la distribución de probabilidad para la media muestral se aproximará a una distribución gaussiana con media μ y desviación típica (error estándar), a medida que n crezca.

$$X_i \leq \bar{X} \leq X_s$$

$$P(Z_s \leq Z_{\bar{X}} \leq Z_i)$$

2.5.3. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov

Para poder concluir que los datos se aproximan a una distribución normal, fue posible contar con una prueba de bondad de ajuste para datos agrupados.

Esta es una prueba no paramétrica que busca definir que una distribución o frecuencia de datos, se aproxima a la normal. Fue por ello que, sirvió para validar las anteriores suposiciones, mediante su uso.

2.5.3.1. Frecuencia relativa observada

Para este cálculo se necesitó definir unos cálculos necesarios para construir el estadígrafo. La frecuencia relativa introduce el concepto de probabilidad al relacionar el cociente entre la frecuencia absoluta del intervalo y la cantidad de observaciones de la muestra. Para la frecuencia relativa observada acumulada, se fue acumulando el valor absoluto entre cada intervalo.

$$f_{r\ ob} = f_i / N \quad (\text{Ec. 35})$$

2.5.3.2. Frecuencia relativa esperada acumulada

Este cálculo permitió obtener un estimador de los valores que se esperarían en el intervalo de clase de los datos, mediante el límite real superior de cada clase. Se utilizaron las medidas de tendencia central calculadas en los datos agrupados, para validar si en efecto se cumplía el supuesto de afirmar que los datos provienen de una aproximación normal. De esta forma, se evitaría sesgar los datos esperados con valores que pudieran contener fuentes de variación.

$$F_{r\ es} = \Phi \left(Z = \frac{LRs - \mu}{\sigma} \right) \quad (\text{Ec. 36})$$

2.5.3.3. Prueba de aproximación a la normal

Para este cálculo se tabularon los resultados a manera de poder construir el estadístico de prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov. Se procedió a definir la hipótesis de esta prueba para contrastar con un 5 % de significancia estadística.

Si $D_t > D_c$: Acepta H_0

H_0 : Los datos se aproximan a una distribución normal

H_a : No existe evidencia suficiente para concluir una aproximación normal

El estadístico de prueba para este estudio se definió mediante el uso de la ecuación siguiente.

$$(K - S)D_c = \text{MAX} |F_{r ob} - F_{r es}| \quad (\text{Ec. 37})$$

Para contrastar la hipótesis fue necesario el cálculo del valor crítico tabulado, de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov

$$D_t (\alpha=5\%, N=710) = \frac{1.36}{\sqrt{N}} \quad (\text{Ec. 38})$$

2.6. Estudio de control de proceso

Para los controles del proceso, es necesario contar con herramientas estadísticas que permitan sustentar las decisiones tomadas a partir de los

análisis de datos. Como lo indican Walpole et al (2012), existen herramientas de control de calidad que cada vez tienen un nivel de atención en la administración más importante. En estas herramientas se analizan las características importantes de un producto en comparación con algún tipo de estándar.

Bajo la premisa que, un programa de control de procesos es eficaz y que aumenta la probabilidad de evitar que se tenga un comportamiento o resultado indeseado, y considerando que, en la actualidad se puede observar la gran aplicabilidad de estos controles, sobre todo en plantas de producción o en procesos donde se manejen altos volúmenes.

Se considera la importancia de su implementación al modelo de predicción de fallos evaluado. Considerando que se tiene como objetivo para una carta de control, determinar el desempeño y evaluar el nivel aceptable, en cuanto a la estabilidad de un proceso.

2.6.1. Estudio de estabilidad estadística

Se espera, como dice Besterfield (2009), que cualquier proceso, aunque experimente una variabilidad natural, debida esencialmente a fuentes externas, ajenas o incontrolables, puede experimentar también en las mediciones de desempeño, y pueden ser manejables, tal como sucede con el mantenimiento de los equipos.

Anteriormente se había postulado que los procesos siempre tienen un desgaste y una variación natural en la operación y para ello se realizó un análisis donde se evaluaron posibles causas.

- **Variación por causas comunes:** Se definió como la variabilidad que permanece de forma natural como consecuencia de las condiciones de operaciones, fue estudiada mediante una espina de Ishikawa y las 6M del proceso. Es aquí donde se encontraron las fuentes de variación.
- **Variación por causas especiales:** Debido a que esta es causada por situaciones especiales las cuales no se presentan de forma normal o permanente, sino que son debido a situaciones ajenas al proceso, no se detectaron durante el periodo de estudio.

Debido a que, de forma natural, dentro del proceso siempre se tienen variaciones, y que a través de las 6M se consideró que la (M) Maquinaria, aportó más variación, se identificó como la fuente donde ocurrían los problemas más significativos del proceso.

2.6.1.1. Cartas de control por variables

Para evaluar el efecto sobre la estabilidad, debido a las causas de variación comunes del proceso, de forma cuantitativa se realizó el análisis correspondiente mediante cartas de control por variables, con el fin de evaluar esta fuente de variación y el efecto de salida del proceso.

Como se observó causas de variación que son de forma natural y otras como consecuencia de variaciones especiales a través del tiempo, se identificó que se dieron por motivo de desajustes, desgastes, errores, y fallas en el equipo.

En las cartas de control por variables, se define los límites de control estadísticos superior e inferior. Estos definen un intervalo de aceptación en el cual los datos de los estadígrafos calculados fluctúan de forma aleatoria dentro de ellos, de forma gráfica, dentro del rango de variación definido como W . Se trazaron los gráficos de Shewhart para la definición de las cartas, a manera de evaluar en qué momento se tiene un control estadístico en el proceso, y sea posible observar que los valores se encuentran dentro de los límites W de la gráfica. En caso de encontrar puntos fuera de control, se realizará un recálculo de ajuste para estabilizar el proceso y luego se revisa el índice de inestabilidad S_t . Si se obtiene en la observación puntos fuera de los límites, se evidencia la presencia de un evento fuera de lo esperado de forma natural.

2.6.1.2. Cálculo de factores para gráficos de Shewhart

Según lo definido en las cartas de control, estas se construyen haciendo uso de los gráficos de Shewhart, los cuales se construyeron en dependencia de las variables que se estarán definiendo, para ello fue necesario también el cálculo de variables utilizadas en la construcción de los mismos. Los gráficos de Shewhart se construyeron para las cartas de control, y se utilizaron debido a que cuenta con muchos datos y subgrupos. Por lo cual se cumple la condición.

Mediciones (η) X_i

Subgrupo k

Luego se procedió al cálculo de las variables, para los elementos de las ecuaciones. Para ello se hizo uso de la tabla a continuación con los valores propuestos para las constantes definidas, en función de η y k .

Tabla II. **Factores para el cálculo de los gráficos de Shewhart**

η	C2	d2	d1
16	0.9523	3.5320	0.7490
17	0.9551	3.5880	0.7430
18	0.9576	3.6400	0.7380
19	0.9599	3.6890	0.7330
20	0.9619	3.7350	0.7290
21	0.9630	3.7780	0.7240
22	0.9655	3.8190	0.7200
23	0.9670	3.8580	0.7160
24	0.9684	3.8950	0.7120
25	0.9696	3.9310	0.7090

Fuente: Besterfield (2009). *Control de Calidad*. p.514.

Luego se procedió a calcular las constantes necesarias para la estimación de las variables de las distintas graficas de Shewhart, para construir las cartas de control, mediante las ecuaciones siguientes.

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ec. 39})$$

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \quad (\text{Ec. 40})$$

$$A_3 = \frac{3}{C_4 \sqrt{n}} \quad (\text{Ec. 41})$$

$$d_2 = \frac{\bar{R}}{\sigma} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$C_2 = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{Ec. 44})$$

$$C_4 = C_2 \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (\text{Ec. 43})$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{C_4} \sqrt{(1 - C_4^2)} \quad (\text{Ec. 45})$$

$$B_4 = 1 + \frac{3}{C_4} \sqrt{(1 - C_4^2)} \quad (\text{Ec. 46})$$

$$B_5 = C_4 - 3 * \sqrt{(1 - C_4^2)} \quad (\text{Ec. 47})$$

$$D_1 = d_2 - 3 d_1 \quad (\text{Ec. 48})$$

$$D_2 = d_2 + 3 d_1 \quad (\text{Ec. 49})$$

$$D_3 = 1 + \frac{3 d_1}{d_2} \quad (\text{Ec. 50})$$

Una de las categorías de variación del proceso que menciona Besterfield (2009), se da como resultado de la variabilidad en el tiempo, ilustrada como una variación de un servicio obtenido en distintas horas o condiciones del día o periodo evaluado. Un servicio que puede brindar un equipo puede variar en el tiempo debido a desgastes en la herramienta, dando como resultado una variabilidad en la característica del servicio entregado.

Según lo definen Gutiérrez y de la Vara (2013), los instrumentos para analizar los datos en relación a la estabilidad, son las cartas de control. Esta técnica tiene por objeto observar y analizar estadísticamente el proceso a través del tiempo. Es importante considerar que dichas variaciones que se puedan presentar por causas comunes, como el desgaste en el tiempo del proceso a largo plazo y las variables definidas e identificadas, así como las fuentes atribuibles, ayudará a especificar el funcionamiento del proceso, lo que permitirá elegir las acciones pertinentes de control más adecuadas.

Las cartas de control son una herramienta de análisis estadístico, donde se puede estudiar el proceso, cuando este se relaciona a la variable endógena de modo que permita considerar un criterio en el estudio de la variabilidad que pueda observarse. Gutiérrez y de la Vara (2013), definen que las cartas de control son utilizadas en la evaluación de los criterios de variabilidad en el estudio del proceso, a través del tiempo, valiéndose de detecciones tempranas, que permitan una mejora al reducir las fuentes de variabilidad.

Las cartas de control permiten apoyar el análisis del proceso en relación a la variable de salida esperada y para tomar un criterio de la variabilidad que pueda presentar el proceso. Gutiérrez y de la Vara (2013), indican que, si las cartas de control son una fuente de control visual para evaluar la variabilidad en el estudio del proceso, debe considerarse también el estudio del índice de inestabilidad para mantener, un buen criterio sobre el análisis de los puntos evaluados en estos gráficos, evidenciando así un buen control de estabilidad.

Las cartas de control se construyen mediante los gráficos de Shewhart, de los cuales se iniciará con el uso de cartas de control de rangos y medias, para poder evaluar de manera preliminar el comportamiento de los datos. Para su

construcción utilizamos las expresiones siguientes, lo cual permite construir los límites inferior y superior.

2.6.1.3. Definición de carta de control \bar{x} -R

Gutiérrez y de la Vara (2013), explican que las cartas de control estadístico de procesos, de medias y rangos, son útiles cuando se estudia la estabilidad y existen muchos datos y subgrupos en un gráfico. Para la carta de Rangos se utilizarán las expresiones siguientes.

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{k} \quad (\text{Ec. 51})$$

$$LCI_R = D_3 \bar{R} \quad (\text{Ec. 52})$$

$$LCS_R = D_4 \bar{R} \quad (\text{Ec. 53})$$

Se debe elaborar las cartas de control de medias, que permitan la medición de las mismas. Para esta carta se utilizarán las expresiones siguientes.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}_i}{k} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (\text{Ec. 56})$$

2.6.1.4. Definición de carta de control \bar{x} -S

En el estudio de la media-desviación en cartas de control, es importante acotar que esta es la técnica estadística de estabilidad con mayor potencia. Su uso es mayor en control y detección de puntos o comportamientos que tienen pequeños cambios en los datos. Se construyen utilizando las expresiones siguientes.

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i}{k} \quad (\text{Ec. 57})$$

$$LCI_S = B_3 \bar{S} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$LCS_S = B_4 \bar{S} \quad (\text{Ec. 59})$$

Para la construcción de la carta de control de promedio-desviación, se hace uso de los estadísticos anteriormente definidos y se construyen los límites de control mediante las ecuaciones siguientes.

$$LCI_S = B_3 \bar{S} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$LCS_S = B_4 \bar{S} \quad (\text{Ec. 61})$$

2.6.1.5. Índice de inestabilidad de proceso S_t

El índice de inestabilidad del proceso mostro el grado de control estadístico detectado en el análisis. Lo que represento el indicador, fue el registro de los puntos especiales observados en las cartas de control, los cuales varían fuera de

los límites definidos. Representa el cambio del promedio de variación, y se construyó al cuantificar los puntos fuera de los límites de control definidos.

$$S_t = \frac{\text{Puntos especiales}}{\text{Puntos totales}} * 100 \quad (\text{Ec. 62})$$

2.6.2. Estudio de capacidad estadística

Es de suma importancia comprobar que el proceso, está controlado y que cuenta con un nivel de cumplimiento en el tiempo. Al evaluar las variables, las cuales deben desempeñarse bajo especificaciones, para poder considerar que el proceso funciona de forma correcta. Gutiérrez y de la Vara (2013), definen que los índices de capacidad, deben ser analizados en las mediciones especializadas, al realizar evaluaciones del nivel que mantiene un proceso para cumplir las especificaciones.

La evaluación de la capacidad del proceso cobra relevancia al momento de conocer el compartimiento que tiene, prediciendo algún problema antes que este pueda presentarse, sin embargo, en ocasiones el uso de los mismos no es suficiente, sobre todo si se conocen las limitaciones de estos instrumentos de control estadístico.

Es importante conocer la amplitud que se presenta de manera natural en la operación sobre la variación, para saber si este proceso tiene las características suficientes, es decir que cumplirá con especificaciones.

2.6.2.1. Cálculo de índice de Capacidad Cp

El índice que muestra la capacidad potencial del proceso Cp es definido, por la diferencia en las especificaciones del proceso (ES, EI), y en el nivel de desviación estándar σ definido por la razón:

Índice de capacidad $C_p = \text{variación esperada} / \text{variación real}$

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (\text{Ec. 63})$$

$$C_p = \frac{\text{Variación Tolerada}}{\text{Variación Real}} \quad (\text{Ec. 64})$$

Este índice muestra la capacidad nominal. Esto quiere decir que: “para que el proceso sea considerado potencialmente capaz de cumplir con especificaciones, se requiere que la variación real (natural) siempre sea menor que la variación tolerada” Gutiérrez y de la Vara (2013, p. 99).

Para poder considerar este indicador de forma estadística durante el estudio, se construyeron intervalos de confianza con un nivel de significancia del 5 %. Este indicador muestra repetibilidad.

$$\widehat{C}_p \pm Z_{\alpha/2} \frac{\widehat{C}_p}{\sqrt{2n-1}} \quad (\text{Ec. 65})$$

2.6.2.2. Índice de capacidad real C_{pk}

Para estos análisis se hizo necesario realizar los cálculos para los índices inferiores y superiores del estudio de capacidad.

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3 \sigma} \quad (\text{Ec. 66})$$

$$C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3 \sigma} \quad (\text{Ec. 67})$$

$$C_{pk} = \text{Min}[C_{pi}, C_{ps}] \quad (\text{Ec. 69})$$

$$C_{pk} = \text{Min} \left[\frac{\mu - EI}{3 \sigma}, \frac{ES - \mu}{3 \sigma} \right] \quad (\text{Ec. 68})$$

Como el índice C_{pk} es una medición ajustada del indicador de capacidad potencial, realizado de manera que se considere el centrado del proceso. Para determinar dentro del proceso el centrado, el cual indica el cumplimiento de especificaciones mínimas, fue necesario también definir casos especiales que podrían presentarse.

Esta definición es la fuente de variabilidad que para este caso en particular se define como un desajuste en la operación del equipo que sale de los parámetros aceptados para que el equipo no sufra las perturbaciones. Para la estimación a un nivel de confianza del 95 %, de este indicador se estimó los intervalos de confianza.

$$\hat{C}_{pk} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{C}_{pk}^2}{2n-1} + \frac{1}{9n}} \quad (\text{Ec. 70})$$

2.6.2.3. Cálculo de índice K

En los estudios de capacidad, se debe evaluar si dentro de un proceso, la característica de calidad se distribuye en una posición de centrado frente a sus especificaciones. Gutiérrez y de la Vara (2013), definen esta herramienta como la media del proceso μ , y la relación del valor nominal esperado N . Se calcula relacionando las especificaciones del proceso (ES y EI). Este valor nominal se constituye como la magnitud esperada de especificación.

$$K = \frac{\mu - N}{1/2 (ES - EI)} \times 100 \quad (\text{Ec. 71})$$

El indicador del valor nominal del proceso N para este proyecto estaría dado por la distancia del desplazamiento horizontal óptima que se esperaría que el equipo funcione, es decir asumiendo que no hay más desplazamientos y que el equipo funciona sin desajustarse, aunque esto no es posible en la realidad, dados los movimientos mecánicos generados por la operación y la inercia del equipo, solo se considera como un valor nominal.

El valor nominal (N) es la medición esperada del desplazamiento horizontal. Por lo que se espera cumplir con la condición esperada: $K < 20 \% (N)$.

2.6.2.4. Cálculo de índice de Taguchi

El indicador más estricto de control de procesos es el índice de Taguchi (C_{pm}). Este indicador no solo mide la capacidad nominal que se espera del proceso respecto a las especificaciones, sino mide también la centralidad del mismo. Gutiérrez y de la Vara (2013), indican que el índice de Taguchi, calcula la capacidad en relación al cumplimiento del proceso y sus especificaciones, relacionándola con la variabilidad del mismo. Se define de la diferencia entre las especificaciones del proceso (ES y EI) y el nivel de Taguchi (τ) el cual está definido por la varianza del proceso σ^2 y las condiciones de la media del proceso μ , y el valor nominal esperado del proceso N.

$$C_{pm} = \frac{ES - EI}{6 \tau} \quad (\text{Ec. 73})$$

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2} \quad (\text{Ec. 72})$$

Aunque el proceso cumple en condiciones mínimas, es importante considerar el desgaste a largo plazo en el que seguramente el proceso se saldrá de estos segmentos y posiblemente no cumpla especificaciones. Para ello se construyó un intervalo de confianza con un 5 % de significancia.

$$\hat{C}_{pm} \pm Z_{\alpha/2} \frac{\hat{C}_{pm}}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1/2 + \frac{(\bar{X} - N)^2}{S^2}}{1 + \frac{(\bar{X} - N)^2}{S^2}}} \quad (\text{Ec. 74})$$

Para poder definir los intervalos de confianza, se utilizaron las ecuaciones definidas con anterioridad, para construir a un 95 % de confianza, los intervalos que definen, dentro de que datos se encuentra el valor en el que se encuentra el proceso, en cualquier mes evaluado. Debe considerarse que el proceso a largo plazo puede perder capacidad por el desgaste del mismo en el tiempo.

2.6.3. Confiabilidad y disponibilidad del equipo

Para obtener los datos de confiabilidad y disponibilidad del equipo se tuvo la necesidad de realizar cálculos con todos los datos, lo cual fue necesario para concluir satisfactoriamente.

2.6.3.1. Razón de capacidad potencial C_r

Este indicador se calcula mediante el cociente de la amplitud existente en la variación natural del proceso y la tolerada. Debido a que este indicador muestra la proporción que se tiene en la banda de especificaciones cubierta en la operación del equipo, se calculó mediante la ecuación siguiente.

$$C_r = \frac{6 \sigma}{ES - EI} \quad (\text{Ec. 75})$$

2.6.3.2. Tiempo promedio entre fallas MTBF

Indica la cantidad de paros no programados por fallas en el equipo y su razón de horas operadas. Se conoce como el tiempo promedio entre fallas MTBF.

Para este cálculo se definió que t corresponde a las horas totales de uso de la máquina, tanto en horas operativas como en horas de fallo. Definiendo el promedio entre fallas con la ecuación siguiente. Indica la cantidad de horas estimadas para que se presente una falla.

$$MTBF = \frac{t}{\# \text{ Fallas presentadas}} \quad (\text{Ec. 76})$$

2.6.3.3. Tasa de fallas por hora λ

Se calculo el índice λ como la tasa de frecuencia de fallas del sistema, la cual indico una tasa media de fallas en el equipo por hora de operación. Este indicador se calculó mediante la ecuación siguiente.

$$\lambda = 1/MTBF \quad (\text{Ec. 77})$$

2.6.3.4. Promedio de horas de una falla MTTR

Este cálculo se realizó para poder considerar cuantas horas en promedio el equipo se detendrá.

Indica el tiempo medio para ejecutar la reparación después de una falla. Se realizo mediante la ecuación siguiente.

$$MTTR (Prom. HR_p) = \frac{\text{Paros (hr)}}{\# \text{ Fallas}} \quad (\text{Ec. 78})$$

2.6.3.5. Disponibilidad probabilística de la maquina

La disponibilidad de la maquina se considera al efectuar una cuantificación de los registros de las anomalías presentadas en el mes. Este cálculo servirá para obtener un valor del porcentaje de disponibilidad del equipo en base a los cálculos anteriores.

2.6.3.6. Cálculo de variable confiabilidad del equipo

Para el cálculo de la variable de confiabilidad se realizó el análisis siguiente mediante la expresión definida.

$$C = e^{(-\Gamma/MTBF)} \quad (\text{Ec. 79})$$

Se definió Γ como el tiempo del ciclo total de operación al mes, y se calculó mediante.

$$\Gamma = \text{Tiempo total operacion} + \text{Tiempo recuperacion a/falla (MTTR)} \quad (\text{Ec. 80})$$

2.6.3.7. Cálculo de variable disponibilidad del equipo

Para la disponibilidad se efectuó el cálculo de la variable definida, la cual significó que en una razón porcentual de la disponibilidad del equipo. Esta se define con la relación aritmética entre la fracción del tiempo disponible y el tiempo

de recuperación del equipo (MTTR) más esta misma fracción de tiempo disponible MTBF.

$$d = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{Ec. 81})$$

2.6.3.8. Cálculo de variable mantenibilidad del equipo

El valor de esta capacidad relaciona los tiempos promedio de recuperación en las fallas MTTR, si estos son cortos o largos, para saber que el equipo es mantenible. Debido a que la mantenibilidad se define como un valor de medición de la magnitud del valor porcentual que tiene el MTTR, se define la ecuación:

$$M = 1 - e^{(-\Gamma/MTTR)} \quad (\text{Ec. 82})$$

Debido a que el tiempo de MTTR es corto, se evaluó que el equipo es altamente mantenible.

2.6.4. Estudios con métricas de Lean Six-Sigma

Gutiérrez y de la Vara (2013) definen que se deben considerar también a las métricas de Lean Six-Sigma, como herramientas e indicadores de capacidad que se presentan al estudiar las tolerancias, ya que están relacionadas estrictamente con el desgaste natural del proceso en el tiempo. Se definen como indicadores de buena confiabilidad.

2.6.4.1. Análisis a largo plazo del proceso

Como se tiene en consideración que en el tiempo los procesos, sobre todo los de mantenimiento autónomo y operación de máquinas, sufren un desgaste en el tiempo, es necesario estimar a largo plazo su comportamiento y las recomendaciones que deberían considerarse para mantener el equipo bajo control estadístico.

Para conocer los niveles que tiene el proceso en el tiempo, así como conocer los desgastes que puedan existir en el tiempo, fue necesario realizar los cálculos es necesario.

2.6.4.2. Índice de rendimiento P_p

Este índice corresponde al desempeño potencial del proceso, medido a largo plazo. Es decir que se calculó en forma similar al índice C_p , pero usando los parámetros a largo plazo.

$$P_p = \left(\frac{ES - EI}{6 \sigma_L} \right) \quad (\text{Ec. 83})$$

Indica el desempeño en el tiempo que tiene el proceso, es importante mencionar que la diferencia existente entre el C_p (valor de capacidad nominal) y el P_p se designa como factor de dispersión (σ y S) del denominador.

