



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**APLICACIÓN DEL CONTROL ESTADÍSTICO
DE PROCESOS (SPC) EN LA REVOLUCIÓN DE
LA INDUSTRIA 4.0**

Eloy Vázquez Yáñez

Tutora: María Elena Pérez Vázquez

Valladolid, 2024.

RESUMEN

Este proyecto aborda la importancia del Control Estadístico de Procesos (SPC) como herramienta fundamental para garantizar la calidad y la eficiencia en entornos de producción industrial. A medida que las empresas buscan mantenerse competitivas, la mejora continua y la optimización de procesos se han vuelto esenciales. El SPC, combinado con metodologías como Lean Manufacturing, ha demostrado ser efectivo en la eliminación de desperdicios y en la gestión de la variabilidad de los procesos. Sin embargo, con la llegada de la Industria 4.0, avances en inteligencia artificial y la automatización, el SPC está evolucionando hacia métodos más autónomos y predictivos. Este proyecto desarrolla una aplicación práctica de SPC en Excel, que automatiza cálculos y facilita la toma de decisiones en tiempo real. Así, se ofrece una solución innovadora que permite a las empresas adaptarse a las transformaciones digitales, optimizando los procesos y anticipando posibles fallos con mayor eficacia.

PALABRAS CLAVE

Control Estadístico de Procesos (SPC), Lean Manufacturing, Industria 4.0, Mejora continua y Mantenimiento predictivo.

ABSTRACT

This project addresses the importance of Statistical Process Control (SPC) as a fundamental tool for ensuring quality and efficiency in industrial production environments. As companies seek to remain competitive, continuous improvement and process optimisation have become essential. SPC, combined with methodologies such as Lean Manufacturing, has proven to be effective in eliminating waste and managing process variability. However, with the advent of Industry 4.0, advances in artificial intelligence and automation, SPC is evolving towards more autonomous and predictive methods. This project develops a practical application of SPC in Excel, which automates calculations and facilitates real-time decision making. This provides an innovative solution that allows companies to adapt to digital transformations, optimising processes and anticipating potential failures more effectively.

KEYWORDS

Statistical Process Control (SPC), Lean Manufacturing, Industry 4.0, Continuous Improvement and Predictive Maintenance.

ÍNDICE

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
ABSTRACT	3
KEYWORDS	3
INTRODUCCIÓN	13
INTRODUCCIÓN AL PROYECTO	14
OBJETIVOS	14
AGRADECIMIENTOS	16
CAPITULO I: TPS-LEAN MANUFACTURING	17
1.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO I	18
1.2 OBJETIVOS DEL CAPÍTULO	18
1.3 CONTEXTUALIZACIÓN	19
1.4 ORIGEN DEL TPS	20
1.5 LA CASA DEL TOYOTA PRODUCTION SYSTEM (TPS)	22
1.6 DESARROLLO DEL CAPÍTULO I	23
1.6.1 HERRAMIENTAS LEAN	23
1.6.2 LA EXPANSIÓN DEL LEAN MANUFACTURING	27
1.7 ESTUDIO DE CASOS PRÁCTICOS.....	28
1.7.1 TOYOTA MOTOR CORPORATION	28
1.7.2 GENERAL ELECTRIC (GE)	28
1.7.3 BOEING	29
1.7.4 AMAZON.....	29
1.8 BASES DEL TPS: EL MANTENIMIENTO	30
1.8.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO	30
1.8.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO	30
1.8.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	31
CAPITULO II: CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS (SPC)	33
2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO II	34

2.2 ORIGEN	34
2.3 CONCEPTO DE VARIABILIDAD DE PROCESOS	36
2.4 CAUSAS DE LA VARIACIÓN	36
2.4.1 CAUSAS COMUNES.....	37
2.4.2 CAUSAS ESPECIALES	38
2.5 PROCESOS	39
2.5.1 PROCESO ESTABLE	39
2.5.2 PROCESO INESTABLE.....	41
2.6 DEFINICIÓN DEL SPC	41
2.7 OBJETIVO DEL SPC	42
2.8 BASE ESTADÍSTICA DEL SPC	43
2.8.1 DISTRIBUCIÓN NORMAL	43
2.9 GRÁFICOS DE CONTROL	45
2.9.1 CONDICIONES DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL.....	46
2.9.2 TIPOS DE GRÁFICOS DE CONTROL:	46
2.10 CONSTRUCCIÓN DE LOS GRÁFICOS.....	49
2.10.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA	49
2.10.2 FRECUENCIA DEL MUESTREO.....	50
2.10.3 NÚMERO DE MUESTRAS	50
2.10.4 REGISTRO DE DATOS.....	50
2.11 FÓRMULAS DEL GRÁFICO (\bar{X} , R)	51
2.11.1 GRÁFICO \bar{X}	51
2.11.2 GRÁFICO R	51
2.12 APÉNDICE.....	52
2.13 SITUACIONES POSIBLES.....	52
2.13.1 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DE CONTROL	52
2.13.2 PAUTAS	53
2.13.3 TRAMAS/RACHAS.....	54
2.13.4 CICLOS.....	55
2.14 ACTUACIÓN SOBRE EL PROCESO	55
2.14.1 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DEL GRÁFICO DE RECORRIDO	55
2.14.2 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DEL GRÁFICO DE MEDIAS	56
2.14.3 PAUTAS O RACHAS, CAUSAS ESPECIALES.....	56

2.15 RECÁLCULO DE LOS LÍMITES DE CONTROL	57
2.15.1 RECÁLCULO EN EL GRÁFICO DE RECORRIDOS	57
2.15.2 RECÁLCULO EN EL GRÁFICO DE MEDIAS	58
2.16 CONCLUSIÓN DEL SPC	58
CAPÍTULO III: LA NUEVA PERSPECTIVA DEL SPC FRENTE A LA INDUSTRIA 4.0....	59
3.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO III	60
3.2 EVOLUCIÓN RECIENTE DEL SPC CLÁSICO	60
3.3 INDUSTRIA 4.0	62
3.4 ¿CÓMO VA A EVOLUCIONAR EL SPC EN LA ERA DE LA INDUSTRIA 4.0?	64
3.5 INTEGRACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL SPC.....	64
3.6 BENEFICIOS Y DESAFÍOS	66
3.7 FUTURO DEL SPC EN LA INDUSTRIA 4.0.....	67
3.8 LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL SPC.....	68
3.9 APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN SPC	68
3.9.1 REDES NEURONALES ARTIFICIALES	68
3.9.2 MACHINE LEARNING	69
3.9.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	69
3.10 ESTUDIOS DE CASOS DE IMPLEMENTACIÓN IA.....	70
3.10.1 TESLA	70
3.10.2 INTEL.....	71
3.11 IMPACTO Y MEJORAS DE LA IA RESPECTO AL SPC CLÁSICO	72
CAPÍTULO IV: MANUAL DE USUARIO	75
4.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO IV	76
4.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA	76
4.3 FORMATO DE NUESTRO DOCUMENTO .TXT	77
4.4 RESULTADOS DEL PROGRAMA	78
CAPÍTULO V: MANUAL DE PROGRAMADOR	81
5.1 DESARROLLO DE UN SPC	82
5.2 ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA.....	83
5.2.1 DATOS DE ENTRADA.....	83
5.2.2 CONSTANTES	84
5.2.3 RECORRIDO PASO 1.....	85
5.2.4 RECORRIDO PASO 2.....	88

5.2.5 RECORRIDO PASO 3.....	89
5.2.6 INFORME RECORRIDO	91
5.2.7 MEDIAS PASO 1.....	103
5.2.8 MEDIAS PASO 2.....	105
5.2.9 MEDIAS PASO 3.....	106
5.2.10 INFORME MEDIAS	108
5.2.11 OPERACIONES SEGUIMIENTO	112
5.2.12 PROGRAMACIÓN DE MACROS.....	116
CAPÍTULO VI: ESTUDIO ECONÓMICO Y ESTUDIO DE LOS ODS	121
6.1 GESTIÓN DEL PROYECTO	122
6.2 JERARQUÍA EN LA GESTIÓN DEL PROYECTO	122
6.3 FASES DEL PROYECTO	124
6.3.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CRÍTICAS.....	124
6.3.2 DISEÑO DEL SISTEMA SPC.....	124
6.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SPC	124
6.3.4 PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y PUESTA EN MARCHA	124
6.4 ESTUDIO ECONÓMICO.....	126
6.4.1 MARCO TEÓRICO.....	126
6.4.2 CÁLCULO DE COSTES	127
6.5 ESTUDIO DE LAS IMPLICACIONES SOCIALES.....	132
6.5.1 ODS 4: EDUCACIÓN DE CALIDAD	132
6.5.2 ODS 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO	132
6.5.3 ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA	133
6.5.4 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES.....	133
6.5.5 ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA.....	134
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES.....	135
ANEXOS	137
ANEXO 1	138
ANEXO 2	141
ANEXO 3	143
ANEXO 4	150
ANEXO 5	152
ANEXO 6	155