2.6.4.3. Índice de rendimiento P_{PK}

De forma equivalente al caso anterior, el índice P_p no considera el centrado del proceso, por lo que es necesario ejecutar una prueba de rendimiento P_{pk} . Este indicador suele ser un complemento del análisis para largo plazo, ya que evalúa el índice real del desempeño.

$$P_{pki} = \left(\frac{\mu - EI}{3 \sigma_L} \right) \quad (\text{Ec. 84})$$

$$P_{pks} = \left(\frac{ES - \mu}{3 \sigma_L} \right) \quad (\text{Ec. 85})$$

$$P_{pk} = \text{Min} \left[\left(\frac{\mu - EI}{3 \sigma_L} \right), \left(\frac{ES - \mu}{3 \sigma_L} \right) \right] \quad (\text{Ec. 86})$$

2.6.4.4. Cálculo de índice Z

Al evaluar los estudios de capacidad en un proceso, mediante este estadígrafo se puede medir el valor de la distancia existente entre especificaciones y la media del proceso, medido en unidades de desviación estándar, como es definido por Gutiérrez y de la Vara (2013). Esta es una métrica para Six-Sigma, calculada de acuerdo a las expresiones definidas.

$$Z_C = 3 C_{pk} \quad (\text{Ec. 87})$$

$$Z_L = 3 P_{pk} \quad (\text{Ec. 88})$$

$$Z = \text{Min}[Z_s, Z_i] \quad (\text{Ec. 89})$$

2.6.4.5. Desplazamiento Z_m

En el largo plazo el índice Z manifiesta que el proceso se encuentra en buen control, debe considerarse que es necesario una buena planificación para la conservación del equipo, para que la máquina mantenga su capacidad. Para ello se realizó el cálculo del desplazamiento de los indicadores Z para corto y largo plazo, para encontrar el movimiento del proceso en términos de sigma.

$$\sigma_c = \bar{R}/d_2 \quad (\text{Ec. 90})$$

$$Z_m = Z_C - Z_L \quad (\text{Ec. 91})$$

Este indicador representa el desplazamiento que tienen las variables de capacidad del equipo en el tiempo, por desgaste natural en términos de sigma. Los estudios demuestran que la media representada se puede desplazar en un promedio de hasta 1.5 sigmas a través del tiempo. Al ser menor que esta esperanza, se considera que se tiene un proceso estadísticamente controlado.

2.6.4.6. Estimación del DPMO Defectos por millón de oportunidades

Con el fin de obtener la capacidad del proceso, sobre la relación de las observaciones, se hace a través de medición de unidades defectuosas por millón

de oportunidades. Existe la técnica *YIELD*, la cual enmarca el rendimiento ideal del proceso la primera vez que se ejecuta, y observar los defectos que se dieron, calculando la capacidad esperada del mismo. Esta relaciona las especificaciones del proceso (ES y EI) y sus correspondientes medidas de variabilidad, la media μ y la desviación estándar σ . Gutiérrez y de la Vara (2013), definen que al utilizar esta estimación se consigue una probabilidad de alcanzar, una unidad libre de defectos en el proceso medida desde la primera hasta la última. Esta herramienta será ajustada para conocer como estaría el modelo respecto a sus valores esperados.

2.6.4.7. Nivel Lean Six-Sigma

El DPMO es un indicador de Defectos por Millón de Oportunidades que se esperarían en el proceso dado el nivel de Z calculado anteriormente. Este indicador mostro que en dependencia al nivel de Z_c será la cantidad de defectos que se esperan en el proceso, así como una estimación del nivel de sigma que se tiene en el proceso.

Tabla III. Nivel de capacidad sigma

Nivel Z	Capacidad Sigma	PPM Defectos
1	2.5 σ	158,655
2	3.5 σ	22,750
3	4.5 σ	1,350
4	5.5 σ	32
4.5	6 σ	3.4

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

2.7. Fábrica Inteligente y el IIoT

Según los conceptos citados por del Val (2016), ingeniero electrónico que describe como se acuñó el término. La denominada Industria 4.0 se creó en Alemania con la finalidad de hacer referencia, a la transformación digital industrial.

El término fue evolucionando hasta crear lo que hoy se conoce como Fábrica Inteligente o Internet industrial. Esta terminología hace referencia, a la implementación de sistemas de control autónomos, hasta entonces una ciencia en desarrollo desde hace más de cinco décadas.

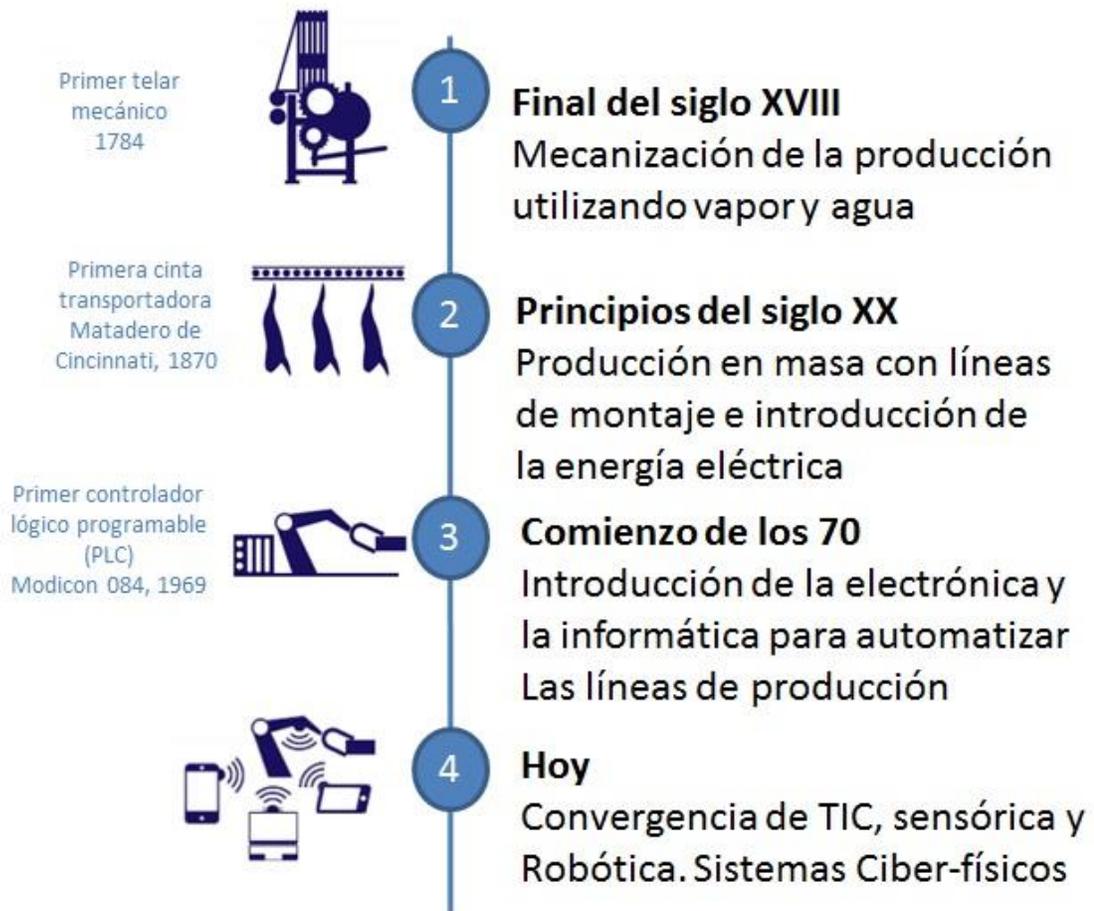
El objetivo fue llevar a la aplicación y uso la instrumentación inteligente. Estos sistemas electrónicos, pasaron a ser métodos de control, casi para cualquier variable medible, desde la compleja industria de nano tecnología, hasta los dispositivos inteligentes comunes en las casas.

Esta tecnología conocida como *Internet of Things* o IoT, la cual es hoy en día el pilar de la automatización. Según lo describe del Val (2016) en la publicación: Industria 4.0. La transformación digital de la industria. Una publicación importante de la Revista Ingeniería de la universidad de Deusto, en Alemania, el IoT (como se le denominará al *Internet of Things*), es el resultado del nuevo modelo organizativo, automatizado, inteligente y que ha generado un cambio disruptivo en la industria.

Debido a que las máquinas es uno de los elementos más importantes en la tendencia, es necesario considerar el mantenimiento como un pilar determinante en este tipo de industria. El mantenimiento predictivo como base de la filosofía

del TPM o mantenimiento productivo total, el cual es parte de los elementos que forman la manufactura de clase mundial.

Figura 4. **Industria 4.0**



Fuente: Universidad de Deusto (2016). *Revisa Ingeniería*. Edición Junio

Los métodos de confiabilidad que se utilizan en esta industria, se dan por medio del análisis de datos extraídos mediante el monitoreo de sensores inteligentes en las piezas o elementos detectados e identificados como clave en el proceso. Estos dispositivos forjan datos que generan información valiosa a

utilizar, en diversas formas dentro de ellas la modelación matemática de control estadístico, utilizando técnicas de capacidad de proceso y control. Adicional a ello los datos generados se utilizan al construir modelos predictivos que permiten la integración del *Machine-Learning*. Este es un elemento clave que se designa en proyectos de transformación digital industrial, se constituye como un aprendizaje automático inteligente de algoritmos a través de inteligencia artificial, en predicción de comportamientos de equipos por medio de análisis de datos.

Olarte y Botero (2011), afirman que para la conservación de los equipos es importante realizar monitoreos temporales de las frecuencias vibratorias, permitiendo conocer las características propias de la operación de un equipo.

Estos elementos luego son utilizados en múltiples aplicaciones industriales permitiendo obtener información oportuna para su interpretación y análisis. La técnica por excelencia, al mismo tiempo que el análisis termográfico, el estudio de ruido y la prueba superficial con tintas penetrantes, encontramos el análisis vibratorio.

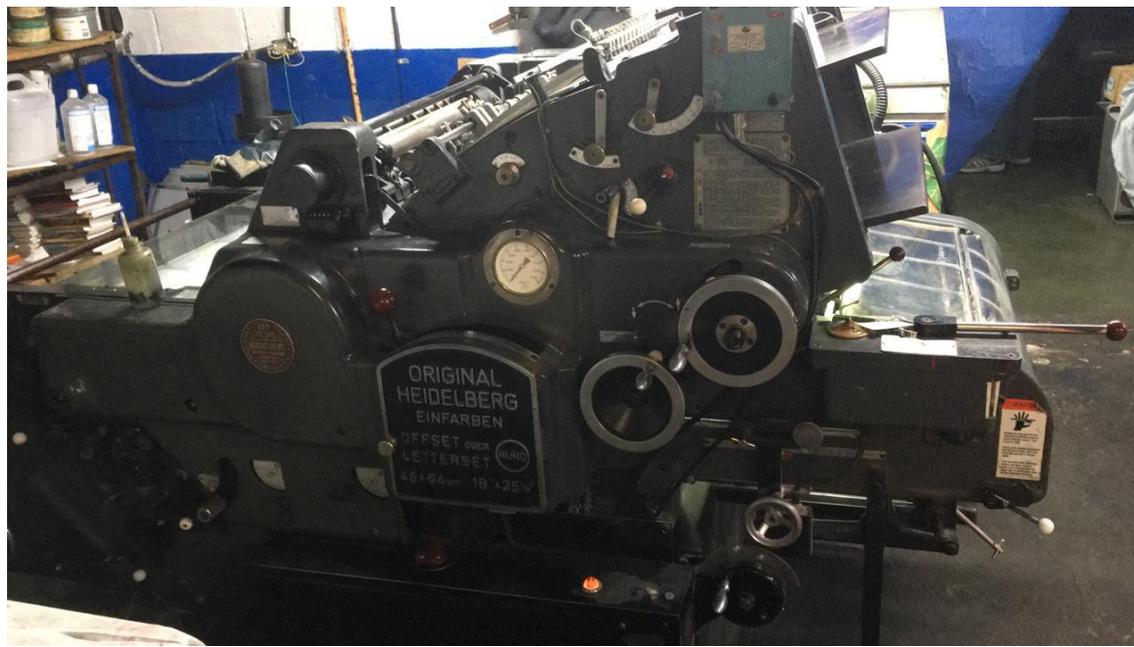
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Durante el estudio se logró analizar los datos mediante análisis estadísticos que permitieron describir el comportamiento de los desplazamientos horizontales mecánicos. Los datos fueron recopilados del equipo IIoT *Arduino* que permitió tomar lecturas de desplazamientos durante el periodo del estudio, el cual consistía en diez meses de operación. Se consideró un primer mes como un plan piloto para aplicar los análisis correspondientes.

3.1. Descripción de los datos de desplazamiento horizontal

Para el desarrollo del experimento se colocó el dispositivo en un compartimiento dentro del equipo, independiente a las vibraciones del equipo, para evitar que estas interfirieran en las lecturas. El valor nominal (N) definido fue de 2.0000 cm. para las mediciones. Se sabe por especificación que este valor puede variar hasta un 2.15 % lo que se definió como las especificaciones. Lo que se monitorea con el equipo ultrasónico son los desplazamientos (las lecturas son en centímetros) que puedan darse en el sistema de alimentación del equipo impresor industrial. Se espera que se mantenga una distancia constante, pero dado que es un equipo mecánico, dada la naturaleza del proceso, la inercia del mecanismo y la movimentación normal de la operación, siempre se tienen pequeños desplazamientos en los ejes y en el tren de mecanismos. Sin embargo, como en todos los procesos, se tienen ciertas tolerancias en estos desplazamientos antes que el equipo se descalibre y falle.

Figura 5. Área de trabajo



Fuente: [Fotografía de Carlos Rios]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2020). Colección particular. Guatemala.

Se puede apreciar el área de trabajo, donde se colocó el equipo de monitoreo, de una forma conveniente a la captación de los datos.

Figura 6. Visualización del equipo



Fuente: [Fotografía de Carlos Rios]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2020). Colección particular. Guatemala.

El tren del mecanismo está diseñado como un tren planetario compuesto por un sol (engranaje 1), un brazo porta satélite (brazo 2) y los engranajes satelitales 3 y 4.

Este es el esquema del sistema mecánico, de una manera simple, donde se monitorea el desplazamiento. La velocidad que se imprime en el engranaje del mecanismo de la rueda 1 respecto al brazo, se describe según esta ecuación.

$$n_{12} = n_1 - n_2 \quad (\text{Ec. 92})$$

Para que la velocidad del resultante del tren del mecanismo, respecto del brazo, sobre la rueda del eje 4, que es la velocidad que resultaría del sistema de engranajes, estaría definida de la forma siguiente.

$$n_{42} = n_4 - n_2 \quad (\text{Ec. 93})$$

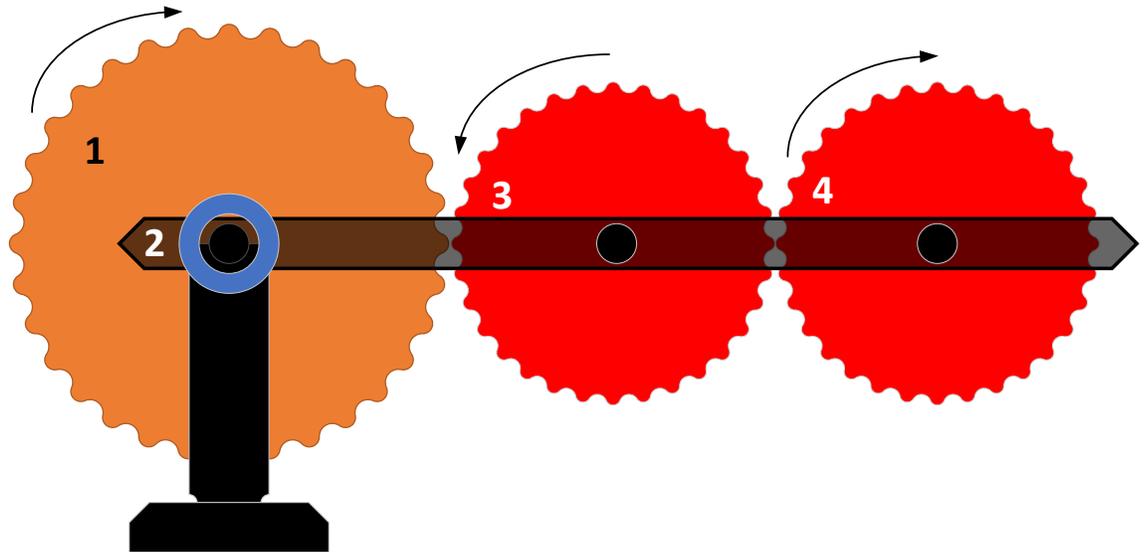
Según el análisis cinemático de mecanismos, que indica que el cociente obtenido entre estas resultantes, representa la relación de la velocidad relativa del eje 4. La ecuación describe entonces la relación de la velocidad de la rueda 4 respecto al brazo 2, el cual se encuentra fijo.

Todo el mecanismo estará siempre en función de la cantidad de dientes de cada engranaje.

$$n_{42} / n_{12} = (n_4 - n_2) / (n_1 - n_2) \quad (\text{Ec. 94})$$

Entendiendo de forma explicativa la operación del tren de mecanismo, que contiene los engranes, es posible entonces el desarrollo del instrumento captador de datos. Se tiene a continuación un croquis con la descripción del tren del mecanismo.

Figura 7. Descripción del tren de mecanismo



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Visio

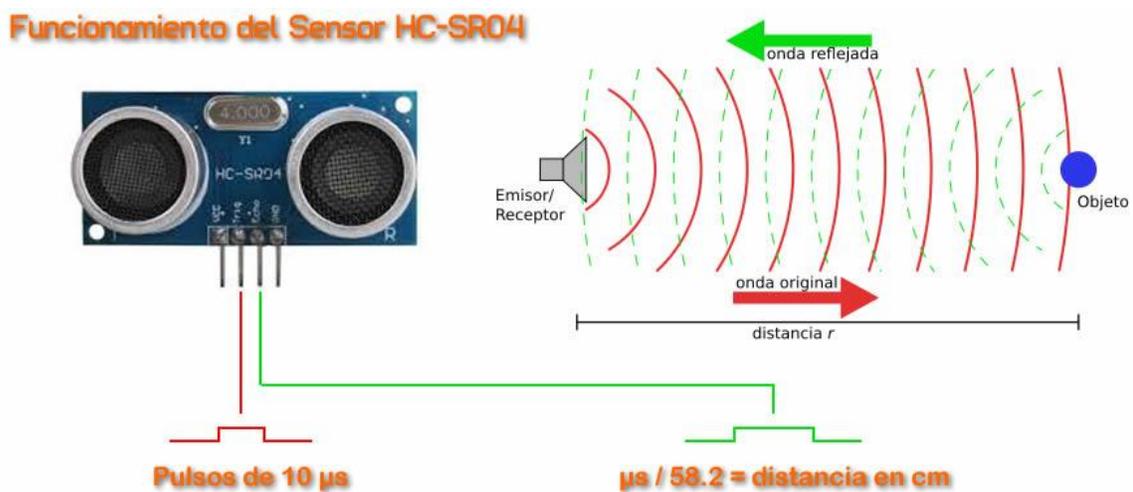
3.2. Construcción del diseño de instrumentación

Se seleccionó la instrumentación ultrasónica por su practicidad, versatilidad y porque son dispositivos sencillos de programar, implementar y su costo es bajo.

Para este proyecto se hizo uso de una placa *Arduino Uno*, con un sensor HC-SR04, el cual funciona capturando una onda ultrasónica que viaja en pulsos a determinada frecuencia, y que rebota en el punto del equipo donde se está monitoreando, esto se realiza en un intervalo de tiempo definido, para calcular la distancia que existe.

Es una forma bastante aceptable de monitorear la distancia entre una pieza y otra, con el fin de obtener lecturas de forma constante durante el tiempo que se necesite, para poder evaluar los desplazamientos existentes en el tiempo de operación del equipo. El funcionamiento del instrumento, está de acuerdo al diagrama siguiente.

Figura 8. Diagrama de funcionamiento del instrumento ultrasónico



Fuente: Proyectos Arduino (2020). Funcionamiento Sensor de distancia HC-SR04.

Se puede observar en el diagrama descriptivo, el instrumento en funcionamiento, el cual capta las lecturas mediante la emisión-recepción de una onda ultrasónica para el cálculo de la distancia. Se consideró la captación de lectura de datos, por cada hora de operación durante el tiempo de duración del experimento. Se definió un plan piloto de 72 horas para colocación y 72 horas para lecturas previas.

3.3. Obtención de datos del plan piloto

El plan piloto se desarrolló con 72 horas de colocación y ajustes para que el dispositivo pudiera estar funcionando de forma correcta. De la misma forma se consideraron otras 72 horas de recopilación de datos, conectadas con un sensor ultrasónico para tener dos fuentes de datos cruzados. Los datos fueron recopilados para la construcción de una dispersión de datos, que permitiera comparar las lecturas, tanto de la instrumentación industrial IIoT HC-SR04 como del equipo ultrasónico de laboratorio con el que se calibro el equipo, un *Texas Instruments* TI-CBR2. Este instrumento de laboratorio funciona como un aparato didáctico que está diseñado para lanzar una onda en determinada frecuencia y estimar la distancia a la que se encuentra el objeto de estudio. Ambas lecturas se constituyeron, como se aprecia en el gráfico de dispersión, para construir con las lecturas registradas durante las 72 después de la calibración y ajustes, un diagrama preliminar

Figura 9. Instrumentación TI-CBR2 y IIoT HC-SR04



Fuente: [Fotografía de Carlos Rios]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2020). Colección particular. Guatemala

El instrumento TI-CBR2 se utilizó como parámetro de comparación, el cual fue necesario para cotejar y revisar las lecturas realizadas por el instrumento IloT HC-SR04, el cual funciona bajo el siguiente principio:

- El sensor del instrumento ultrasónico HC-SR04 tiene un dispositivo de envío de pulso de alta frecuencia llamado *Trigger*. Este envía un pulso alto e inicia su secuencia de detección.
- La onda ultrasónica viaja a una frecuencia de 40 kHz. Esta onda llega al punto de control, que es el punto donde se desea realizar el monitoreo de la variable desplazamiento horizontal (X_o) que es la distancia estimada en función del tiempo, en horas, rebotando de regreso hacia el dispositivo.
- El sensor de recepción de la onda ultrasónica, denominado *Echo*, recibe el pulso alto y estima los cálculos mediante la ecuación siguiente:

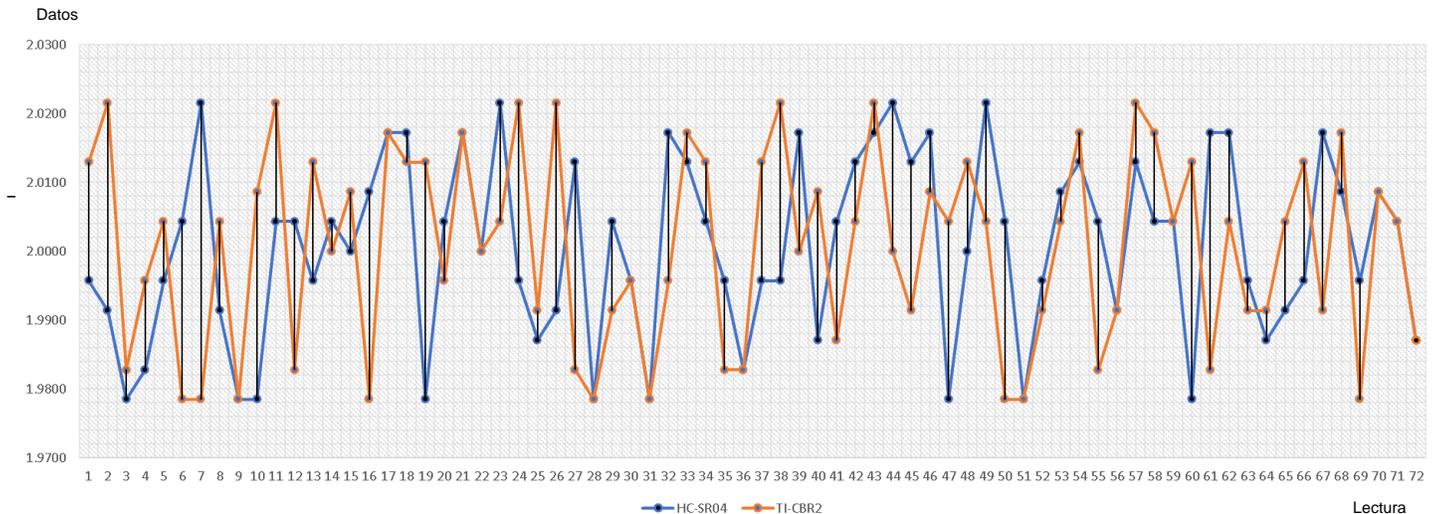
$$X_o (cm) = \mu S / 58.2 \quad (\text{Ec. 95})$$

Donde r es el ancho del pulso μS .

El equipo censa que el pulso emitido y la onda reflejada, tengan el mismo tiempo de duración. Estas transcurren desde el momento que se emite el pulso alto hasta el momento de contacto con la superficie del equipo monitoreado y su retorno al sensor de recepción mediante el rebote.

Aunque se aprecia una pequeña diferencia entre las lecturas de ambos instrumentos, fue importante considerar que para que se pueda concluir de forma acertada era necesario comprobar la calidad de la medición con la que se estaba trabajando.

Figura 10. **Gráfico de dispersión de datos comparativo**



Fuente: elaboración propia, con datos preliminares del plan piloto, realizado con Minitab 19

Con este fin se desarrolló un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), que es una técnica estadística para validar que la instrumentación utilizada en la medición, está realizando las lecturas correctas. Definitivamente este tipo de instrumentación industrial, posee un nivel de error en la estimación, cuyas replicas deben estar contenidas dentro de un intervalo de confianza aceptable. Es por esta razón que se decidió correr un estudio de (R&R) contrastando las mediciones de la instrumentación utilizada.

3.4. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) para instrumentos

Como se mencionó anteriormente, es de suma importancia descartar que los datos obtenidos en el instrumento puedan ser engañosos o erróneos, o que su estimación tenga un error demasiado alto, y que esto no permita que las

decisiones derivadas de los análisis posteriores sean incorrectas. Fue por ello se decidió utilizar el captador ultrasónico de laboratorio *Texas Instruments* TI-CBR2, el cual es un dispositivo basado en la instrumentación de laboratorio para calculadoras TI-Voyage 200 como parámetro comparativo. Se capturo un juego de datos al mismo tiempo, de ambos instrumentos y se almacenaron para su procesamiento. Como se pudo observar en el gráfico de dispersión, las líneas de diferencia son relativamente pequeñas, por lo que se realizó un estudio para encontrar si existía significancia estadística en los instrumentos y en su capacidad de realizar mediciones. Se consideraba para el estudio un valor esperado de 2.000 cm con tolerancias de operación dadas por monitoreo del uso del equipo.

Figura 11. Captador ultrasónico de laboratorio TI-CBR2

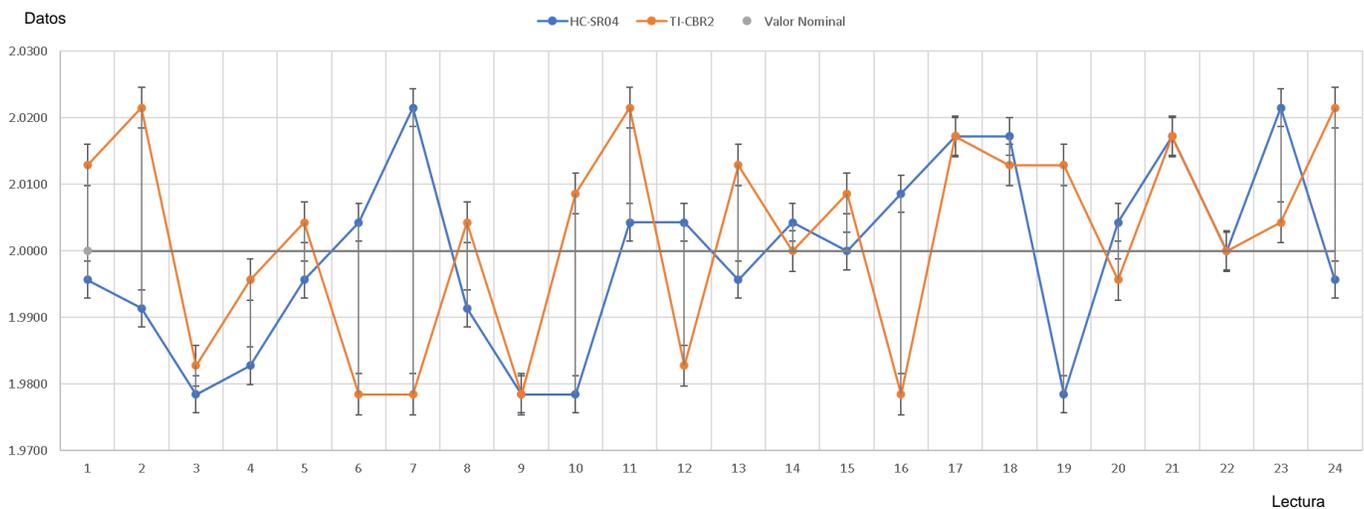


Fuente: [Fotografía de Carlos Rios]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2020). Colección particular. Guatemala

El diseño experimental que se utilizó fue un estudio de repetibilidad y reproducibilidad anidado, ya que no es posible tomar la misma medición más de una vez, porque la variable de estudio está en función del tiempo. Por ello se considera un ensayo destructivo.

En este tipo de diseño se considera que un dato registrado en determinado intervalo de tiempo, es una variable la cual no es posible repetir, por lo que no es posible tomar una lectura con más de una réplica para cada registro con el mismo instrumento.

Figura 12. **Dispersión para el análisis de R&R de los instrumentos**



Elaboración propia, con los datos preliminares del estudio, realizado con Minitab 19

Para estos datos se concluyó, que no existe una diferencia significativa en la variabilidad por los instrumentos. La fuente de variación proviene, según el análisis de contribución, del Parte a parte es decir que no proviene de los instrumentos cumpliéndose que, en el estudio, no hay una fuente de variación por el uso de determinado equipo.

Tabla IV. **Análisis de Varianza del sistema de medición**

R&R del sistema de medición (anidado) para Medicion

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Instrumento	1	0.0002610	0.0002610	4.17372E-01	0.521
Hora (Instrumento)	46	0.0287630	0.0006253	1.51106E+14	0.000
Repetibilidad	96	0.0000000	0.0000000		
Total	143	0.0290240			

Componentes de la varianza

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución (de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0000000	(0.000; 0.004)	0.00	(0.00; 94.59)
Repetibilidad	0.0000000	(0.000; 0.000)	0.00	(0.00; 0.00)
Reproducibilidad	0.0000000	(0.000; 0.004)	0.00	(0.00; 94.59)
Parte a parte	0.0002084	(0.000; 0.000)	100.00	(5.41; 100.00)
Variación total	0.0002084	(0.000; 0.004)	100.00	

Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

Esto se consolidó al analizar los gráficos que el estudio presentó y la evaluación del sistema mediante Gage R&R.

El estudio indicó que los parámetros de operación dados por el uso del equipo tienen una tolerancia de ± 0.0430 cm (2.15 % de N), y se calibró para que el valor esperado sea de 2.000 cm.

Al revisar el estudio Gage R&R, se concluyó que la fuente de variación proviene de los datos capturados y no proviene de los instrumentos. Lo que se considera que, para medir la precisión o reproducibilidad de las lecturas presente en los instrumentos, estos lo hacen de forma correcta.

Tabla V. **Evaluación del sistema Gage R&R**

Evaluación del sistema de medición

Fuente	Desv.Est.		Var. estudio		%Var. estudio	
	(DE)	IC de 95%	(6 × DE)	IC de 95%	(%VE)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0000000	(0.000; 0.061)	0.0000000	(0.000; 0.364)	0.00	(0.00; 97.26)
Repetibilidad	0.0000000	(0.000; 0.000)	0.0000000	(0.000; 0.000)	0.00	(0.00; 0.00)
Reproducibilidad	0.0000000	(0.000; 0.061)	0.0000000	(0.000; 0.364)	0.00	(0.00; 97.26)
Parte a parte	0.0144370	(0.012; 0.018)	0.0866221	(0.072; 0.109)	100.00	(23.27; 100.00)
Variación total	0.0144370	(0.012; 0.062)	0.0866221	(0.073; 0.375)	100.00	

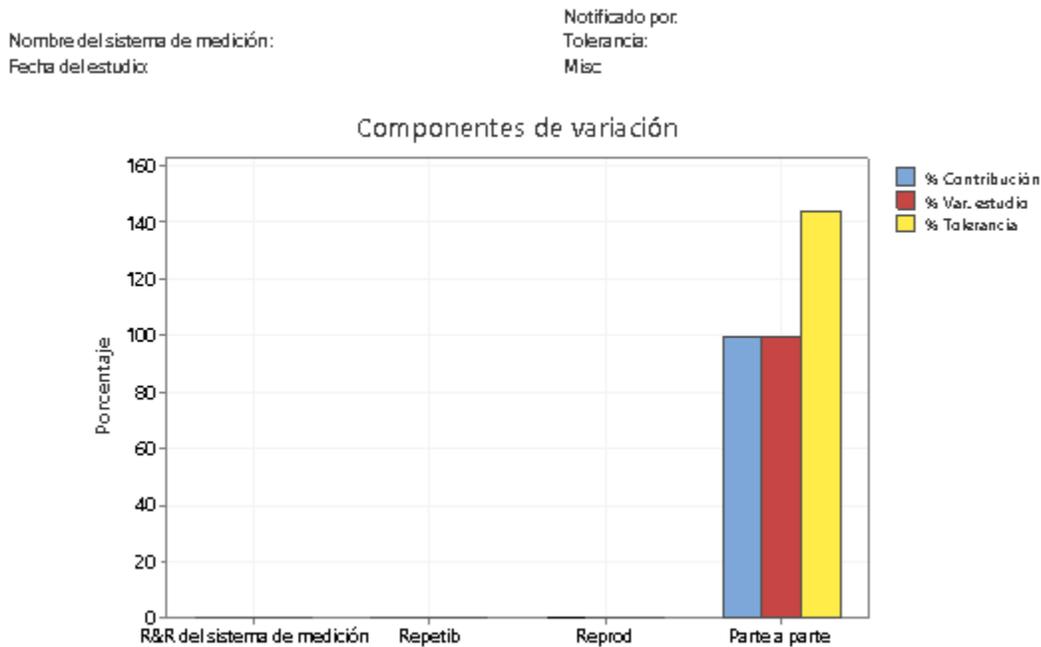
Fuente	%Tolerancia	
	(VE/Toler)	IC de 95%
Gage R&R total	0.00	(0.00; 607.18)
Repetibilidad	0.00	(0.00; 0.00)
Reproducibilidad	0.00	(0.00; 607.18)
Parte a parte	144.37	(119.97; 181.33)
Variación total	144.37	(121.05; 624.30)

Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

Se concluye que la eficacia estimada del instrumento es correcta para ser utilizado como herramienta de medición cumpliendo su función de repetividad en las lecturas realizadas.

Figura 13. Gráfico de R&R del sistema de instrumentación

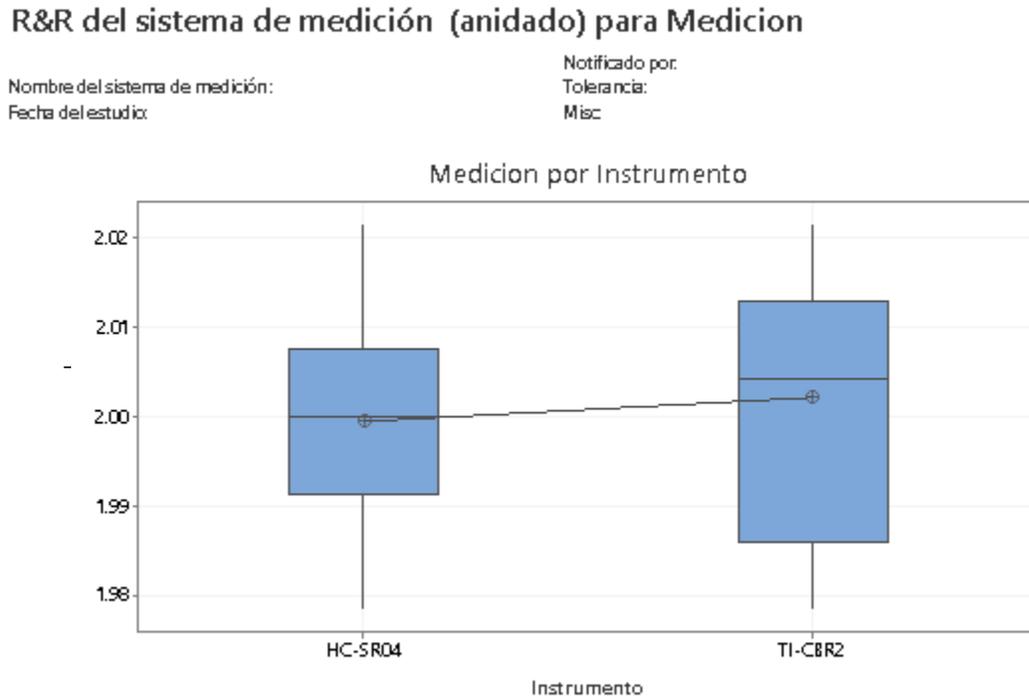
R&R del sistema de medición (anidado) para Medicion



Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

Se pudo observar en los gráficos, que la fuente de variación no proviene de las diferencias de reproducibilidad o repetibilidad de los instrumentos, sino que proviene de los datos mismos, dadas las variaciones de los desplazamientos normales de la operación del equipo. Es por ello la importancia de contar con instrumentos que permitan conocer el comportamiento de los datos, de forma correcta y que estos sean aceptables para su análisis. El grafico Box-Plot o diagrama de cajas y bigotes, permitió también, apreciar que no hay una diferencia estadísticamente significativa dentro de los dos instrumentos, coincidiendo en que los equipos de medición son efectivos para trasladar los datos para su análisis correspondiente.

Figura 14. **Box-Plot del R&R del sistema de medición anidado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

3.5. Recopilación y tratamiento de datos

Los datos fueron extraídos del equipo *Arduino*, con las lecturas captadas por el sensor ultrasónico HC-SR04 para el plan piloto que consistió en un mes. Con un intervalo de datos del 01 de agosto de 2020 al 31 de mayo de 2021.

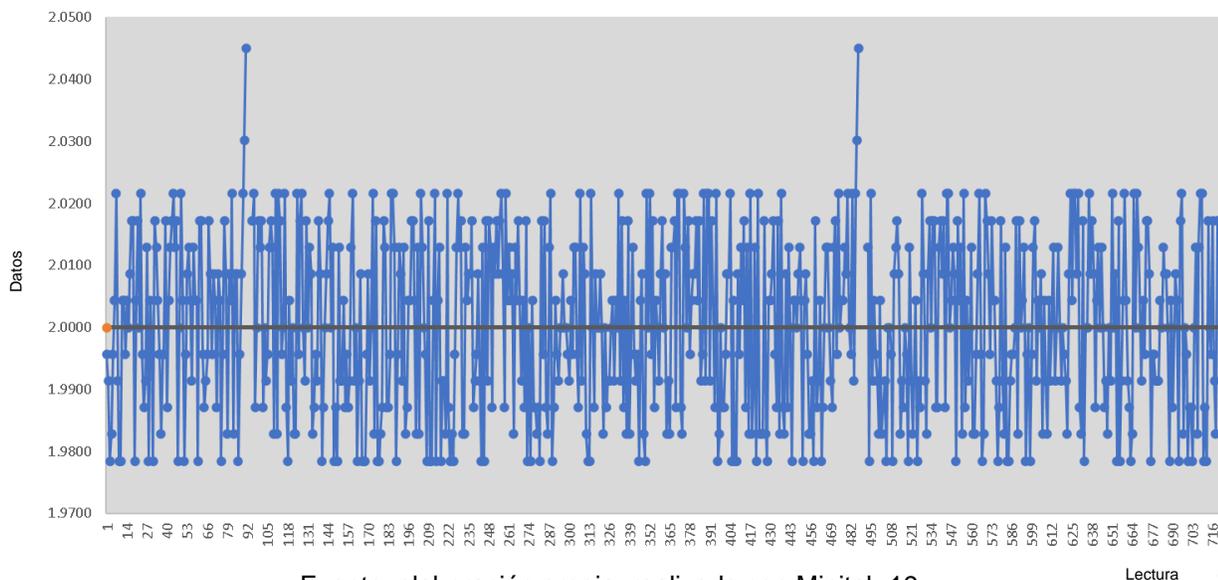
Los datos extraídos durante el plan piloto, cuya duración fue un mes, se utilizó para definir los análisis, para generar los reportes y controles estadísticos. Luego se replicó en los nueve meses siguientes. Con las horas efectivas,

regularmente 24 diarias, sin contar los días de asueto o que no se ocupó la máquina, ni las horas en que el equipo se detuvo para los reajustes por fallos.

3.5.1. Análisis exploratorio de datos

Al obtener los datos se pudo observar como punto central la mediana, la cual es el dato esperado, lo que confirma que se obtuvo los datos con una fluctuación aceptable, dentro de los parámetros de operación normales, lo que permitió obtener un análisis preliminar correcto. Dato curioso que se puede observar son los puntos antes que ocurra la falla, ya que se ven los picos de lecturas que se comienza a desfasar. Al observar este tipo de datos, ocurre la falla y es en este momento donde la maquina comienza a presentar desperfectos en su operación debido a desajustes.

Figura 15. Diagrama de líneas exploratorio de datos



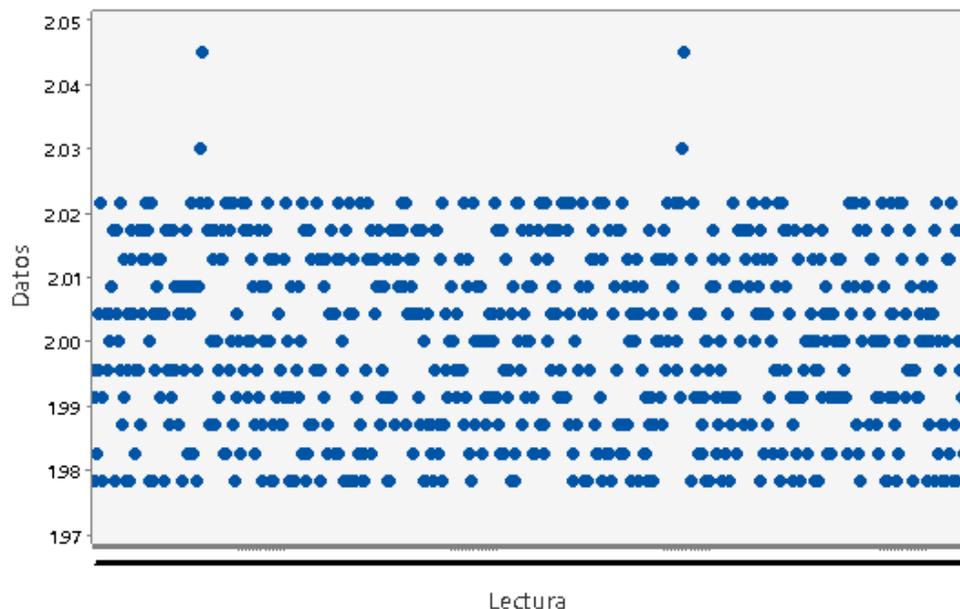
Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

Cuando ocurre este evento el operario se percata de los problemas de ajustes y problemas de calidad que pudieran presentarse y es en este punto donde se detiene la maquina y se procede al ajuste nuevamente. Este paro no programado puede durar entre dos a cuatro horas aproximadamente, antes de la reanudación de la operación de la máquina.

3.5.1.1. Prueba de atipicidad de datos de Grubbs

Para poder corroborar que los datos que se presentaban tenían algún tipo de lecturas atípicas, se procedió a realizar una prueba de atipicidad de datos, descartando así, alguna posibilidad de obtener alguna lectura que interfiriera en los análisis posteriores.

Figura 16. Gráfico de atipicidad de Grubbs



Fuente: elaboración propia, realizado con Minitab 19

Según los resultados estudiados se consideró que, los datos analizados para el plan piloto no tienen presencia de datos atípicos, con un nivel de significancia del 5 %.

3.6. Análisis con estadística descriptiva

Este es el estudio más importante que se le dio a lo datos, su objetivo fue determinar y analizar las lecturas de los registros, evaluando su comportamiento de la forma siguiente.

3.6.1. Análisis estadístico de datos agrupados

Para el cálculo del rango y el intervalo de clase, se decidió por recalcularse los datos aceptados para el mínimo y máximo del intervalo, debido a los datos fuera de especificación, o sea las lecturas de fallo del equipo. La tolerancia que se tiene del equipo como dato de especificación es del 2.15 % sobre el valor nominal (N), dato que sirvió para definir las especificaciones. Esto con el fin de obtener los datos del proceso cuando opera en condiciones normales. Del colector de datos, se obtuvieron los estimadores siguientes:

Valor Maximo (Max) = 2.0450

Max (Ajustado) = 2.0430

Valor Minimo (Min) = 1.9785

Min (Ajustado) = 1.9570

Mediana de los datos sin agrupar (Me) = 2.0000

Numero de datos (n) del plan piloto = 712

Numero de Clase (k) = 10.4132 ~ 11

Rango (R) = 0.0860

Intervalo de clase (i) = 0.0041

Los datos ajustados representan casi la totalidad de las observaciones, ya que los datos fuera de especificación fueron únicamente un 0.0280 % que es una fracción despreciable.

Tabla VI. **Intervalos con limites reales para datos agrupados**

Limites Aparentes		Limites Reales	
Li	Ls	Li	Ls
1.9570	1.9652	1.95695	1.96525
1.9653	1.9735	1.96525	1.97355
1.9736	1.9818	1.97355	1.98185
1.9819	1.9901	1.98185	1.99015
1.9902	1.9984	1.99015	1.99845
1.9985	2.0067	1.99845	2.00675
2.0068	2.0150	2.00675	2.01505
2.0151	2.0233	2.01505	2.02335
2.0234	2.0316	2.02335	2.03165
2.0317	2.0399	2.03165	2.03995
2.0400	2.0430	2.03995	2.04305

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

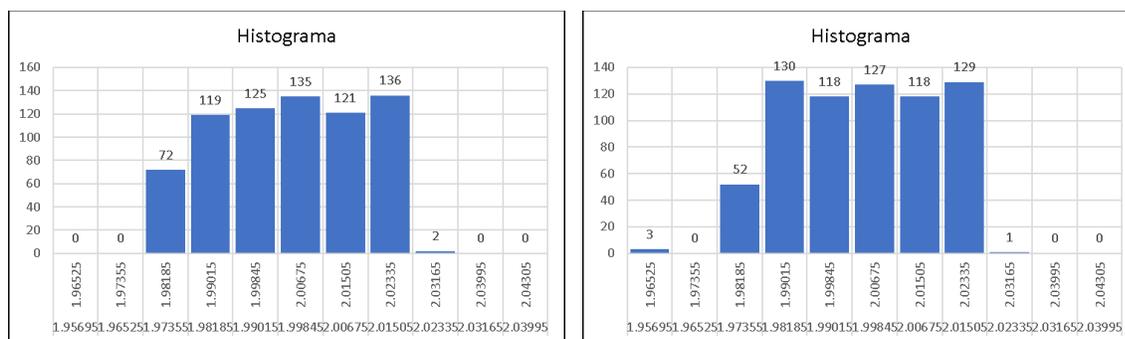
Luego de la definición de los límites, se procedió al cálculo de las frecuencias para los intervalos de datos de forma que estos quedaran agrupados. Debido a que se tuvo paros y horas no programadas de operación, fue necesario definir que, en la tabla de frecuencias acumuladas para las lecturas de los datos se observa faltantes, en este mes fue de 2 observaciones (n = 712), para el plan piloto y luego se replicó para los nueve meses siguientes bajo el mismo criterio.