BIBLIOGRAFÍA.....	167
LIBROS Y ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	167
SITIOS WEB	168

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Taiichi Ohno, ingeniero industrial japonés. Obtenida en (Historia y Biografía, s.f.)	20
Figura 2: Toyota House Model. Adapted by (Liker, 2004).	22
Figura 3: La herramienta Just-in-Time. Obtenida en Prezi por Carolina Herrera.	24
Figura 4: ¿Qué es el Kaizen? (Imai, 1986)	25
Figura 5: Las 5s, (Ikeda, 2019).	25
Figura 6: Jidoka, "automatización con un toque humano". Visto en (Ingeniería de Calidad, s.f.).	26
Figura 7: Heijunka Box. Sacada de (Ferraro, 2016).	27
Figura 8: El destacado ingeniero Dr. Walter A. Shewhart, obtenido en Wikipedia.	34
Figura 9: Gen'ichi Taguchi, ingeniero y estadístico japonés. obtenido en Wikipedia.	35
Figura 10: Causas comunes en SPC. Elaboración propia.	37
Figura 11: Causas especiales en SPC. Elaboración propia.	39
Figura 12: Proceso estable. Obtenida en Wikipedia.	40
Figura 13: Esquema para actuar ante procesos no capaces. Elaboración propia.	41
Figura 14: Esquema para actuar ante procesos inestables. Elaboración propia.	41
Figura 15: Campana de Gauss. Obtenido en Wikipedia.	43
Figura 16: La media y desviación.	44
Figura 17: Ejemplo de Gráfico de Control. Elaboración propia.	45
Figura 18: Gráfico de medias y recorridos. Elaboración propia.	48
Figura 19: Ejemplo de puntos fuera de los límites. Elaboración propia.	53
Figura 20: Ejemplo de pauta en un SPC. Elaboración propia.	53
Figura 21: Ejemplo de Tendencia Creciente en un SPC. Elaboración propia.	54
Figura 22: Ejemplo de ciclos en un SPC. Elaboración propia.	55
Figura 23: Puntos por encima del límite superior del Gráfico de Recorridos. Elaboración propia.	56
Figura 24: Logo de Minitab. Obtenido en su página web.	61
Figura 25: Logo de JMP. Obtenido en su página web.	61
Figura 26: Logo de Spotfire. Obtenido en su página web.	61
Figura 27: La Industria 4.0. (Semerena, 2019).	62
Figura 28: Ejemplo de ANN. Obtenido en (Ramos, 2020)	69
Figura 29: Supervised Machine Learning Flow. Obtenido en (Mahesh, 2020).	69
Figura 30: Ejemplo de PCA. Obtenido en (Mahesh, 2020).	70
Figura 31: Logo de Tesla. Obtenido en su página web.	70
Figura 32: Smart Manufacturing Intel. Obtenido en (Intel, 2024).	72
Figura 33: Botón del usuario. Elaboración propia.	76
Figura 34: Datos de Entrada 1. Elaboración propia.	77
Figura 35: Tecla Tab. Obtenida en imágenes de Google.	77
Figura 36: Ejemplo de muestra. Elaboración propia.	77
Figura 37: Mensaje de error por superar el número de muestras. Elaboración propia.	78
Figura 38: Mensaje de error por tamaño de muestra incorrecto. Elaboración propia.	78
Figura 39: Mensaje de alerta por puntos fuera de los límites. Elaboración propia.	79
Figura 40: Hoja SPC. Elaboración propia.	79
Figura 41: SPC. Elaboración propia.	80
Figura 42: Tabla resumen de datos. Elaboración propia.	80
Figura 43: Mostrar pestaña de desarrollador. Elaboración propia.	82
Figura 44: Diseño para insertar datos. Elaboración propia.	83
Figura 45: Botón de insertar datos. Elaboración propia.	83
Figura 46: Asignar macro al botón. Elaboración propia.	84
Figura 47: Constantes. Elaboración propia.	85
Figura 48: Recorrido Paso 1. Elaboración propia.	85
Figura 49: Recorrido Paso 2. Elaboración propia.	89
Figura 50: Recorrido Paso 3. Elaboración Propia.	90
Figura 51: Gráfico de Control de Recorridos. Elaboración propia.	91