Esto debido a que los datos que no se contienen en los intervalos (que son los datos de las lecturas presentadas por el equipo antes del fallo), fueron retiradas del análisis de datos, ya que dichas observaciones están fuera de especificación. Se decidió este tratamiento debido a que estas observaciones habrían influido en el tamaño del intervalo de clase, y esto hubiera derivado en intervalos más amplios, aceptando datos que pudieran estar fuera de especificación.

3.6.1.1. Histograma y polígono de frecuencias

Se construyó un histograma para conocer cómo está la representación y comportamiento gráfico de los datos. En el eje de las abscisas se colocó las barras que contienen el intervalo de los límites reales del proceso, mientras que en las ordenadas se colocó el valor en cada barra proporcional a su frecuencia absoluta.

Figura 17. Histograma de los datos agrupados

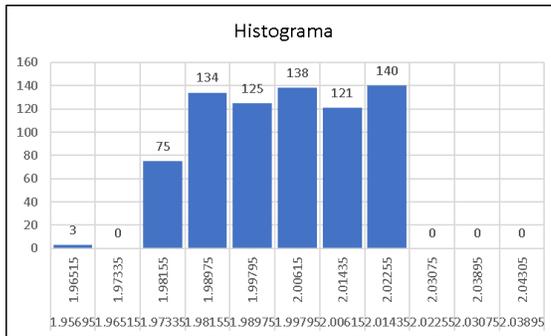


Agosto 2020

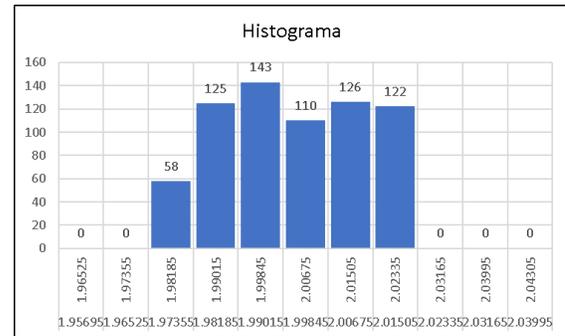
Septiembre 2020

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

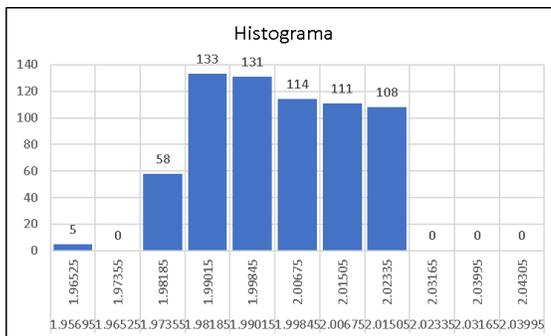
(Continuación) Figura 17 Histogramas mensuales



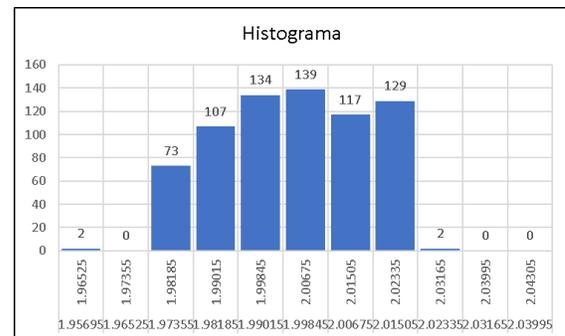
Octubre 2020



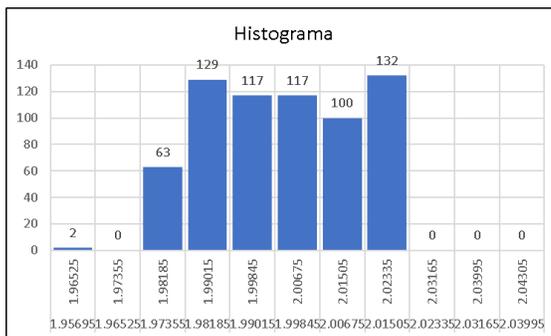
Noviembre 2020



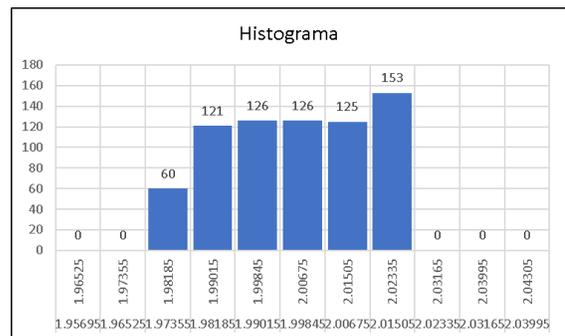
Diciembre 2020



Enero 2021



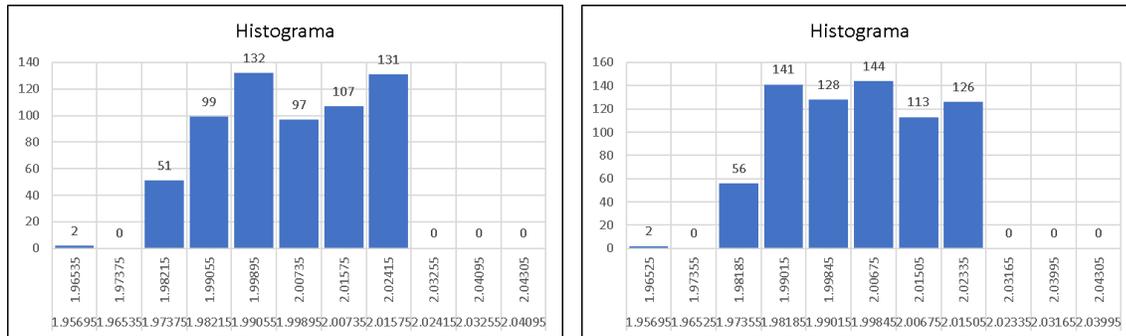
Febrero 2021



Marzo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 17 Histogramas mensuales



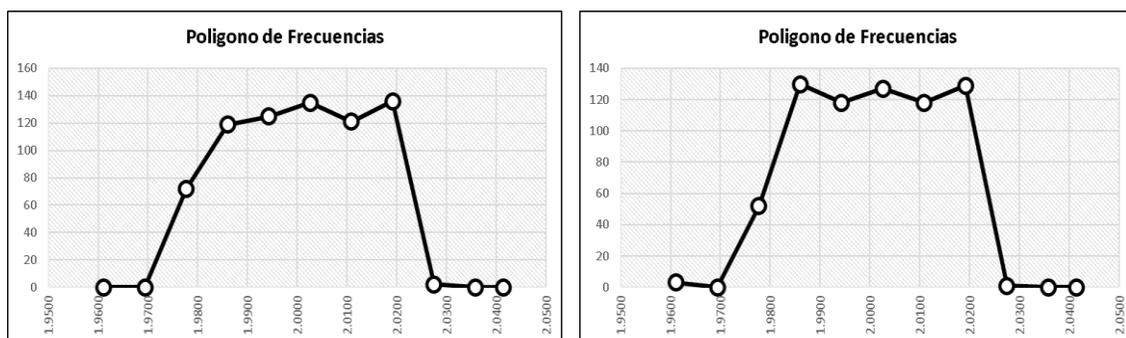
Abril 2021

Mayo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

Para este estudio se observó un agrupamiento en el centro, que indica que los datos primeramente puedan ser representados por una curva gaussiana de frecuencias. Se realizó un análisis grafico mediante un polígono de frecuencias.

Figura 18. Polígono de frecuencias para los datos agrupados

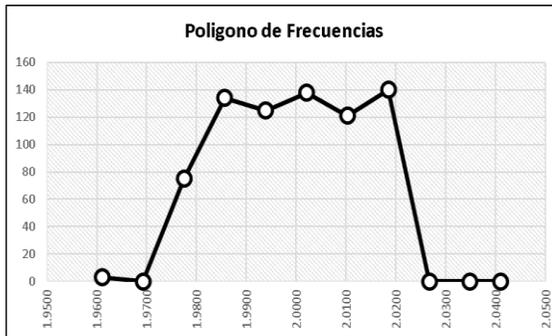


Agosto 2020

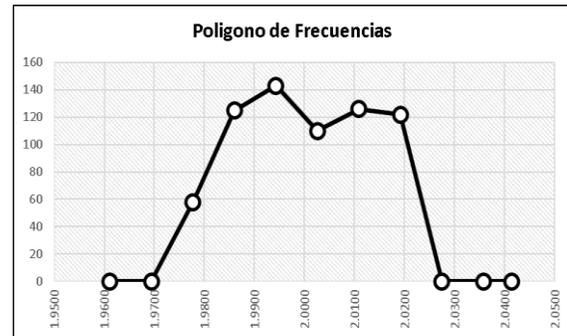
Septiembre 2020

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

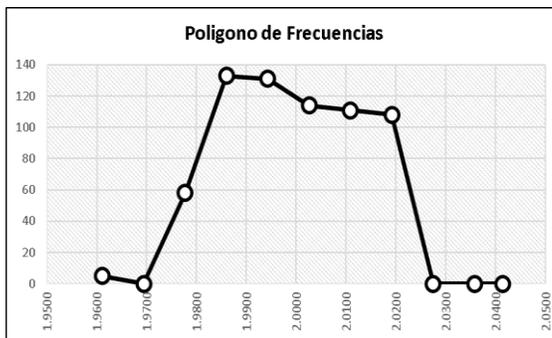
(Continuación) Figura 18 Polígonos de frecuencias mensuales



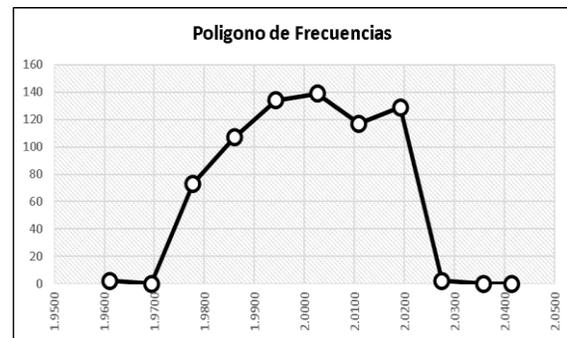
Octubre 2020



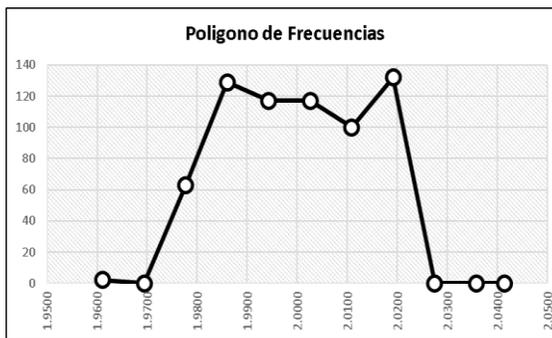
Noviembre 2020



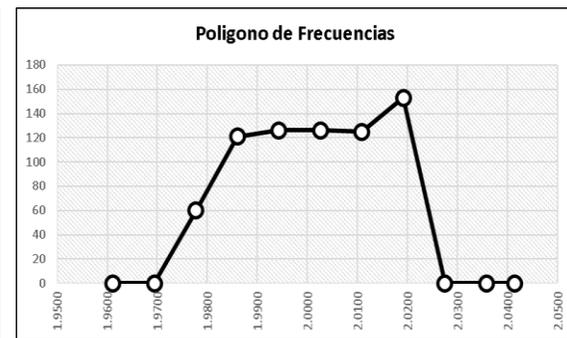
Diciembre 2020



Enero 2021



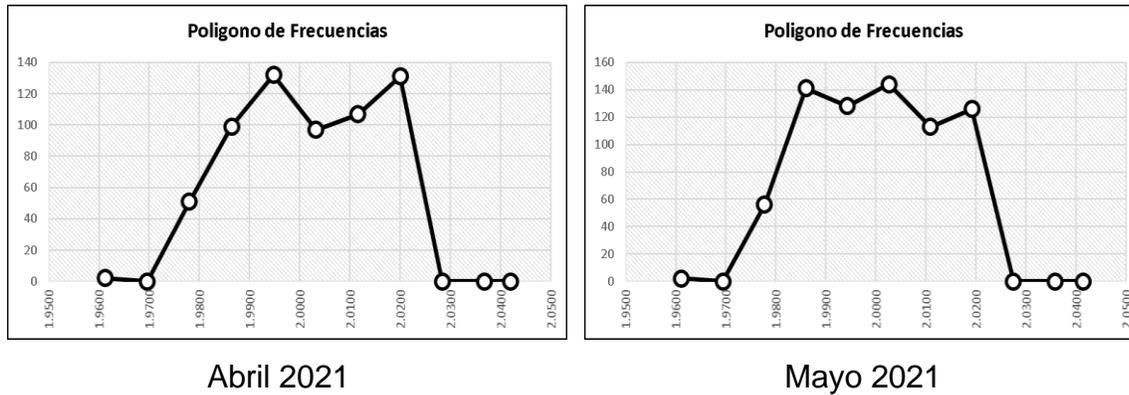
Febrero 2021



Marzo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

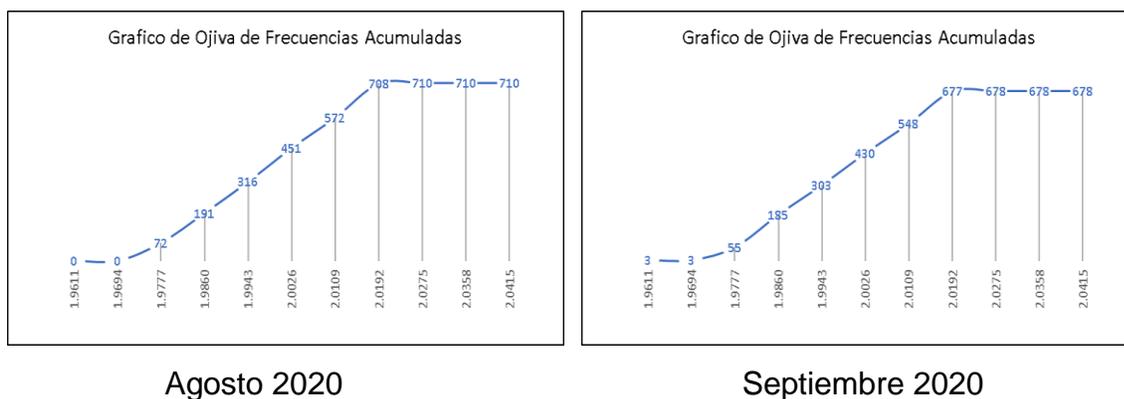
(Continuación) Figura 18 Polígonos de frecuencias mensuales



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

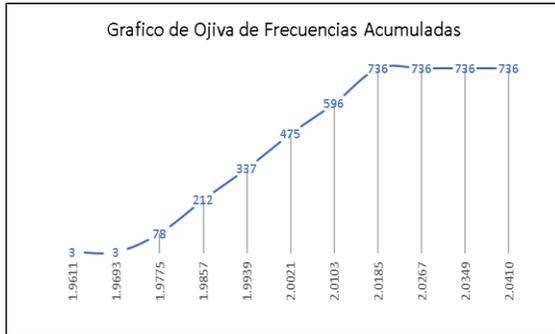
Se analizó las frecuencias acumuladas, mediante un gráfico de ojiva, estos tienden a ser una línea con pendiente positiva, por lo que se asume que tienen un comportamiento continuo de forma uniforme concentrado al centro.

Figura 19. Gráfico de ojiva de frecuencias acumuladas

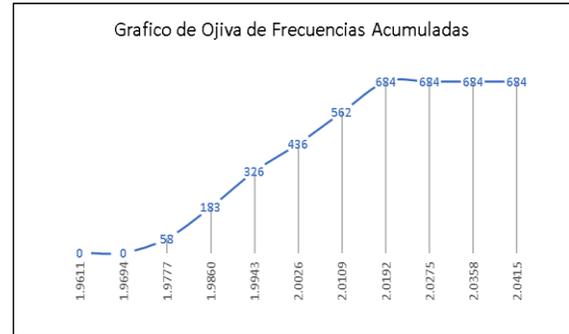


Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

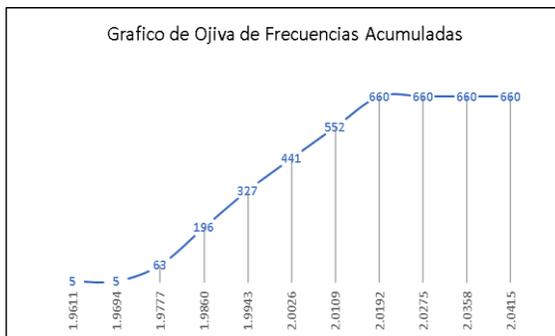
(Continuación) Figura 19 Gráficos de ojiva de frecuencias acumuladas



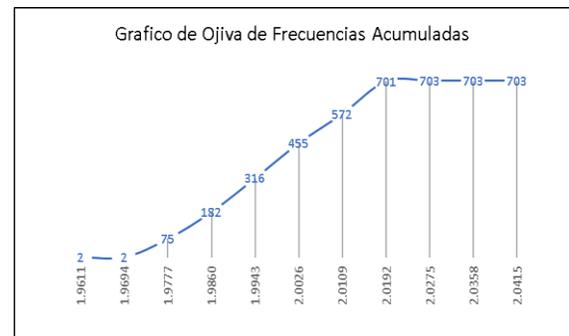
Octubre 2020



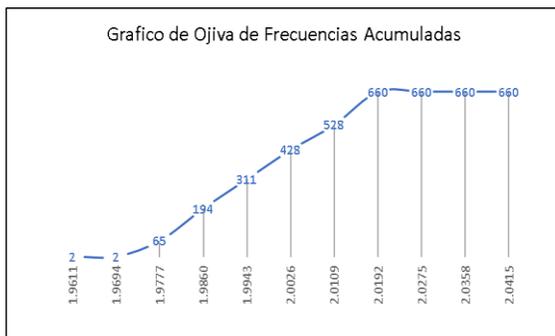
Noviembre 2020



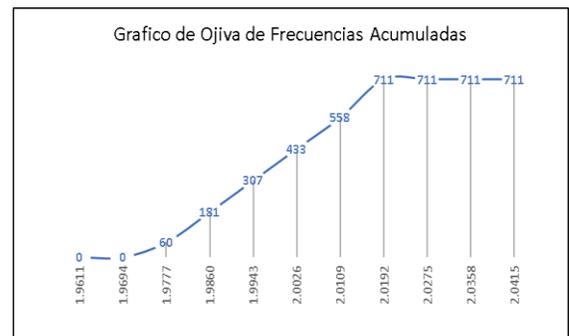
Diciembre 2020



Enero 2021



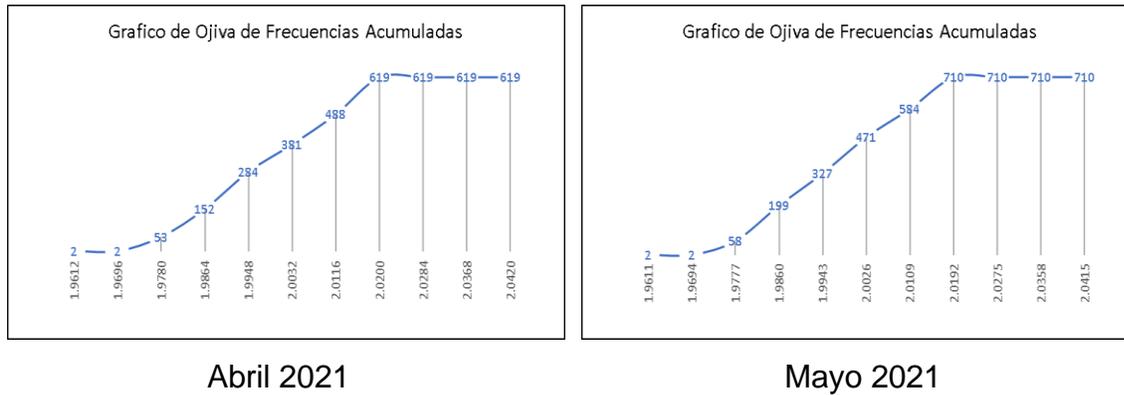
Febrero 2021



Marzo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 19 Gráficos de ojiva de frecuencias acumuladas



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

3.6.2. Cálculo y análisis de estadígrafos descriptivos

Se realizaron nuevos cálculos para poder construir las ecuaciones que se definieron en cada uno de los estadígrafos que fueron calculándose de forma conveniente para el estudio.

Tabla VII. Medidas de tendencia central y agrupación del proceso

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Media Aritmética	2.0005	2.0005	1.9995	2.0002	1.9992	2.0003	2.0000	2.0012	2.0015	2.0000
Mediana	2.0008	2.0008	1.9998	1.9997	1.9987	2.0006	1.9998	2.0016	2.0006	2.0001
Moda	2.0159	1.9890	2.0153	1.9931	1.9899	2.0000	2.0167	2.0163	1.9946	2.0013
Promedio Geométrico	2.0005	2.0005	1.9995	2.0002	1.9992	2.0003	2.0000	2.0013	2.0015	2.0000
Promedio Armónico	2.0004	2.0005	1.9995	2.0002	1.9992	2.0002	1.9999	2.0012	2.0015	1.9999
Cuartil 1	1.9892	1.9892	1.9880	1.9894	1.9882	1.9897	1.9883	1.9899	1.9907	1.9889
Cuartil 3	2.0123	2.0123	2.0114	2.0118	2.0108	2.0119	2.0123	2.0134	2.0139	2.0113
Decil 1	1.9817	1.9827	1.9811	1.9825	1.9820	1.9813	1.9819	1.9826	1.9829	1.9826
Decil 9	2.0191	2.0191	2.0182	2.0187	2.0183	2.0190	2.0192	2.0195	2.0202	2.0187

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Al revisar estos estimadores, fue posible concluir que debido a que se observa poca diferencia entre los estadísticos de tendencia central, aunque la moda es el estadígrafo mayor, es posible concluir.

$$\bar{X} < M_e < M_o$$

También se comprobó que se cumplieran los criterios en los cálculos de los promedios. Esto comprueba que en los datos no existe una influencia por los valores extremos para los estadígrafos calculados.

$$M_h < M_g \leq \bar{X}$$

Se pudo observar que las frecuencias de los datos se encuentran agrupados de forma muy uniforme.

Tabla VIII. Medidas de dispersión o variabilidad del proceso

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Amplitud entre el 80	0.0374	0.0364	0.0371	0.0362	0.0363	0.0377	0.0373	0.0369	0.0373	0.0361
Rango Intercuartílico	0.0231	0.0231	0.0234	0.0224	0.0226	0.0222	0.0240	0.0235	0.0232	0.0224
Varianza	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Desviación estándar	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141
Coefficiente de Variación	0.7048	0.7048	0.7052	0.7049	0.7053	0.7049	0.7050	0.7046	0.7045	0.7050

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Para la dispersión o variabilidad del proceso se evidencio diferencias muy pequeñas, como se observa en el gráfico de histograma y la curva de la distribución de Gauss.

Casi todas las distribuciones del centro tienen la misma frecuencia de observaciones, según se pueden ver las columnas de frecuencia.

$$\bar{X} < M_e \leq M_o$$

Aunque al analizar los resultados obtenidos en el análisis de estadística descriptiva, en las medidas de tendencia central se sugiere que no hay una forma pronunciada, es por ello que se realizó este estudio. Es importante acotar que la comparativa realizada de la media aritmética y la media geométrica concluyen que no se tiene una influencia que sea afectada por valores extremos.

$$\bar{X} = M_g$$

$$X_0 + \frac{\sum d'_i f_i}{\sum f_i} * i = \text{antilog} \left(\frac{\sum (\log X_i) * f_i}{\sum f_i} \right)$$

Tabla IX. **Medidas de asimetría o sesgo**

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Amplitud entre el 80	0.0374	0.0364	0.0371	0.0362	0.0363	0.0377	0.0373	0.0369	0.0373	0.0361
Rango Intercuartílico	0.0231	0.0231	0.0234	0.0224	0.0226	0.0222	0.0240	0.0235	0.0232	0.0224
Varianza	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Desviación estándar	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141
Coeficiente Variación	0.7048	0.7048	0.7052	0.7049	0.7053	0.7049	0.7050	0.7046	0.7045	0.7050
Coeficiente Asimetría	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Coeficiente de Fisher	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Coeficiente Bowley-Yule	-0.0043	-0.0043	-0.0085	0.0804	0.0708	0.0180	0.0417	0.0043	0.1466	0.0000
Coeficiente Curtosis	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

El coeficiente de asimetría por ser tan bajo, indica que los datos no tienen un sesgo, sino que trazan los datos al centro. Aunque los datos del centro se acumulan de forma en que se pueda trazar una línea uniforme.

Tabla X. **Medidas de agudez o curtosis**

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Coefficiente de Curtosis	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-3.0000

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Se pudo concluir que el grado de apuntamiento es -3, lo que significa que esta gráfica tiende a estar como una línea horizontal, como se pudo observar en el gráfico de polígono de frecuencias al compararlo con la línea de tendencia.

$$\alpha_2 < 0$$

Se identificó la distribución como completamente platicúrtica, lo que significa que sus niveles de apuntamiento son prácticamente nulos. Al definirse de esta forma se asumió que los datos tienen cierta uniformidad en cuanto a su recurrencia en el fenómeno estudiado, que es los desplazamientos horizontales.

3.7. Evaluación de aleatoriedad de datos

Con el supuesto que la media aritmética no está influida por valores extremos, como se comprobó al realizar la comparación con el promedio geométrico, se utilizaron los datos de la media aritmética de cada día evaluado, con el fin de obtener un dato representativo del día en que se está estudiando el

proceso, y se contrastó con la mediana. Se realizó para el mes seleccionado como plan piloto. De acuerdo a la siguiente tabla, se construye el valor del signo contra la mediana del proceso, la cual es conocida. El día 15 no hubo operación.

Tabla XI. **Prueba de rachas para la aleatoriedad de las lecturas**

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	1.9995	2.0009	2.0018	2.0071	2.0023	2.0011	1.9950	1.9995	2.0005	1.9977
Signo	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-
Día	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Promedio	2.0047	1.9982	1.9982	1.9991	0.0000	1.9996	2.0048	1.9989	1.9996	1.9978
Signo	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Promedio	2.0016	2.0026	1.9957	2.0054	2.0009	1.9961	1.9995	2.0032	2.0002	2.0009
Signo	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+
Día	31									
Promedio	1.9977									
Signo	-									

$$M_e = 2.0000$$

$$\text{Arriba } (n_1) = 15$$

$$\text{Abajo } (n_2) = 16$$

$$\alpha = 0.05$$

$$n = 31$$

$$r = 15$$

$$\mu_r = 16.48387$$

$$\sigma_r = 2.73414$$

$$Z = -0.54272$$

Si hay aleatoriedad

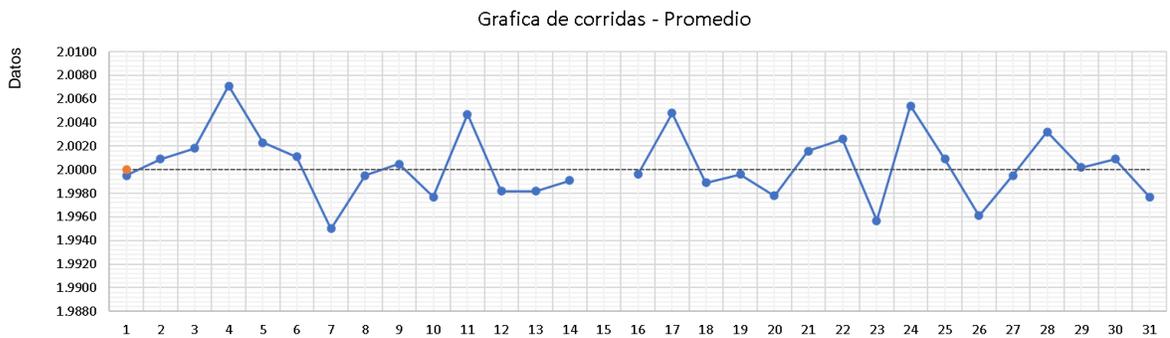
Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Luego del análisis de contraste, se concluyó que se ha cumplido la hipótesis que enuncia que los datos provienen de una fuente aleatoria de datos.

3.7.1. Grafica de corridas y recorrido

Para comprender el comportamiento que los datos presentan en la prueba de rachas, fue importante conocer los gráficos de corridas-promedio, que indican el comportamiento de los datos sobre la mediana. Es aquí donde se observó de una mejor manera el contraste de la hipótesis probada anteriormente.

Figura 20. Gráfico de corridas para los datos observados



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

Lectura

En el gráfico de recorridos se pudo observar de forma parecida, pero en esta oportunidad se pudo visualizar los datos de los rangos o recorridos, donde se determinó de igual forma que el anterior, que los datos provienen de una fuente aleatoria. El trazo de la mediana como medida de tendencia central utilizada para realizar las pruebas y construir los gráficos.

3.8. Pruebas de normalidad

Al utilizar el teorema de Chebyshev, validando el uso de la regla empírica, para los valores de k que representarían la cantidad de datos que deben estar

contenidos, según la tabla a continuación. Se comprueba que al menos el 75 % de los datos se deben contener en 2σ con respecto a la media, dentro de la distribución de datos. La regla empírica dicta que debía cumplirse lo siguiente. La regla empírica dicta que debía cumplirse lo siguiente.

Tabla XII. **Porcentaje de observaciones contenidas dentro del intervalo**

Valores k	1.5	2	2.5	3
Datos	55.6%	75.0%	84.0%	88.9%

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Los datos distribuidos dentro de las 2 desviaciones a cada lado de la media, deben ser al menos un 68 % de los datos observados. Utilizando los criterios del teorema del límite central, el intervalo se evaluó para los valores, anterior y posterior al valor puntual, con el fin de evaluar el valor central de Z. Se obtuvo un valor de 0.4979 en el inferior, y un valor de 0.7468 en el superior.

Parámetros de la población inferida

$$\hat{\mu} = 2.0000$$

$$\hat{V}(\bar{y}) = 0.00002$$

$$\sigma = \sqrt{0.00002} = 0.0044$$

Valor de la media del proceso

$$\bar{x} = 2.0005$$

$$n = 30$$

$$2.0004 \leq (\bar{x} = 2.0005) \leq 2.0006$$

$$P(0.7468 \leq (Z_{\bar{x}}) \leq 0.4979)$$

$$(0.77032, 0.68793)$$

Por lo que concluyó según la tabla de valores de distribución acumulada normal, si se encuentra dentro de la curva. Se concluyó que si se cumple la

condición para inferir que los datos tienen la característica necesaria para evaluar su capacidad y estabilidad. Al hacer una prueba de bondad de ajuste, se hizo uso de la probabilidad, probando que los datos están aproximados a una distribución normal. Se obtuvo el valor tabulado D_t de 0.0510 mediante la ecuación 38.

Tabla XIII. Cálculos para estimadores de prueba de Kolmogórov-Smirnov

Límites Reales		fi	f _{r ob}	F _{r ob}	Z	F _{r es}	Diferencia
Li	Ls						Absoluta
1.95695	1.96525	0	0.0000	0.0000	-2.5000	0.0062	0.0062
1.96525	1.97355	0	0.0000	0.0000	-1.9113	0.0280	0.0280
1.97355	1.98185	72	0.1014	0.1014	-1.3227	0.0930	0.0084
1.98185	1.99015	119	0.1676	0.2690	-0.7340	0.2315	0.0376
1.99015	1.99845	125	0.1761	0.4451	-0.1454	0.4422	0.0029
1.99845	2.00675	135	0.1901	0.6352	0.4433	0.6712	0.0360
2.00675	2.01505	121	0.1704	0.8056	1.0319	0.8489	0.0433
2.01505	2.02335	136	0.1915	0.9972	1.6206	0.9474	0.0497
2.02335	2.03165	2	0.0028	1.0000	2.2092	0.9864	0.0136
2.03165	2.03995	0	0.0000	1.0000	2.7979	0.9974	0.0026
2.03995	2.04305	0	0.0000	1.0000	3.0177	1.0000	0.0000
Σ		710					

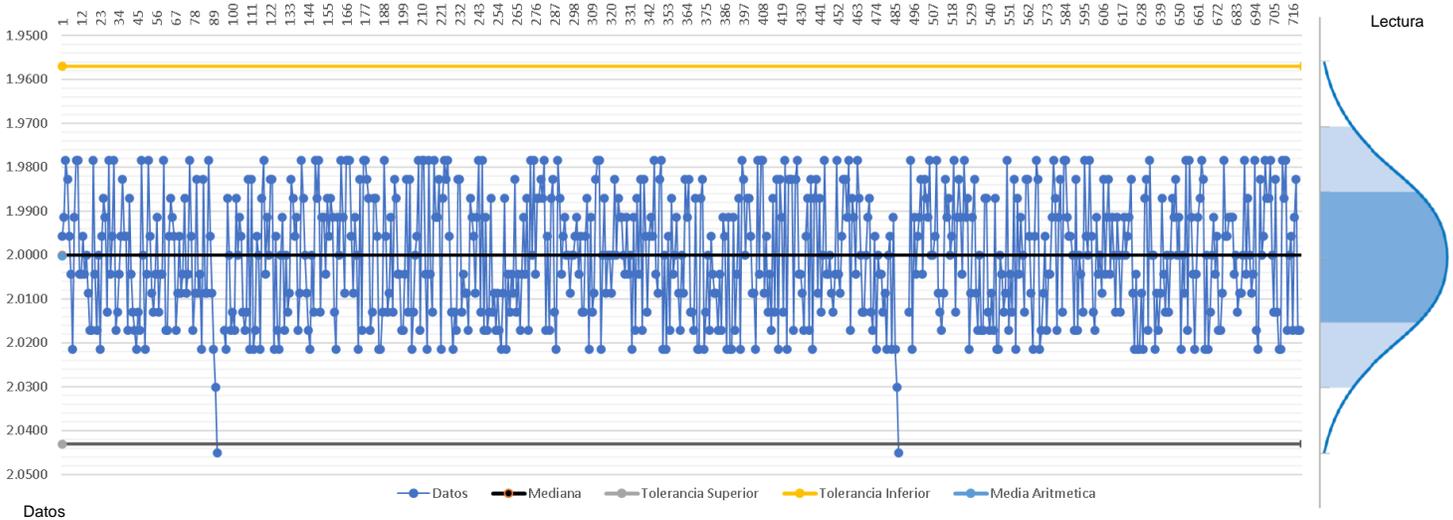
Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Se definió el estadístico de prueba D_c : 0.0497 obtenido mediante el valor de diferencia máxima absoluta. Al contrastar el estadístico $D_t > D_c$ se comprobó que la hipótesis nula se acepta, concluyendo que con un nivel de confianza del 95 %, se tiene un comportamiento que aproximan a una distribución normal.

3.9. Estudio de control del proceso

Una vez que se argumentó que el comportamiento de los datos traza una distribución gaussiana y que se ha identificado los elementos para realizar un estudio estadístico, se procedió a realizar los análisis.

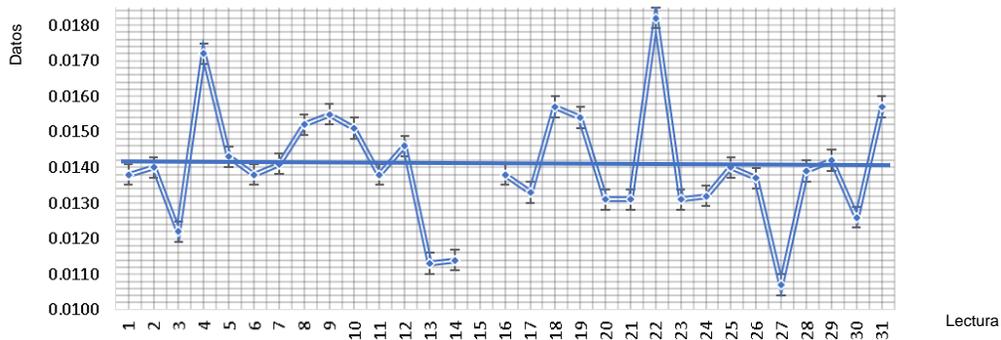
Figura 21. **Dispersión de datos y la regla empírica**



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

Fue importante revisar la desviación estándar diaria, debido a que este es el indicador que se evalúa como métrica de los resultados de variación. La desviación estándar se calculó diariamente para poder revisar que tanto fluctúa dentro de día con día. No se encontró una variabilidad alta, a excepción de los días donde se tuvo fallos en el equipo y se tuvo datos extremos o paros.

Figura 22. **Gráfico de dispersión de desviación estándar diaria**



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

3.9.1. Análisis de estabilidad

El proceso de operación de la maquina fue evaluado en cuanto a su estabilidad, mediante el uso y construcción de cartas de control.

Tabla XIV. Valores calculados para las variables

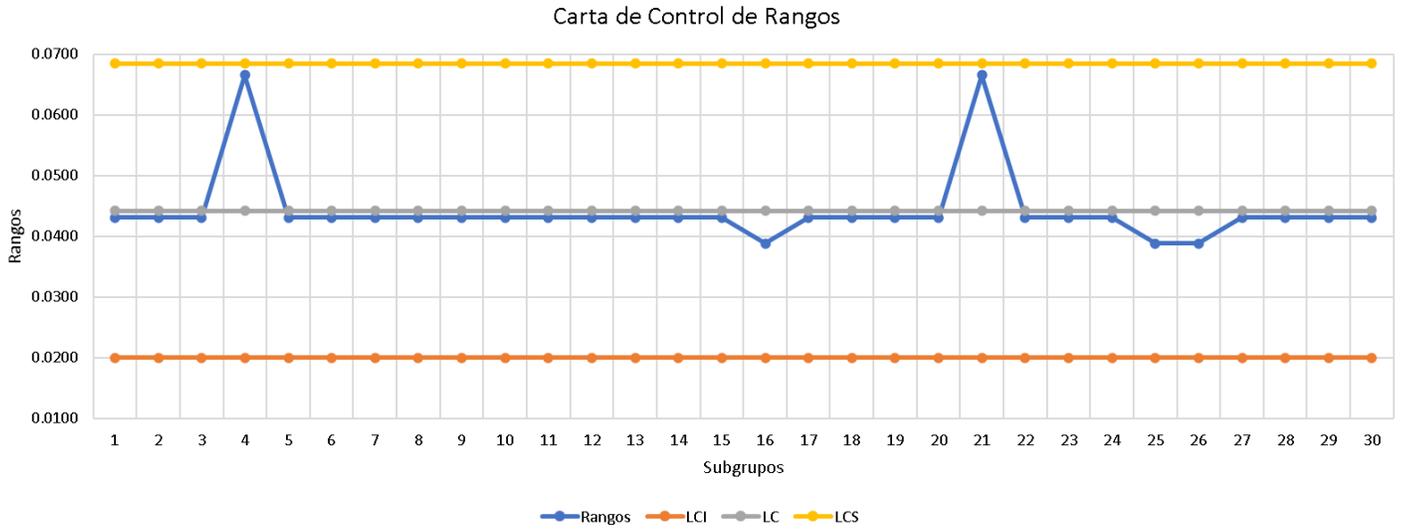
Datos de la Serie		A = 0.6124	B6 = 1.4289
Exactitud	4	A2 = 0.1572	d2 = 3.895
k =	30	A3 = 0.6324	d1 = 0.712
η =	24	c2 = 0.968	D1 = 1.7590
S =	0.0140	c4 = 0.9892	D2 = 6.0310
\bar{x} =	2.0003	B3 = 0.5555	D3 = 0.4516
n =	712	B4 = 1.4445	D4 = 1.5484
\bar{R} =	0.0442	B5 = 0.5495	

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

3.9.1.1. Cartas de control \bar{X} -R

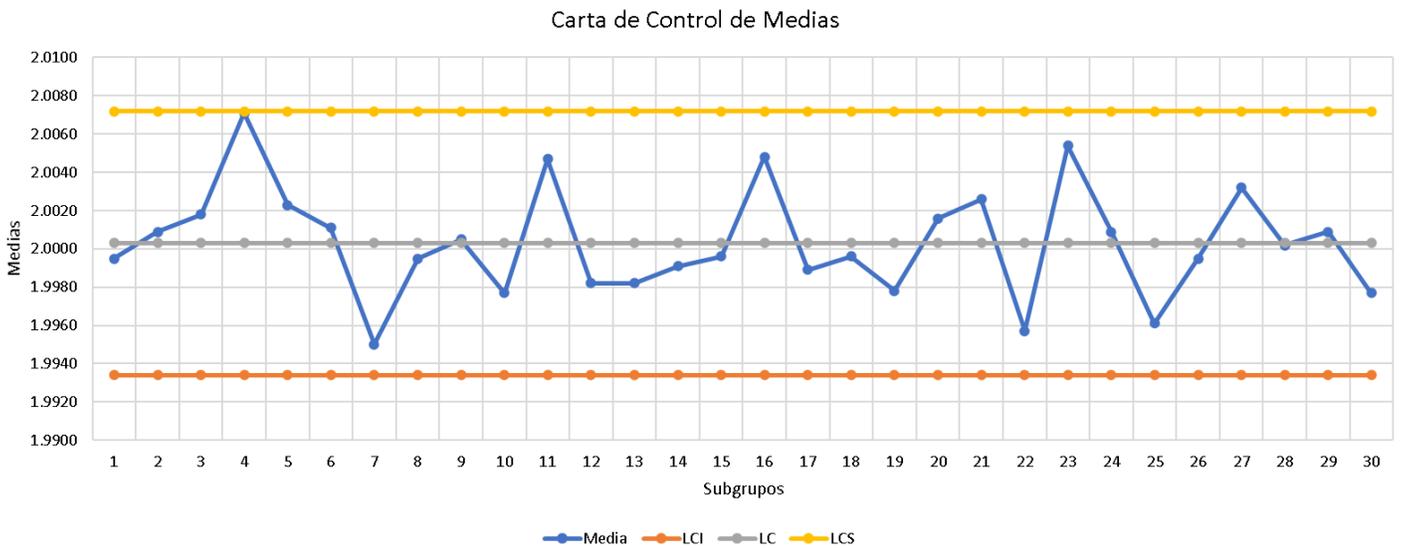
Debido a que se había definido que la carta de control de rangos R se aconseja para evaluar la estabilidad de procesos con muchos datos y subgrupos. Al evaluar las cartas de control, se pudo concluir que para el grafico de rangos, se observa una tendencia a línea recta continua, con unos picos y pequeñas fluctuaciones. Al evaluar el criterio de los 7 puntos, se podría asumir de primera línea que el proceso es inestable, ya que aparentemente no cumple con el criterio de aleatoriedad, sin embargo, al revisar las otras cartas y entender el porqué de este comportamiento, se concluyó que, debido a la variación tan pequeña en los datos, no es posible apreciar si existen cambios significativos en la amplitud de la dispersión, tampoco se aprecia de forma concluyente inestabilidad, por lo que se decidió no utilizarlas para los siguientes meses.

Figura 23. Carta de control \bar{R}



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

Figura 24. Carta de control \bar{x}



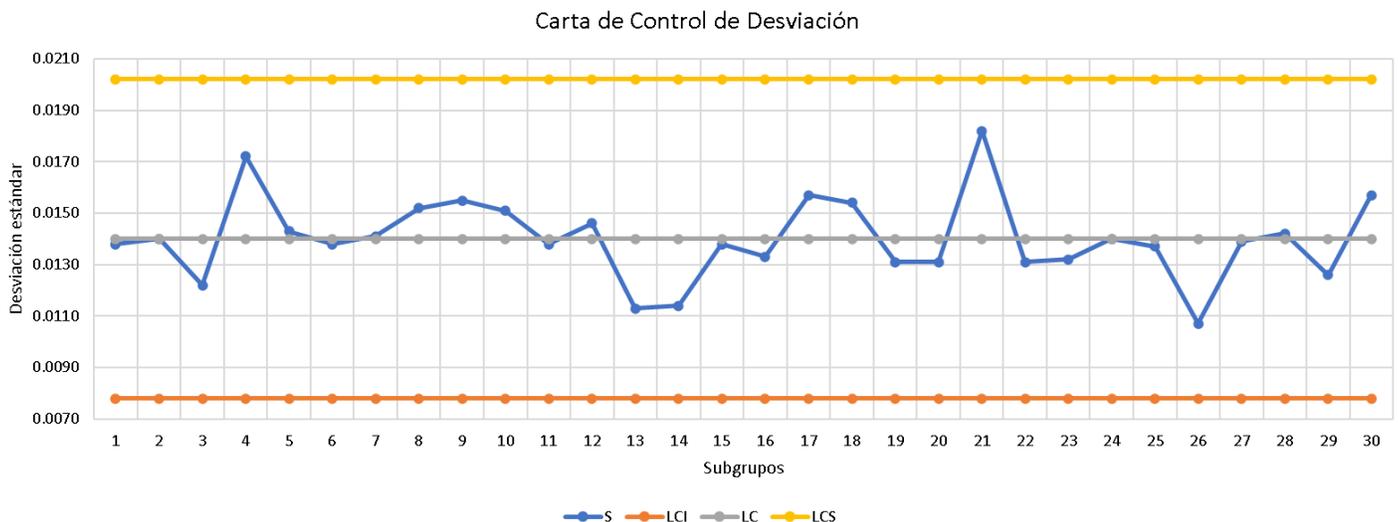
Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

3.9.1.2. Cartas de control \bar{x} -S

Las cartas de control de medias y desviaciones, fueron indispensables para identificar la existencia de pequeños cambios en las lecturas. Debido a que la carta de rangos no fue capaz de detectar esas pequeñas variaciones en los datos, se hizo uso de estas cartas que tienen una mayor potencia.