<i>Figura 52: Informe gráfico de Recorridos. Elaboración propia.</i>	91
<i>Figura 53: Medias Paso 1. Elaboración propia.</i>	103
<i>Figura 54: Medias Paso 2. Elaboración propia.</i>	106
<i>Figura 55: Medias Paso 3. Elaboración propia.</i>	107
<i>Figura 56: Gráfico de control de Medias. Elaboración propia.</i>	108
<i>Figura 57: Informe gráfico de Medias. Elaboración propia.</i>	108
<i>Figura 58: Operaciones seguimiento. Elaboración propia.</i>	112
<i>Figura 59: Esquema jerárquico del proyecto. Elaboración propia.</i>	123
<i>Figura 60: Fases del proyecto. Elaboración propia.</i>	125
<i>Figura 61: ODS n°4. Obtenido en la web de Naciones Unidas.</i>	132
<i>Figura 62: ODS n°8. Obtenido en la web de Naciones Unidas.</i>	133
<i>Figura 63: ODS n°9. Obtenido en la web de Naciones Unidas.</i>	133
<i>Figura 64: ODS n°12. Obtenido en la web de Naciones Unidas.</i>	134
<i>Figura 65: ODS n°13. Obtenido en la web de Naciones Unidas.</i>	134

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Constantes fórmulas SPC. Elaboración propia.</i>	52
<i>Tabla 2: Total de días laborables del proyecto. Elaboración propia.</i>	127
<i>Tabla 3: Sueldos de cada trabajador del proyecto. Elaboración propia.</i>	127
<i>Tabla 4: Total días laborables en un año bisiesto. Elaboración propia.</i>	128
<i>Tabla 5: Coste total mano de obre. Elaboración propia.</i>	129
<i>Tabla 6: Coste por hora de cada componente. Elaboración propia.</i>	130
<i>Tabla 7: Coste total del equipo utilizado. Elaboración propia.</i>	130
<i>Tabla 8: Coste total del material empleado. Elaboración propia.</i>	131
<i>Tabla 9: Coste total del estudio. Elaboración propia.</i>	131

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

En el entorno actual del mundo industrial, la eficiencia y la mejora continua son factores esenciales para mantener la competitividad de las empresas. Durante mi formación universitaria, pude observar y analizar la importancia del Control Estadístico de Procesos (SPC) como una herramienta fundamental para garantizar la calidad de los productos y optimizar los procesos de producción. Motivado por la relevancia de estos temas y el creciente interés en conocer las técnicas avanzadas de análisis de datos que integra el SPC, decidí centrar mi trabajo fin de grado en el desarrollo de una aplicación SPC que aproveche tanto los métodos tradicionales como las nuevas oportunidades que brinda la Industria 4.0.

La motivación detrás de este trabajo surge de la necesidad de mejorar los métodos actuales de control de calidad en un contexto de transformación digital. A lo largo de mi formación académica, he tenido la oportunidad de profundizar en metodologías como Lean Manufacturing y el SPC clásico, que han demostrado ser efectivos en la eliminación de desperdicios y la optimización de recursos. Sin embargo, con la aparición de la Industria 4.0 y con ella la aparición de avances en inteligencia artificial y aprendizaje automático, el futuro del SPC parece encaminado a una evolución significativa que permita no solo prever defectos o problemas, sino también optimizar los procesos en tiempo real y de manera autónoma. Este panorama representa una oportunidad emocionante para contribuir al desarrollo de herramientas que permitan a las empresas adaptarse a estos cambios tecnológicos.

OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden alcanzar en el presente proyecto son los siguientes:

- Investigar cómo se integran el Lean Manufacturing y el Control Estadístico de Procesos, y cómo estas metodologías pueden combinarse eficazmente para mejorar la calidad y la eficiencia en entornos de producción.
- Analizar los fundamentos y técnicas clave del SPC clásico, con énfasis en aquellas que ofrecen el mayor potencial para la mejora continua y el control de calidad en procesos industriales.
- Analizar las perspectivas futuras del SPC, explorando cómo las tecnologías emergentes están redefiniendo su aplicación. Además, identificar cómo el SPC evolucionará hacia métodos más autónomos y predictivos, que permitirán no solo el monitoreo continuo de los procesos, sino también la

anticipación de posibles fallos y la optimización en tiempo real de las operaciones industriales.

- El desarrollo de una solución práctica en Excel, utilizando Visual Basic for Applications (VBA), que permita la automatización de los cálculos y la visualización gráfica de los resultados de SPC. Esta herramienta será intuitiva, sencilla y capaz de integrar datos provenientes de diversas fuentes para facilitar la toma de decisiones en tiempo real.
- Proporcionar una guía completa para los usuarios que explique, de manera clara y concisa, cómo utilizar la aplicación desarrollada en Excel para implementar el SPC.
- Ofrecer un manual del programador que documente el proceso de desarrollo de la aplicación en VBA, proporcionando detalles sobre la lógica de programación, los algoritmos utilizados, las estructuras de datos, y las funciones implementadas.

En conjunto, estos objetivos buscan proporcionar una comprensión integral del Control Estadístico de Procesos en el contexto actual y futuro, desarrollar herramientas prácticas y accesibles para su aplicación efectiva en entornos industriales, y evaluar la viabilidad económica de su implementación. Con el fin de optimizar procesos industriales y preparar a las empresas para los desafíos tecnológicos del futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia, quienes siempre han creído en mí y me han alentado a seguir adelante en cada etapa de mi formación. A mis amigos, por su compañerismo y apoyo constante, siempre dispuestos a ofrecer su ayuda y motivación. A mi tutora, cuyo conocimiento, orientación y paciencia han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Y, finalmente, a todas las personas que de una forma u otra han contribuido a mi crecimiento personal y profesional durante este proceso.

CAPITULO I: TPS-LEAN

MANUFACTURING

1.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO I

Antes de adentrarnos a este primer capítulo nos tenemos que hacer la siguiente pregunta, ¿qué entendemos por Lean Manufacturing y Toyota Production System (TPS)¹?

Se tratan de dos metodologías de gestión que durante el transcurso de los años han transformado radicalmente la forma en que las empresas operan y producen bienes y servicios. Ambas metodologías fueron originadas en Japón², cuyos enfoques se centran en la eliminación de desperdicios, la mejora continua y la maximización del valor para el cliente.

En este capítulo, exploraremos en detalle el Lean Manufacturing y el TPS, daremos un poco de contexto en lo que consisten y el por qué aparecen estos enfoques, para así poder profundizar en el tema, conocer sus principios fundamentales, analizar su aplicación en diversas industrias y los beneficios que ofrecen para la eficiencia operativa y la calidad del producto. A través de ejemplos prácticos y casos de estudio, analizaremos cómo estas metodologías han revolucionado la gestión empresarial y han permitido a las organizaciones alcanzar niveles superiores de excelencia operativa y competitividad en el mercado.

1.2 OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

El objetivo principal de este capítulo es proporcionar una comprensión profunda del Lean Manufacturing y el Toyota Production System (TPS), dos metodologías de gestión fundamentales y actualmente muy presente en el ámbito empresarial moderno.

Para lograr este objetivo vamos a ponernos un poco en el contexto de como surgen estas metodologías y como son aplicadas hoy en día, exploraremos su origen y desarrollaremos en profundidad en que consiste el Lean Manufacturing y el TPS. Además, examinaremos las herramientas clave y más conocidas del Lean Manufacturing. También estudiaremos casos prácticos de empresas que han implementado estos procedimientos como son “Toyota Motor Corporation”, “General Electric (GE)”, “Boeing” y “Amazon”, para así comprender mejor la implementación y los beneficios del Lean y el TPS en la práctica.