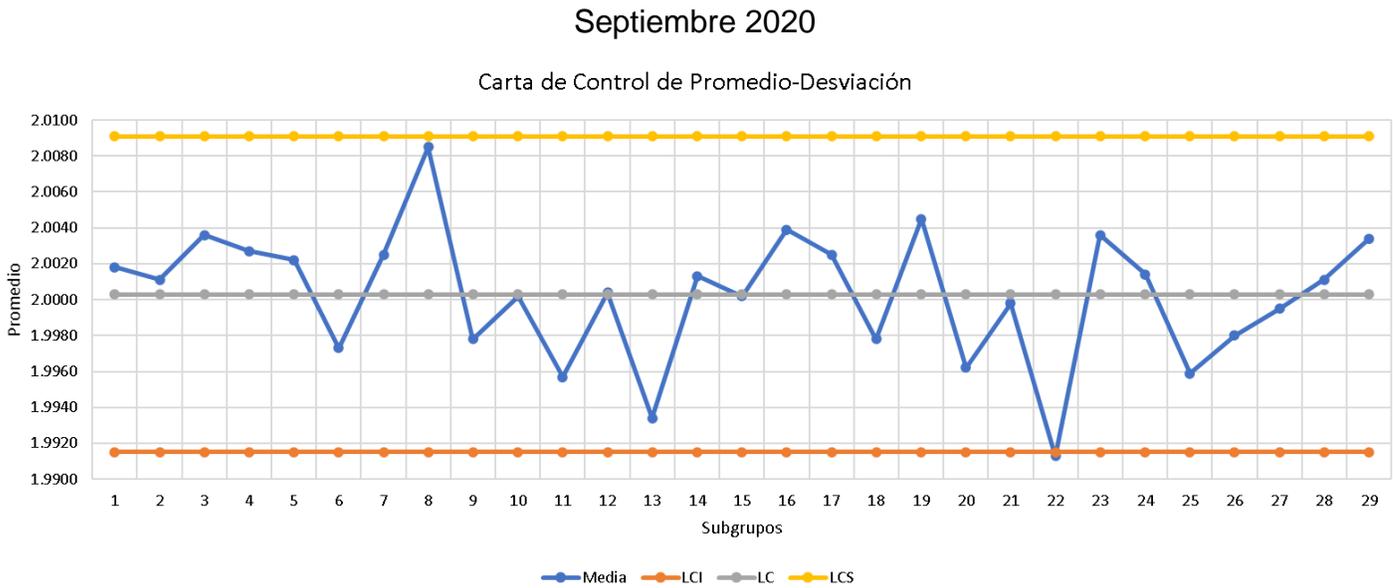
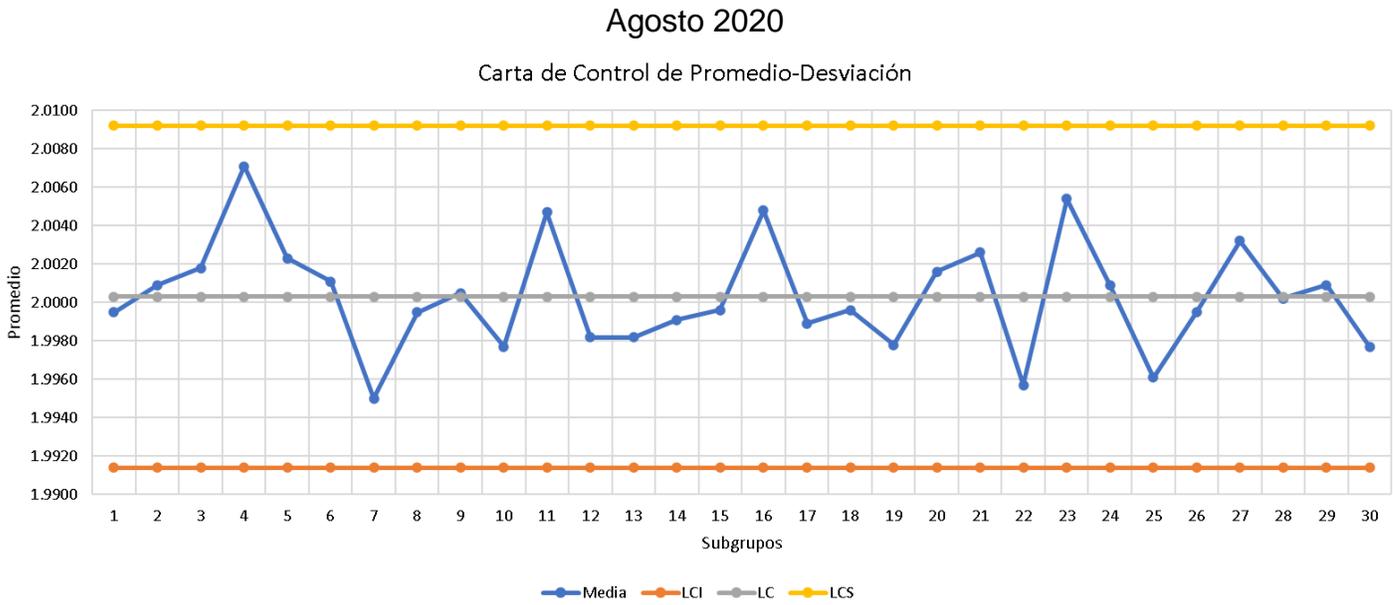
La carta de control de promedio-desviación, concluyo que se cuenta bajo control estadístico la estabilidad del proceso. Se refleja que, al evaluar las desviaciones estándar del proceso, la variación esperada se encuentra dentro de los parámetros de control. El proceso no tiene cambios importantes, por lo que no podrían generar inestabilidad. Se concluyo al observar las cartas que el proceso se encuentra en una operación estable y de forma correcta.

Figura 25. Carta de control S



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

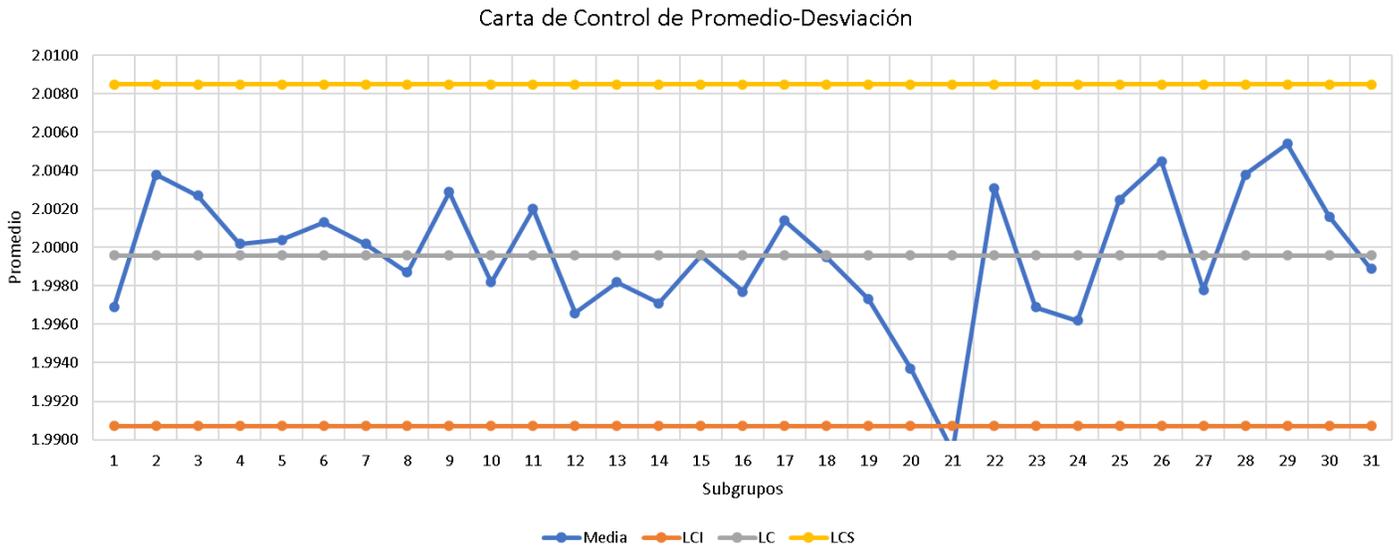
Figura 26. Carta de control promedio-desviación



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

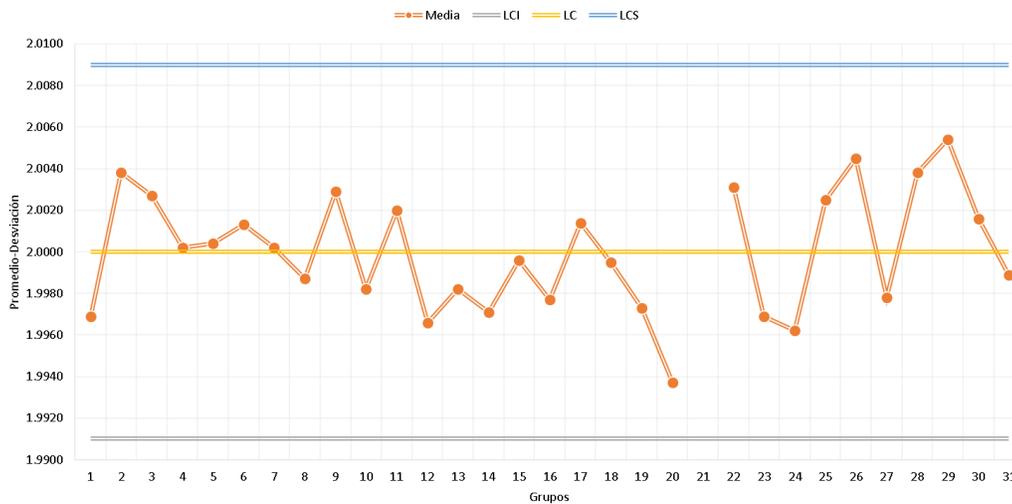
(Continuación) Figura 26. Carta de control promedio-desviación

Octubre 2020



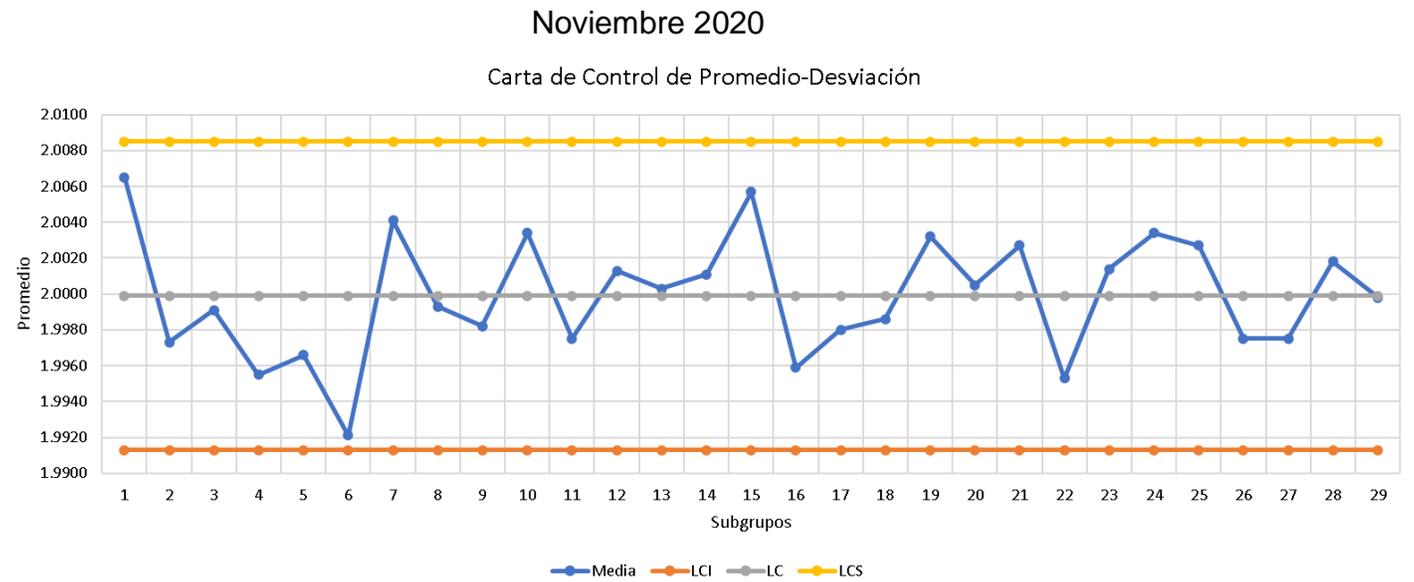
Octubre 2020

Gráfico de Shewhart de Promedio-Desviación - Corregido



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 26. Carta de control promedio-desviación

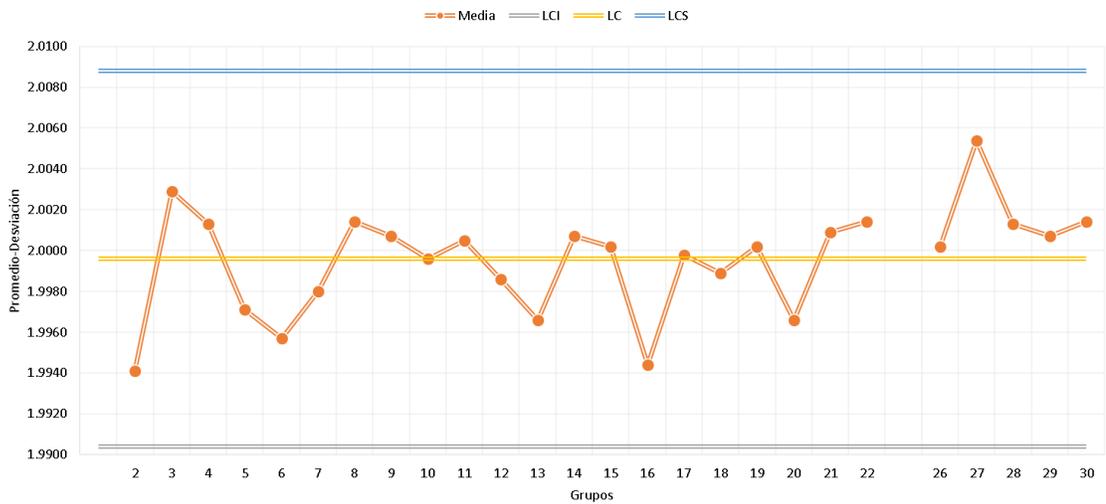


Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 26. Carta de control promedio-desviación

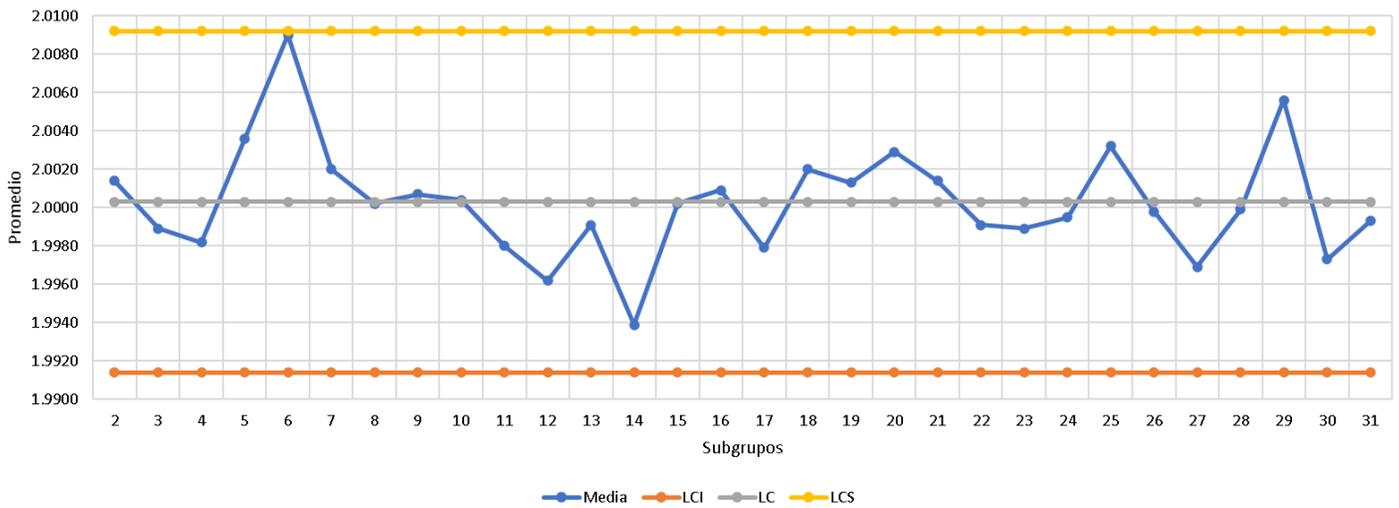
Diciembre 2020

Gráfico de Shewhart de Promedio-Desviación - Corregido



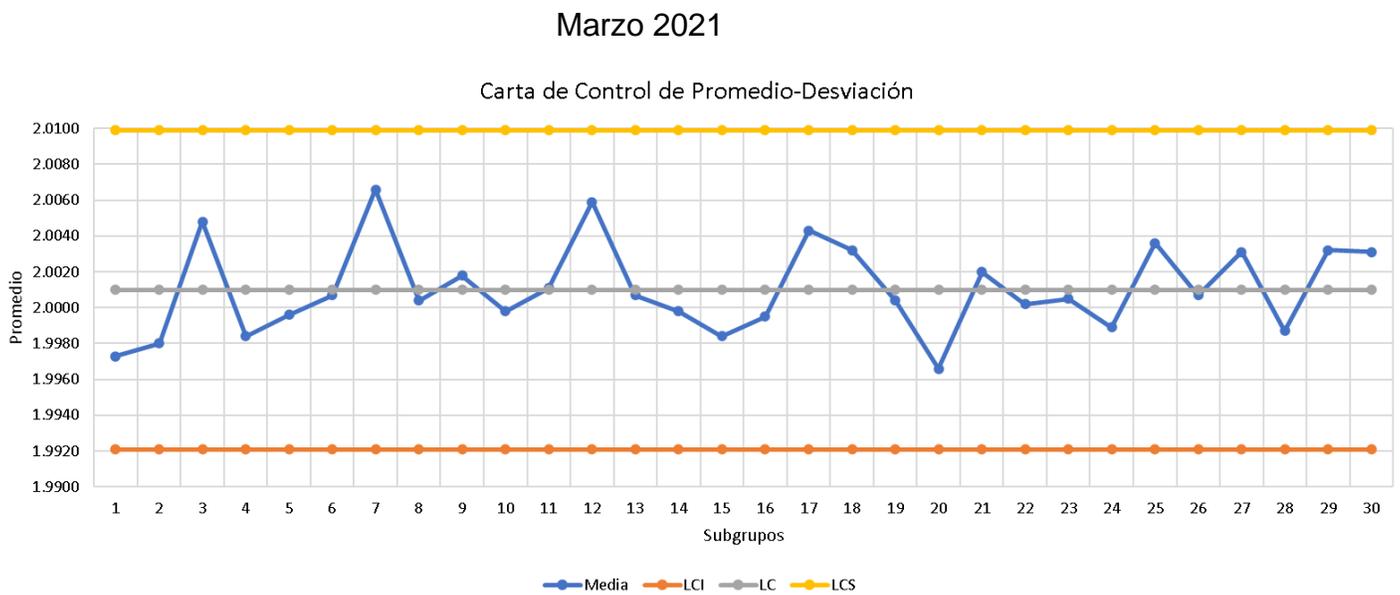
Enero 2021

Carta de Control de Promedio-Desviación



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 26. Carta de control promedio-desviación



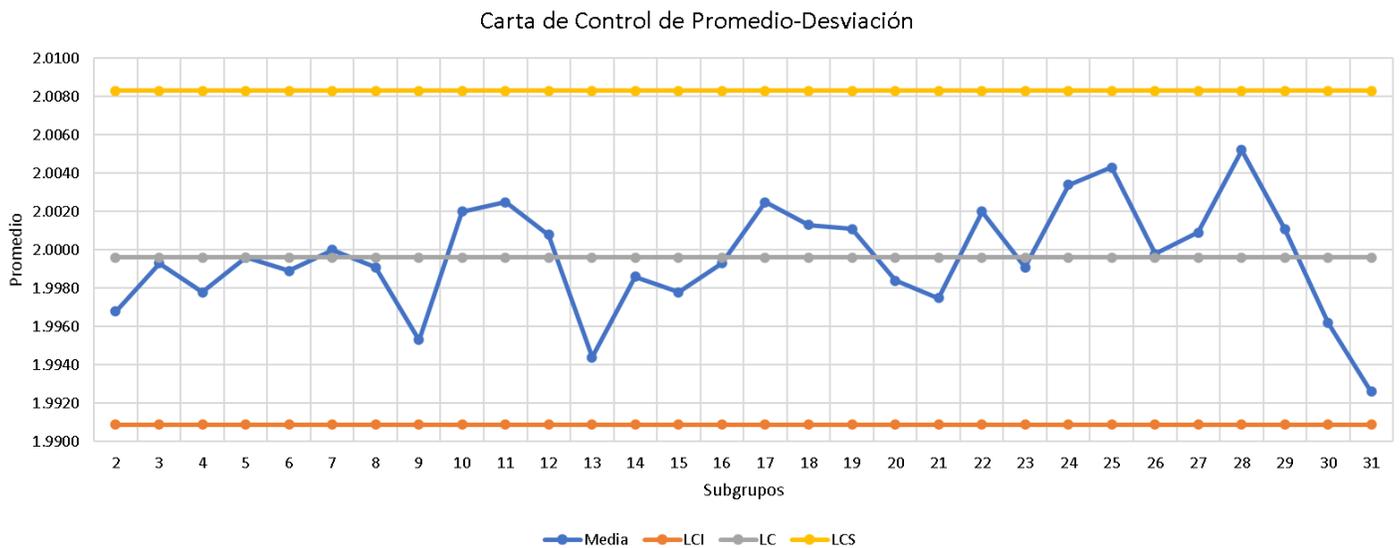
Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Figura 26. Carta de control promedio-desviación

Abril 2021



Mayo 2021



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

3.9.1.3. Índice de inestabilidad de proceso S_t

Un punto a considerar es la tendencia de la gráfica de rangos \bar{R} que se observó las fluctuaciones sobre uno de los lados del límite central sin pasar aleatoriamente de arriba hacia abajo y viceversa, no cumpliendo la regla de los 7 puntos, que dice que no puede tenerse más de esta cantidad de puntos en uno de los extremos consecutivamente, porque se consideraría inestable. Sin embargo, esto fue debido a que las diferencias de las variaciones son pequeñas como para ser detectadas por esta carta, por lo que se consideró la interpretación adquirida en las cartas de \bar{x} -S.

Tabla XV. Tabulación del índice de estabilidad

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Estabilidad de Proceso										
S_t	0.0000	2.5862	2.4194	0.8621	3.5714	0.8333	1.7857	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

3.9.2. Análisis de capacidad

Al definir la capacidad del proceso, fue preciso analizar que se tuvo en el tiempo una variación natural, en relación a la especificación definida. Lo que se evaluó fue la capacidad que tiene el proceso de mantenerse ubicado dentro de las especificaciones para una característica dada. Esto concluyo que el proceso está parcialmente adecuado, y que requiere un control estricto. La categoría del proceso está definida por categoría 2, por lo que se podría concluir que el proceso

de mantenimiento autónomo de la maquina debe mejorarse y controlarse para mejorar la capacidad de forma estricta y con modificaciones. Al realizar una comparación con el indicador potencial se concluye que, en términos generales, la media del proceso está alejada del centro de especificaciones.

Tabla XVI. Resultados para estudios de capacidad

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Cp	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165	1.0165
Cpk	1.0047	1.0047	1.0047	1.0118	0.9976	1.0095	1.0165	0.9882	0.9811	1.0165
Cpm	1.0094	1.0094	1.0094	1.0165	1.0094	1.0165	1.0165	1.0094	1.0094	1.0165
Cr	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837	0.9837
K	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
Zc	1.0047	1.0047	1.0047	1.0118	0.9976	1.0095	1.0165	0.9882	0.9811	1.0165
n	712	679	736	686	660	705	661	713	619	711

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Tabla XVII. Intervalos de confianza para los indicadores de capacidad

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Cp i	0.9637	0.9624	0.9646	0.9627	0.9616	0.9634	0.9617	0.9637	0.9599	0.9636
Cp s	1.0693	1.0706	1.0684	1.0703	1.0714	1.0696	1.0713	1.0693	1.0731	1.0694
Cpk i	0.9470	0.9457	0.9480	0.9527	0.9381	0.9513	0.9561	0.9314	0.9204	0.9582
Cpk s	1.0624	1.0637	1.0614	1.0709	1.0571	1.0677	1.0769	1.0450	1.0418	1.0748
Cpm i	0.9569	0.9557	0.9578	0.9627	0.9549	0.9634	0.9617	0.9568	0.9529	0.9637
Cpm s	1.0619	1.0631	1.0610	1.0703	1.0639	1.0696	1.0713	1.0620	1.0659	1.0693

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

3.10. Cálculo de la confiabilidad y disponibilidad

Se procedió a la tabulación de los datos calculados para la confiabilidad y disponibilidad mediante los datos obtenidos.

Tabla XVIII. Disponibilidad probabilística del equipo en el plan piloto

Mes	Frecuencia	Paros (hr)	Operación (hr)	P(f)	% Disp.
AGOSTO	2.000	8	712.0	0.0112	0.9888
SEPTIEMBRE	2.000	17	679.0	0.0250	0.9750
OCTUBRE	2.000	8	736.0	0.0109	0.9891
NOVIEMBRE	2.000	10	686.0	0.0146	0.9854
DICIEMBRE	2.000	12	660.0	0.0182	0.9818
ENERO	2.000	15	705.0	0.0213	0.9787
FEBRERO	2.000	11	661.0	0.0166	0.9834
MARZO	2.000	7	713.0	0.0098	0.9902
ABRIL	2.000	5	619.0	0.0081	0.9919
MAYO	2.000	9	711.0	0.0127	0.9873

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Tabla XIX. Tiempo medio de reparación MTTR y Tiempo medio entre fallas

Mes	MTBF	λ	MTTR	C	d
AGOSTO	360.0000	0.0028	4.0000	0.9945	0.9890
SEPTIEMBRE	348.0000	0.0029	8.5000	0.9943	0.9762
OCTUBRE	372.0000	0.0027	4.0000	0.9946	0.9894
NOVIEMBRE	348.0000	0.0029	5.0000	0.9943	0.9858
DICIEMBRE	336.0000	0.0030	6.0000	0.9941	0.9825
ENERO	360.0000	0.0028	7.5000	0.9945	0.9796
FEBRERO	336.0000	0.0030	5.5000	0.9941	0.9839
MARZO	360.0000	0.0028	3.5000	0.9945	0.9904
ABRIL	312.0000	0.0032	2.5000	0.9936	0.9921
MAYO	360.0000	0.0028	4.5000	0.9945	0.9877

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

3.10.1. Cálculo y resultados de métricas Lean Six-Sigma

Una vez se replicó todo el plan piloto a los meses siguientes, se obtuvo los datos suficientes para poder calcular los parámetros a largo plazo y así evaluar el nivel de las métricas de Six-Sigma del proceso. Para ello se hizo preciso el

realizar cálculos de los parámetros estadísticos a largo plazo, con todos los datos del estudio.

Se verifico que P_p y P_{pk} fueron mayores que C_p y C_{pk} respectivamente, concluyendo que significativamente se encuentra bajo control estadístico el proceso evaluado.

Se considera, que en el corto plazo existe un buen control estadístico en el proceso y con el tiempo se tendrá una capacidad más aceptable.

Se traduciría en que las estrategias de mantenimiento autónomo en el plan de TPM, los cambios en los ajustes y tiempos de ejecución de conservación de la máquina, han mantenido un buen desempeño en un periodo de tiempo.

Tabla XX. Resultados de los estudios a largo plazo

Mes Observado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Zc	3.0141	3.0141	3.0141	3.0354	2.9928	3.0285	3.0495	2.9646	2.9433	3.0495
ZL	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729	3.0729
Zm	-0.0588	-0.0588	-0.0588	-0.0375	-0.0801	-0.0444	-0.0234	-0.1083	-0.1296	-0.0234
Pp	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250
Ppk	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243	1.0243

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Una vez que se realizo la clasificacion se concluye que el valor de sigma para el proceso de operación de la maquina es de 4.5σ , lo que se traduce en que el equipo tiene una buena estabilidad y capacidad de operar bajo especificaciones.

Se esperaria que se tuviera un PPM (partes por millon) de 1,350 de defectos es decir de puntos o desplazamientos fuera de especificacion por cada millon.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se observó en los estudios de estabilidad y capacidad, el proceso se encuentra estadísticamente controlado, en el corto plazo, para ello se replicó el mismo estudio para cada mes, obteniendo los datos para la realización del estudio completo.

4.1. Análisis interno

Se puede concluir que se tiene un comportamiento estadístico muy similar, por lo que las conclusiones y decisiones tomadas aplican para todo el proyecto. Las curvas y graficas tienen un comportamiento muy parecido entre los meses, las diferencias existentes se dieron por cuestiones de horas trabajadas y se evidencio que, en el transcurso de la operación, el comportamiento del equipo es muy similar. Los resultados alcanzados de los análisis de desplazamientos horizontales mecánicos en función del tiempo, fueron de acuerdo a:

- El desplazamiento horizontal, marca una tendencia que los puntos se acumulan en el centro de la distribución y que estos oscilan de forma bastante uniforme.
- La variable de estudio X_0 que registra la distancia estimada entre el punto de control y el equipo, se mantiene bastante constante en el tiempo, por lo que se recomienda un estudio a largo plazo, con las métricas de Six-Sigma para estimar el desgaste en el tiempo del equipo.

- Con estas lecturas es posible evaluar la función de confiabilidad, la cual evidenciara la disponibilidad del equipo en horas. Para una toma de decisiones más acertada en cuanto a planificación de uso y paro del equipo sin afectar en su rendimiento. Esto también permite ser más eficiente en cuanto al uso de los recursos operacionales, reducir reprocesos o desperdicios y llevar un mejor control del equipo.
- Se recomienda evaluar los planes de mantenimiento preventivo, así como el proceso de limpieza y ajuste que se le da a la máquina, como parte del programa de mantenimiento autónomo, en el TPM.

El estudio del proceso, por medio de estadística descriptiva, muestra los distintos estadígrafos del comportamiento y naturaleza del proceso, se pudo observar también que es posible estadísticamente realizar un análisis que permita mostrar las características más relevantes de la operación y como se encuentra el equipo.

4.1.1. Resultados del estudio de control

Para el estudio de control, se muestran los hallazgos de los indicadores calculados para el análisis de estabilidad y capacidad del proceso. Se concluyo que el equipo presento una estabilidad en cuanto al proceso, aunque en algunos meses se encontró un nivel del indicador de inestabilidad mayor a 3. El indicador muestra que si se llega a mantener entre el intervalo $2 \leq S_t \leq 5$, se considera que se encuentra un proceso regular. En términos generales el proceso se considera capaz y estable para poder trabajar las estrategias de mejora y ejecución del mantenimiento autónomo del mismo, aunque la capacidad sea parcialmente.

Los resultados obtenidos en el estudio de estabilidad permitieron definir que se tiene un proceso estable en el tiempo. En el indicador de inestabilidad se puede observar que para todos los meses el proceso se mantiene aceptable en cuanto a su comportamiento en el tiempo. Las cartas de control evidenciaron que el proceso regularmente mantiene su nivel operativo de forma aceptable, que se tiene aleatoriedad en los datos y que es necesario emplear la carta de \bar{x} -S debido a los pequeños cambios en el proceso.

El proceso tiene capacidad de mantenerse de forma admisible en el tiempo de forma aceptable, ya que los indicadores evaluados mostraron que es parcialmente capaz de operar conforme a especificación. El equipo se encuentra estadísticamente centrado y es capaz al operar de mantener un cumplir de especificaciones de trabajo, pero necesita ser mejorado.

Es importante mencionar que para concluir de mejor manera se realizó una evaluación que permita revisar el comportamiento del equipo a largo plazo, donde el desgaste natural de la máquina, por mantenimientos, operación o cualquier desgaste natural que cause variabilidad, es inevitable y por consiguiente deben tomarse medidas preventivas con el fin de conservar el equipo el mayor tiempo posible. Se concluyó que el equipo cumple y que opera en una condición aceptable.

4.1.2. Resultados del estudio de confiabilidad y disponibilidad

Para los resultados que se obtuvieron en las evaluaciones de confiabilidad y disponibilidad del equipo se concluyó que se observaron en promedio dos fallas durante cada mes.

Aunque el promedio de horas por fallo es muy distinto entre cada intervalo, se pudo concluir que el mejor tiempo para cada mantenimiento autónomo debería hacerse en periodos de 312 horas, según se presentó en el estudio.

Esto permitiría que el mantenimiento autónomo sea realizado de mejor manera esperando que como resultado, el promedio de horas en que se presentaron los fallos, sea reducido.

Tabla XXI. Registro promedio de los fallos ocurridos en el equipo

	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
t =	720	696	744	696	672	720	672	720	624	720
# Fallas =	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
MTBF =	360.00	348.00	372.00	348.00	336.00	360.00	336.00	360.00	312.00	360.00
λ =	0.0028	0.0029	0.0027	0.0029	0.0030	0.0028	0.0030	0.0028	0.0032	0.0028
MTTR =	4.0000	8.5000	4.0000	5.0000	6.0000	7.5000	5.5000	3.5000	2.5000	4.5000
C =	0.9945	0.9943	0.9946	0.9943	0.9941	0.9945	0.9941	0.9945	0.9936	0.9945
d =	0.9890	0.9762	0.9894	0.9858	0.9825	0.9796	0.9839	0.9904	0.9921	0.9877
M =	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio

Para la disponibilidad del equipo se concluyó que se puede tener una media del 98 % del equipo disponible durante las horas de operación. Como se muestra en los resultados obtenidos.

- La confiabilidad del equipo, se mantiene arriba del 99 % por lo que se considera que el mantenimiento productivo total TPM ha hecho que el proceso se mantenga confiable, y se esperaría que subiera por medio del ajuste en los tiempos de ejecución del mantenimiento autónomo.

- La disponibilidad del equipo, muestra que estadísticamente el equipo se mantiene disponible durante su operación, en al menos un 97 % del tiempo utilizado.
- La mantenibilidad, muestra que el equipo tiene un nivel alto para las reparaciones ya que se encuentra en un 1 de la escala probabilística medida. Por lo que se concluyó que el equipo al tener este valor esperado, se puede tener un tiempo de recuperación de la falla bastante aceptable. Se interpreta como el valor más cercano a 1 que el equipo es fácil de mantener, mientras que cercano a 0 es lo contrario.
- El MTBF es bastante aceptable, ya que la cantidad promedio de horas y fallos presentados por cada mes evaluado es bastante controlable, porque no se tienen dispersiones de datos que se alejen de la media observada.
- En el MTTR se puede apreciar que el tiempo medio de recuperación de falla del equipo es bajo comparado con los tiempos de operación, por lo que se considera al ser bajo que se tiene un nivel aceptable.

Para el análisis de confiabilidad, se considera que los elementos evaluados dan un buen nivel de aceptación y se considera que el mantenimiento productivo total, hace que sea más alto el tiempo de funcionamiento del equipo de forma eficiente.

Es importante considerar que el tiempo que transcurre entre los fallos y su reparación, o sea el tiempo de operación, es importante que sea extendido el mayor tiempo posible y que la falla sea reparada tan pronto como sea posible.

Si se programan las rutinas programadas del mantenimiento autónomo durante los paros sugeridos, podría incrementarse este porcentaje de disponibilidad, ya que no se tendrían paros no previstos en el equipo, mejorando

la eficiencia de su utilización, reduciendo tiempos muertos, paros no programados, desperdicios y reprocesos, que podrían evitarse.

4.2. Análisis externo

Como lo definió Cobos (2015), las cartas de control obtienen una gran importancia para el control estadístico que se le dé a un proceso en el ámbito industrial, dada la validez con las que se puede observar variaciones de forma detallada, sin importar el tamaño de la corrida de producción.

En efecto, cuando se analizó las cartas de control se concluye que es una herramienta de importancia en relación al estudio de estabilidad, para el cual también se hizo uso del índice de inestabilidad, demostrando así la validez del estudio. Se pudo determinar que la carta de control de promedio-desviación presentó, como herramienta de análisis, una mayor capacidad de mostrar las diferenciaciones, debido a que este proceso presenta variaciones pequeñas.

De la misma manera se concluye en que la concordancia con la que indicaron Gasca, Camargo y Medina (2017), al concluir que es de suma importancia incluir en la estimación de confiabilidad en los equipos industriales, estudios adicionales que contemplen herramientas de control administrativo y operacional mediante historiales de fallas propiamente.

Es importante considerar que existen diversas herramientas como el análisis del modo, catálogos de fallas identificadas o manual de defectos, y que es importante que sean parte de la documentación requerida en el TPM.

CONCLUSIONES

1. El estudio de estadística descriptiva con datos agrupados, reflejo un comportamiento del proceso como estable, estadísticamente capaz, uniforme y que describe normalidad e independencia. Según se pudo observar en los análisis de estadística descriptiva y en los análisis gráficos realizados, se sustentó la validez de los estudios de estabilidad y capacidad, que permitieron encontrar las herramientas de control estadístico del proceso, mediante cartas de control e indicadores de capacidad.
2. Se evidenció que el proceso se presenta estable. Se utilizó la carta de control promedio-desviación, por ser un instrumento robusto. Esta herramienta es más apropiada debido a que, al ser las variaciones pequeñas, no pueden ser concluyentes en otras cartas, como se observó, en la carta de control de rangos, que al evaluar desplazamientos pequeños y estudiar desviaciones en variaciones puede que este instrumento no sea sensible. En este orden de ideas, el estudio definido control estadístico de procesos, permitirá ser una herramienta para una toma de decisiones acertada, optimizando así las horas de ajustes necesarias, como parte del mantenimiento autónomo, evitando que equipo presente interrupciones en su operación.
3. El estudio evidenció que el proceso se define como estadísticamente capaz de forma parcial, necesita ajustes de centrado inmediatos. Este opera cumpliendo las funciones como está planificado, pero se corre el riesgo de salir de especificación. El análisis con el índice de Taguchi, es el más

importante a considerar, debido al centrado y variabilidad estadística del proceso. Esto permitirá monitorear la operación del equipo, verificando que se mantiene bajo un proceso centrado y que este sea completamente capaz de mantener su operación cumpliendo especificaciones.

4. Se creó un estudio de control estadístico de procesos, utilizando las herramientas de estadística descriptiva y los estudios de estabilidad y capacidad, que permitió estudiar el proceso interpretando los desplazamientos horizontales. Para desarrollar un estudio de confiabilidad que permitió obtener un óptimo intervalo de disponibilidad del equipo y que, en el transcurso de este tiempo, se ejecute la rutina de mantenimiento autónomo. Se concluyó que estas actividades deberían hacerse cada 312 horas de operación y que esta acción este de acuerdo con las actividades definidas en el programa de TPM debido a que el objetivo de la conservación industrial es mantener el equipo operando la mayor cantidad de tiempo posible, extender su vida útil y mantener el margen de mantenimiento preventivo lo más amplio posible sin afectar la disponibilidad del mismo.

RECOMENDACIONES

1. Someter a constantes actualizaciones el estudio estadístico de datos, debido a que es necesario que se continúe con el monitoreo del equipo, con el fin de mantener las métricas del estudio actualizados. Aunque el estudio ya fue definido y el cálculo de estas variables sirvió para sustentar el control estadístico del proceso, es importante que se mantenga monitoreado y actualizado, para que se pueda siempre tener un buen argumento en la toma de decisiones respecto a cambios, reemplazos de piezas o variaciones en los tiempos de mantenimiento autónomo.
2. Evaluar las métricas constantemente debido a que se obtuvo pequeñas variaciones y que estas pueden ser sensibles a fuentes de variación especiales, que podrían hacer que la carta de control promedio-desviación salga de control, es importante que se continúe con el uso de las herramientas estadísticas definidas en el estudio, para poder tener una fuente de criterio más acertada. También es posible integrar una gráfica de promedio móvil ponderado exponencial (EWMA), que permitiría mejorar el control del proceso, debido a que esta grafica se construye asignando mayor peso a las lecturas más recientes que a los datos históricos, evidenciando así las mejoras realizadas en el plan de mantenimiento autónomo y sustentando el estudio de una mejor manera.
3. Considerar que el proceso sufrirá desgastes en el tiempo, los cuales se dan de forma natural o por causas de variación especiales, tales como desgastes del equipo, mantenimientos y fuentes de variación propias de la

operación, se pide que el equipo se mantenga monitoreado y actualizado en cuanto al estudio de capacidad estadística, para poder considerar futuras decisiones de reemplazo de piezas, paros para reparaciones mayores o la ejecución de un mantenimiento a punto.

4. Considerar que se puede diversificar el estudio agregando los tipos de fallos y creando historiales que puedan ayudar de forma predictiva el reemplazo de componentes o anticipación de paros no programados del equipo. Es indispensable que se considere en el programa *Kaizen*.

REFERENCIAS

1. Acuña, J. (2003). *Ingeniería de la confiabilidad*. Costa Rica: primera edición. Editorial tecnología de Costa Rica. pp.280.
2. Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. México: octava edición. Pearson Prentice-Hall. pp.552.
3. Bracamonte, E. (2018). *Aproximación a la distribución normal de los registros de humedad relativa en la ciudad de Guatemala durante el periodo 1978 a 1983, utilizando la prueba de Kolmogórov-Smirnov*. Revista de la escuela de estudios de postgrado EEP. Facultad de ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Volumen 9. Número 1. p.30-34. Consultado en julio 2021. ISSN 2518-4725.
4. Cobos, J. (2015). *Implementación de una carta de control para corridas cortas en la industria de autopartes*. Publicación de revista Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería. Volumen 21. Numero: 1. p.97. Scielo Analytics. Consultado septiembre 2020. Recuperado de: <https://www.scielo.org.co/pdf/inge/v21n1/v21n1a07.pdf>
5. Creus, A. (2011). *Instrumentación industrial*. México: octava edición. Alfa-Omega Editores. pp.794.

6. Cruz, J. (2010). *Manual para la implementación sostenible de las 5S*. República Dominicana: segunda edición. Infotep editor. pp.56.
7. Del Val, J. (2016) *Industria 4.0: la transformación digital de la industria*. Revista Ingeniería. Publicación de revista web de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto, Alemania. Edición Marzo. Consultado septiembre 2020. Recuperado de:
<https://revistaingenieria.deusto.es/tag/industria-4-0/>
8. Evans, J. y Lindsay, W. (2015). *Administración y control de la calidad*. México: novena edición. Cengage Learning. pp.788.
9. García-Garrido, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. España: primera edición. Ediciones Diaz de Santos. pp.321.
10. Gasca, M. Camargo, L. y Medina, B. (2017). *Sistema para Evaluar la Confiabilidad de Equipos Críticos en el Sector Industrial*. Publicación de revista Información Tecnológica Volumen 28. p.111-124. Sci-ELO Analytics. Consultado septiembre 2020. Recuperado de:
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v28n4/art14.pdf>
11. Gujarati, D. y Porter D. (2009). *Econometría*. México: quinta edición. Mc Graw Hill. pp.946.
12. Gutiérrez, H. y de la Vara, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Six Sigma*. México: tercera edición. Mc Graw Hill. pp.490.

13. Hamdy, T. (2012). *Investigación de operaciones*. México: novena edición. Pearson. pp.827.
14. Hernández-Pedreira, C. y Da Silva, F. (2016). *Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en control de calidad*. Publicación de revista Tecnología Química. Universidad del Oriente. Cuba. Vol. XXXVI, Número 1, enero-abril, 2016, p. 130-145. Consultado septiembre 2020. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543786011.pdf>
15. Linares Depestre, L. (2012). *Del Mantenimiento Correctivo al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad*. Publicación de Empresa Geominera del Centro. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara. Cuba. Consultado en septiembre 2020. Recuperado de:
http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/download/341/333/
16. Lina, M. y Parra, C. (2020). *Determinación de límites de decisión clínica de ciclosporina en sangre en pacientes con trasplante renal*. Publicación de revista Con-Ciencia. Número 1. Volumen 8. p.53. Sci-ELO Analytics. Consultado septiembre de 2020. Recuperado de:
http://www.scielo.org.bo/pdf/rcfb/v8n1/v8n1_a05.pdf
17. Linas, H. (2017). *Estadística inferencial*. Colombia: Novena edición. Editorial Universidad del Norte. pp. 423.
18. Olarte, W. y Botero M. (2011). *La detección de ultrasonido: Una técnica empleada en el mantenimiento predictivo*. Publicación "Scientia et

Technica” Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. Año XVII, Numero 47. Consultado septiembre 2020. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327035.pdf>

19. Singiresu, R. (2012). *Vibraciones mecánicas*. México: quinta edición. Pearson Prentice-Hall. pp.1024.
20. Scheaffer, R. y Mendenhall, W. (1987). *Elementos de muestreo*. México: tercera edición. Grupo editorial Iberoamericana. pp.332.
21. Triola, M. (2018). *Estadística*. México: décimo segunda edición. Pearson Hispanoamérica. pp.764.
22. Walpole, R., Myers, R., Myers, y S. Yeng, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: novena edición. Pearson Prentice-Hall. pp.812.

APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de coherencia de la investigación

<p>¿Cuáles son los estudios de control estadístico de procesos que se necesitan construir para poder interpretar, y con ello controlar el proceso, mediante el análisis del comportamiento de las vibraciones mecánicas del equipo?</p>	<p>Implementar un control estadístico del proceso operacional para el monitoreo de vibraciones mecánicas del equipo, por medio de análisis descriptivo, estudios estadísticos de capacidad y de estabilidad, que permitan interpretar y controlar de mejor forma el tiempo de operación y mantenimiento.</p>	<p>Se creó un estudio de control estadístico de procesos, utilizando las herramientas de estadística descriptiva y los estudios de estabilidad y capacidad, que permitió estudiar el proceso interpretando los desplazamientos horizontales. Para desarrollar un estudio de confiabilidad que permitió obtener un óptimo intervalo de disponibilidad del equipo y que, en el transcurso de este tiempo, se ejecute la rutina de mantenimiento autónomo.</p>	<p>Es recomendable considerar que se puede diversificar el estudio agregando los tipos de fallos y creando historiales que puedan ayudar de forma predictiva el reemplazo de componentes o anticipación de paros no programados del equipo. Es indispensable que se considere en el programa Kaizen.</p>
---	--	---	--

(Continuación) Apéndice 1. Matriz de coherencia de la investigación

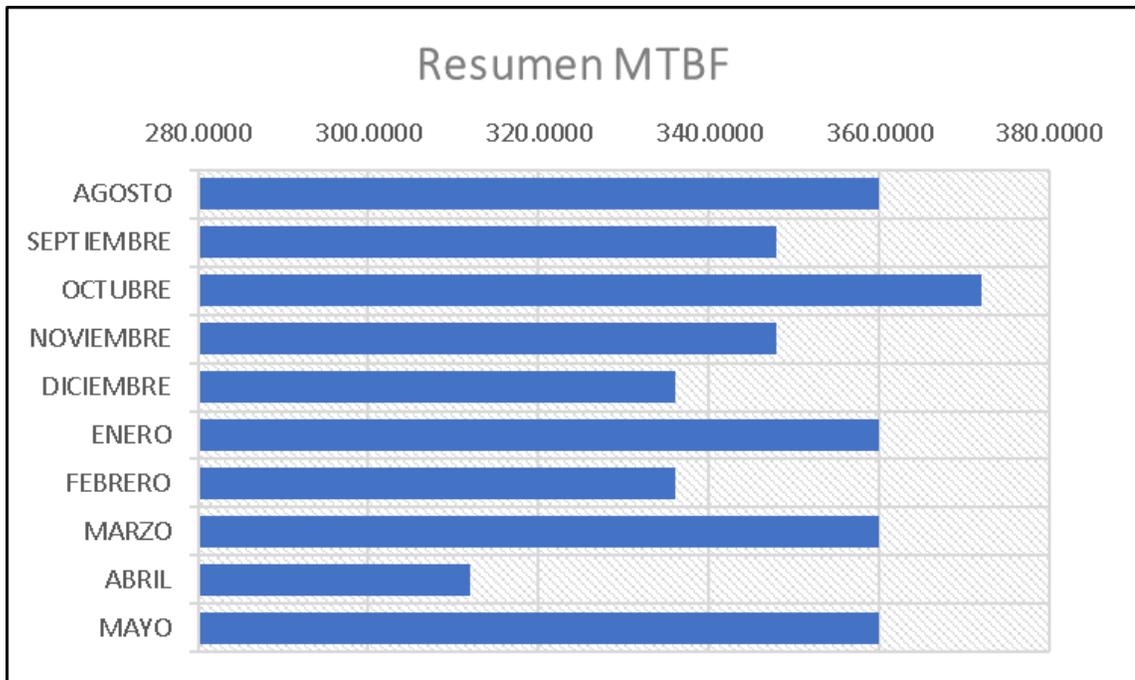
<p>¿Cuál es el comportamiento de los desplazamientos horizontales de la máquina de estudio en función del tiempo, para su control?</p>	<p>Describir el comportamiento de los desplazamientos horizontales mecánicos en función del tiempo , para desarrollar un estudio estadístico del proceso operativo por medio de análisis de estadística descriptiva.</p>	<p>El estudio de estadística descriptiva con datos agrupados, reflejo un comportamiento del proceso como estable, estadísticamente capaz, uniforme y que describe normalidad e independencia.</p>	<p>Se recomienda que el estudio de control estadístico se mantenga monitoreado y actualizado, para mantener argumentos en tomas de decisiones respecto a cambios, reemplazos o variaciones en tiempos planificados de mantenimiento autónomo</p>
<p>¿Qué estudios de estabilidad de proceso explicarían mejor, para evaluar las condiciones de operación del proceso?</p>	<p>Definir y construir los estudios de estabilidad que describan mejor el comportamiento de los datos a través de la metodología de control estadístico de procesos, que permita evaluar las condiciones del proceso.</p>	<p>El estudio concluyo que el proceso es estable. Se utilizo la carta de control de promedio-desviación, por ser un instrumento robusto. Esta es la más apropiada debido a que las variaciones al ser pequeñas, no pueden ser concluyentes en otras cartas.</p>	<p>Para evidenciar procesos de mejora continua, el integrar una gráfica de promedio móvil ponderado exponencial EWMA, permitiría evaluar estos cambios, ya que se construye asignando mayor peso a las lecturas más recientes que a los datos anteriores.</p>

(Continuación) Apéndice 1. Matriz de coherencia de la investigación

	<p>¿Cuál es el nivel de capacidad del equipo para desempeñar las funciones de operación propias, para evaluar su confiabilidad?</p>	<p>Definir y construir un estudio de capacidad de proceso, para establecer y evaluar la confiabilidad del equipo para desempeñar las funciones de operación propias.</p>	<p>El estudio concluyo que el proceso es capaz parcialmente. Estadísticamente opera cumpliendo las funciones como está planificado. El análisis con el índice de Taguchi, es el más importante a considerar, debido al centrado y variabilidad estadística del proceso.</p>	<p>Considerando que el proceso sufre desgastes en el tiempo, los cuales se dan de forma natural o por causas de variación especiales, tales como desgastes del equipo, mantenimientos y fuentes de variación propias de la operación, se recomienda que el equipo se mantenga monitoreado y actualizado.</p>
--	---	--	---	--

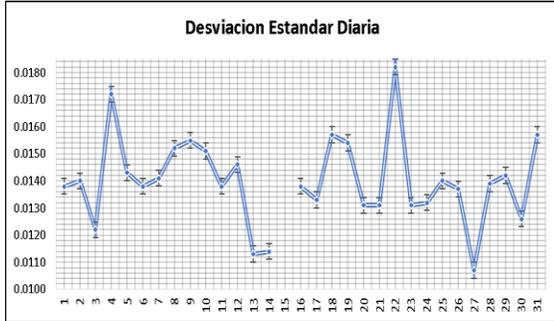
Fuente: elaboración propia

Apéndice 2. Gráfico comparativo del MTBF Mensual

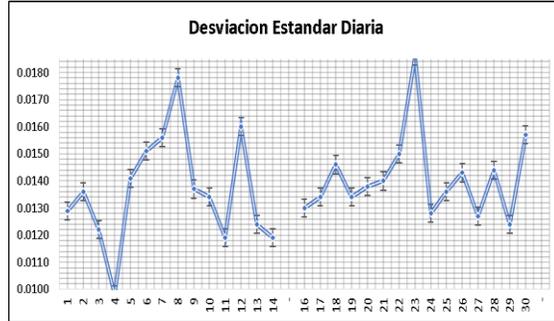


Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

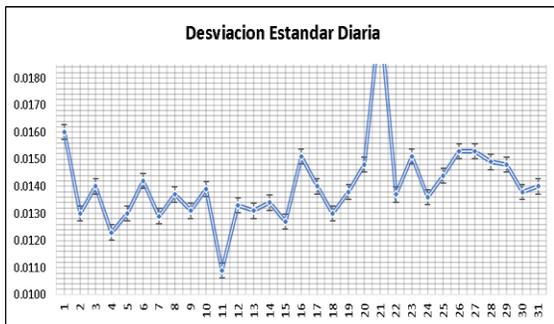
Apéndice 3. Gráfico de desviaciones diarias por mes



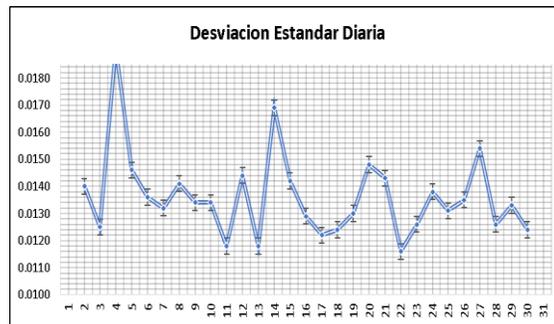
Agosto 2020



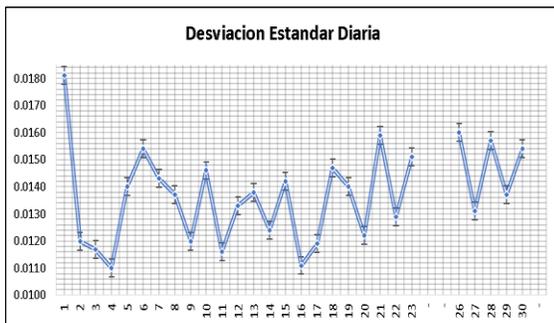
Septiembre 2020



Octubre 2020



Noviembre 2020



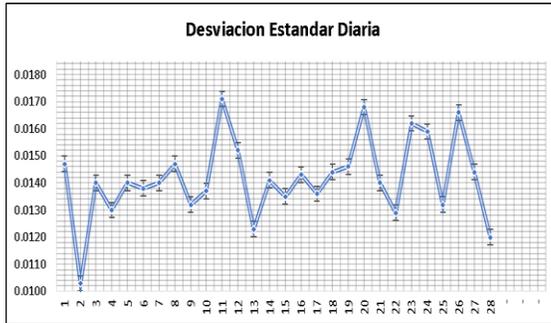
Diciembre 2020



Enero 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

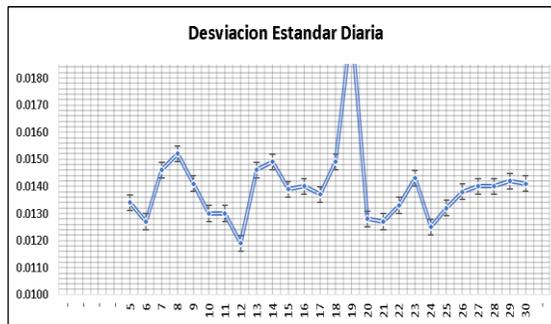
(Continuación) Apéndice 3. Gráfico de desviaciones diarias por mes



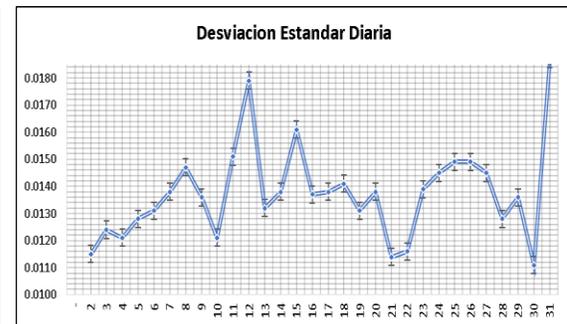
Febrero 2021



Marzo 2021



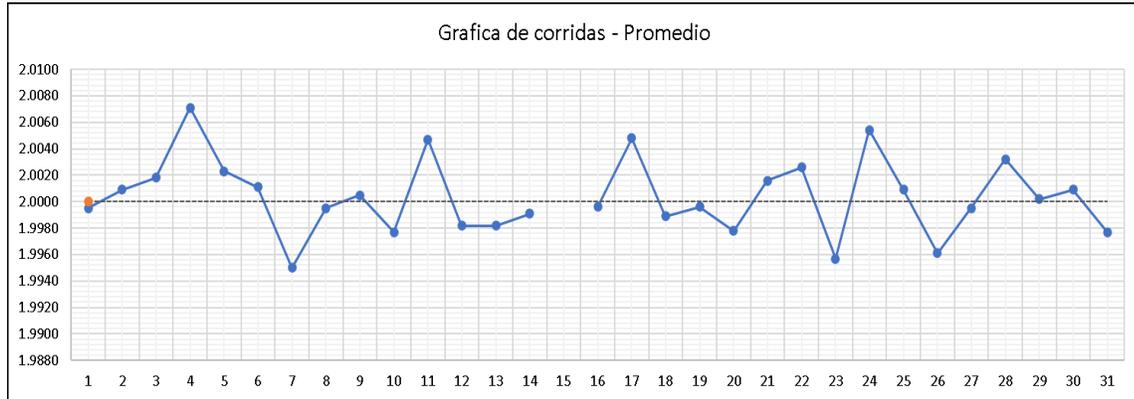
Abril 2021



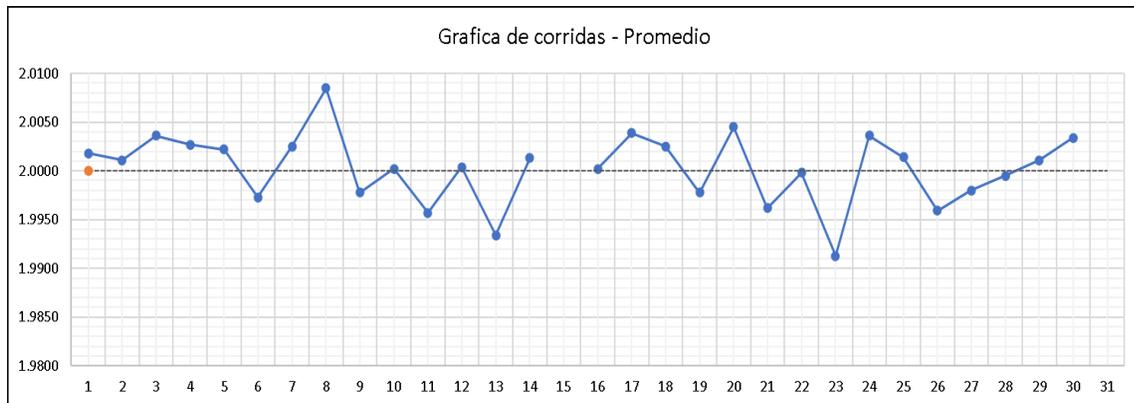
Mayo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

Apéndice 4. Grafica de Rachas - Corridas promedio



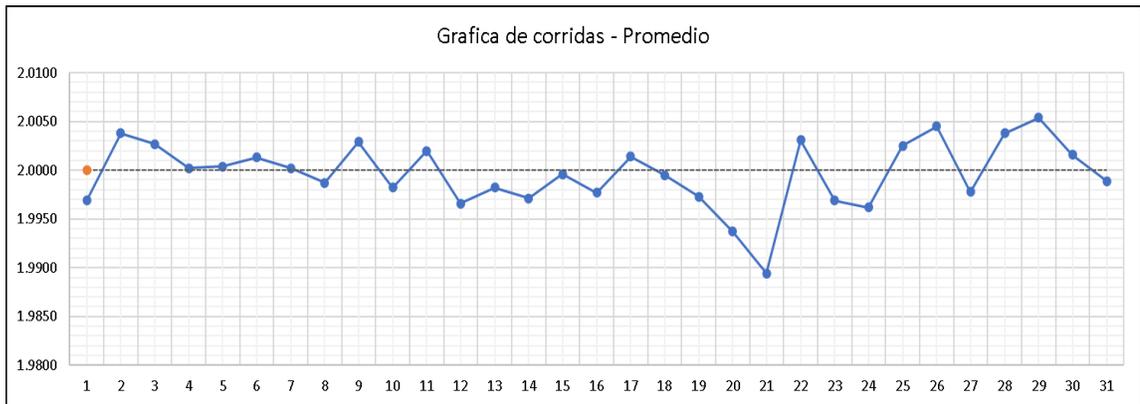
Agosto 2020



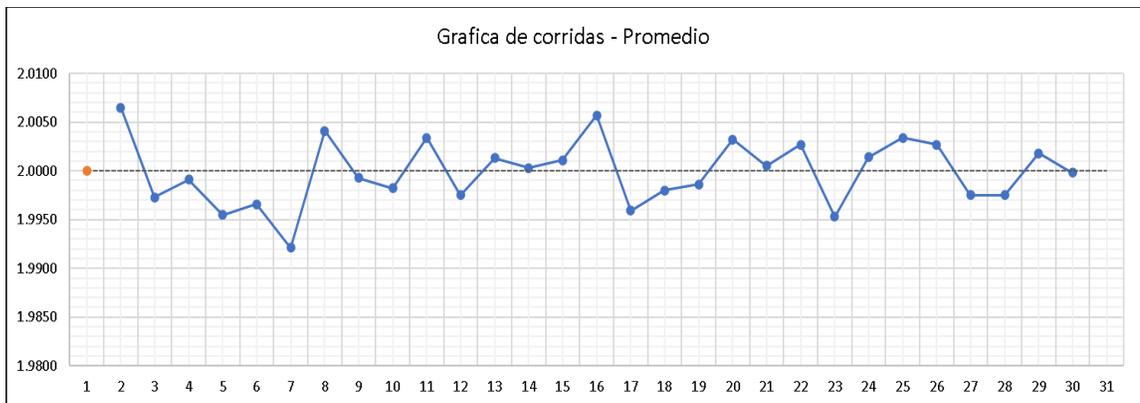
Septiembre 2020

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Apéndice 4. Grafica de Rachas - Corridos promedio



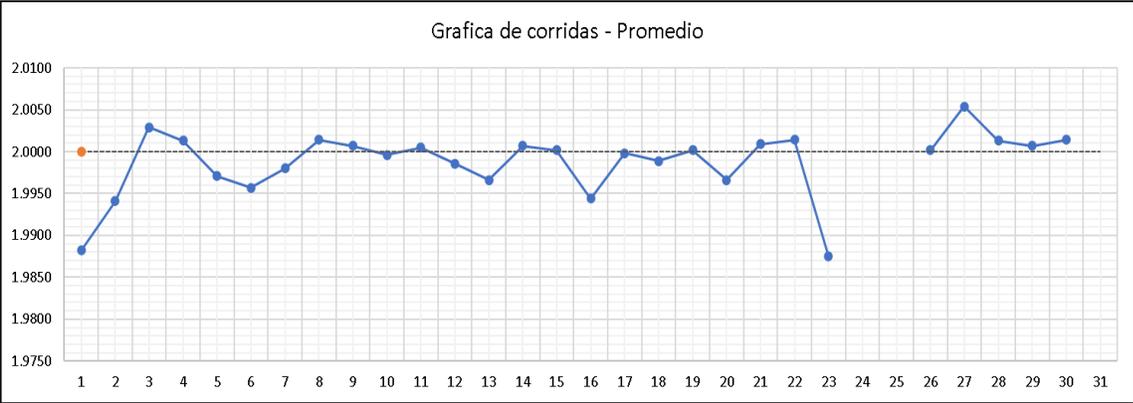
Octubre 2020



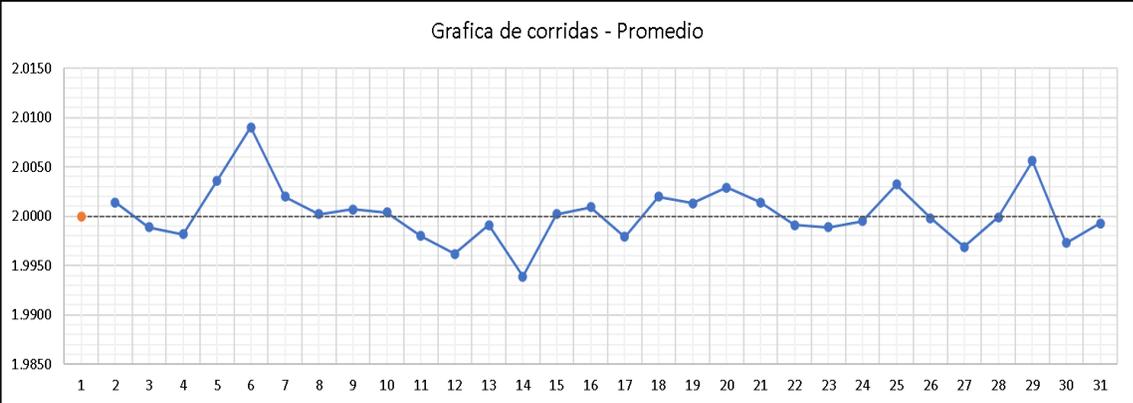
Noviembre 2020

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Apéndice 4. Grafica de Rachas - Corridas promedio



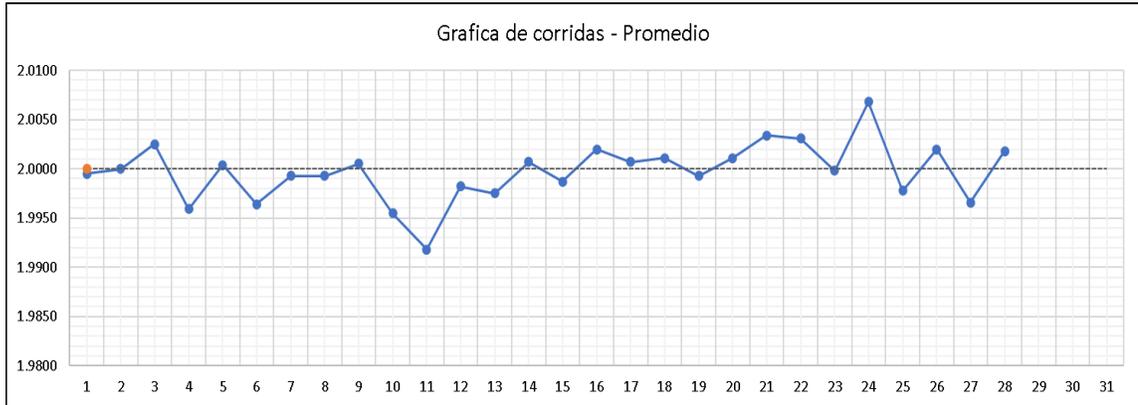
Diciembre 2020



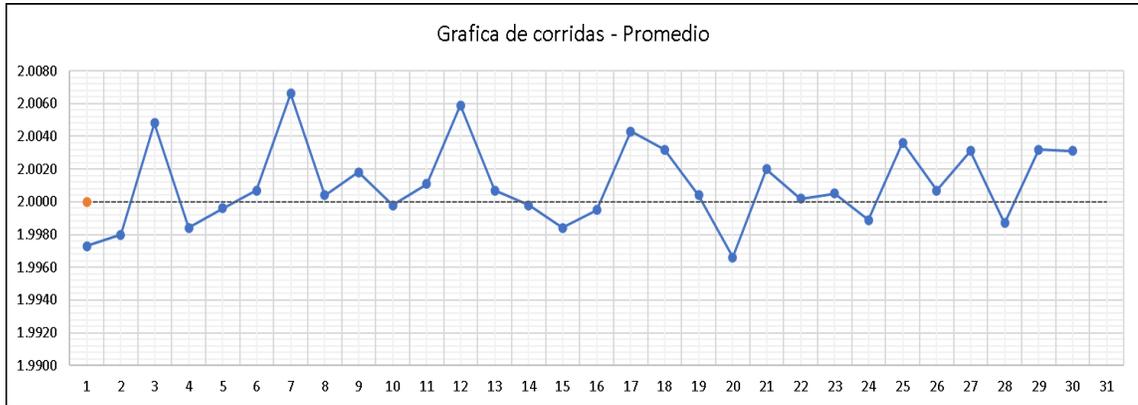
Enero 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Apéndice 4. Grafica de Rachas - Corridas promedio



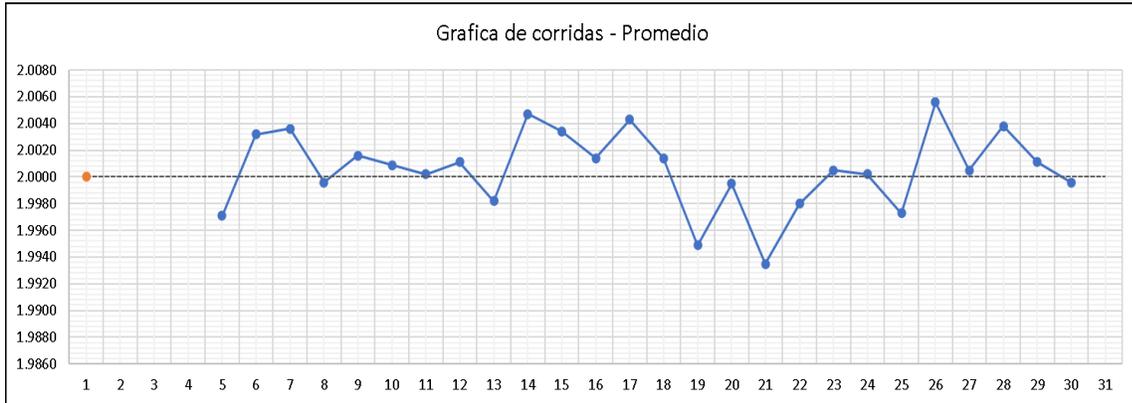
Febrero 2021



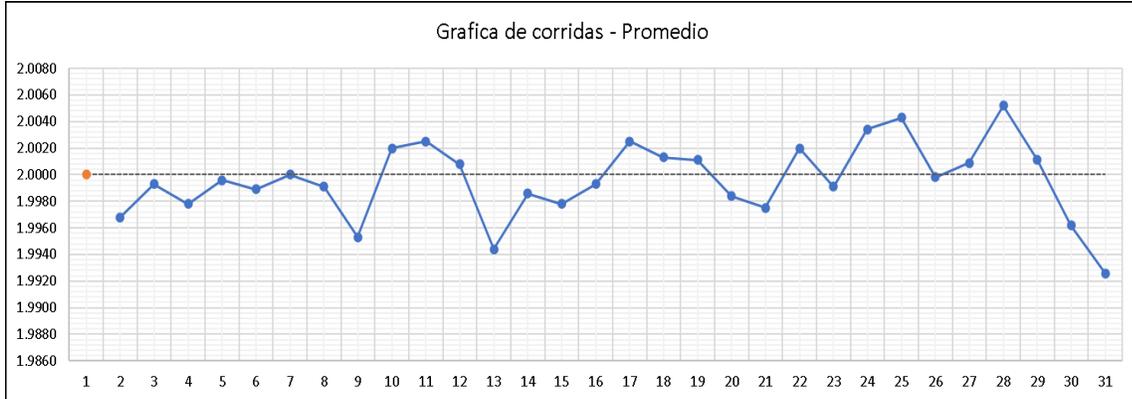
Marzo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

(Continuación) Apéndice 4. Grafica de Rachas - Corridas promedio



Abril 2021



Mayo 2021

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del estudio, realizado con Minitab 19

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de datos para los factores de gráficos de Shewhart

TABLA B Factores para calcular líneas centrales y límites de control 3σ para gráficas de \bar{X} , s y R

OBSERVACIONES EN LA MUESTRA, n	TABLA DE PROMEDIOS			TABLA DE DESVIACIONES ESTÁNDAR					TABLA DE RANGOS					
	FACTORES PARA LÍMITES DE CONTROL			FACTOR PARA LÍNEA CENTRAL	FACTORES PARA LÍMITES DE CONTROL				FACTOR PARA LÍNEA CENTRAL	FACTORES PARA LÍMITES DE CONTROL				
	A	A_2	A_3	C_4	B_3	B_4	B_5	B_6	d_2	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	0	3.267	0	2.606	1.128	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	0	2.568	0	2.276	1.693	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	0	2.266	0	2.088	2.059	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	0	2.089	0	1.964	2.326	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585

Copyright ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428.

Fuente: Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. México: octava edición. Pearson Prentice-Hall. p.514

Anexo 2. Tabla de datos para distribución Z

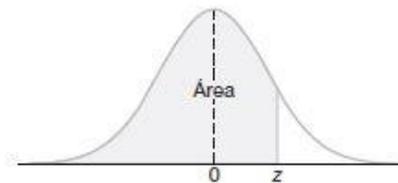


Tabla A.3 Áreas bajo la curva normal

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
-3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
-3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
-3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
-3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
-2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
-0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
-0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641

Fuente: Walpole, R., Myers, R., Myers, S. y Yeng, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: novena edición. Pearson Prentice-Hall. p.735