¹ TPS hace referencia a las siglas de Toyota Production System, que a partir de ahora lo llamaremos así para abreviar.

² El contexto económico, cultural y la presión competitiva en Japón después de la Segunda Guerra Mundial proporcionaron el ambiente propicio para el surgimiento y desarrollo del Lean Manufacturing y del TPS.

Por último, nos iremos dirigiendo hacia el mantenimiento y conocemos la herramienta SPC, para ello vamos a abordar sus diferentes tipos y su importancia en la optimización de las operaciones empresariales.

El objetivo de este capítulo es simplemente proporcionar una visión completa y detallada del Lean Manufacturing y el Toyota Production System (TPS).

1.3 CONTEXTUALIZACIÓN

Para contextualizar el Lean Manufacturing y el Toyota Production System (TPS) nos tenemos que situar en un momento de cambio y evolución en el ámbito empresarial, especialmente en el ámbito de la fabricación. Ambas metodologías surgieron en un contexto en el que las empresas enfrentaban desafíos significativos, como la competencia global, la presión para reducir costos, los cambios en las preferencias del consumidor y la necesidad de mejorar la calidad y la eficiencia.

El Lean Manufacturing, influenciado por el TPS, se originó en Japón después de la Segunda Guerra Mundial. En un entorno de recursos limitados y una economía en recuperación, Toyota desarrolló un enfoque revolucionario para la fabricación que se centraba en eliminar el desperdicio y maximizar el valor para el cliente, del que más tarde hablaremos en detalle.

Por otro lado, el TPS se consolidó en la década de 1950 como un sistema de gestión integral que abordaba todos los aspectos de la fabricación, desde la producción hasta el mantenimiento y la logística. Este sistema se basó en los principios de eficiencia, flexibilidad y mejora continua, para más tarde convertirse en un modelo ejemplar para la industria manufacturera y posteriormente para todo tipo de industrias y empresas.

En un contexto empresarial cada vez más competitivo y dinámico³, el Lean Manufacturing y el TPS proporcionaron a las empresas herramientas y enfoques prácticos que antes no se veían, para así optimizar sus operaciones, reducir costos y mejorar la calidad del producto. A lo largo de los años, estas metodologías se han

³ En ese momento era cada vez más competitivo y dinámico debido a la globalización, los cambios en las preferencias del consumidor, los avances tecnológicos y la presión para reducir costos y mejorar la calidad. Esto creó la necesidad de enfoques innovadores y eficientes como el Lean Manufacturing y el TPS.

adaptado y aplicado en una variedad de industrias y sectores, demostrando su efectividad y relevancia en un mundo empresarial en constante cambio.

Esta contextualización establece el escenario para comprender la importancia y el impacto del Lean Manufacturing y el TPS en la era moderna, destacando su objetivo de la búsqueda de la excelencia operativa y superar la competencia en este mercado global tan dinámico y competitivo.

1.4 ORIGEN DEL TPS

Volviendo al origen del Lean Manufacturing, este tiene sus raíces profundamente entrelazadas con el TPS. Para comprender en detalle su origen y el desarrollo del Lean, es esencial explorar la historia del TPS y cómo sus principios se expandieron más allá de Toyota, lo que dio forma a una revolución en el ámbito empresarial.

La historia del TPS y, por ende, del Lean Manufacturing, están relacionadas por sus dos precursores fundamentales: Sakichi Toyoda y Taiichi Ohno. Estos visionarios japoneses, basados en su filosofía de que la clave para el éxito reside en el constante esfuerzo por mejorar y en la habilidad para ver lo que otros no ven⁴, aparecieron cada uno en su tiempo y aportando su visión desde sus respectivas áreas, sentarían las bases para dicha revolución y los aspectos principales que caracterizan a ambas metodologías hoy en día.



Figura 1: Taiichi Ohno, ingeniero industrial japonés. Obtenida en (Historia y Biografía, s.f.)

⁴ Sakichi Toyoda y Taiichi Ohno destacan la importancia del continuo proceso de mejora y la capacidad de observar más allá de lo evidente. Enfatizan que el éxito no es un destino final, sino más bien un viaje de mejora constante.

Sakichi Toyoda, el cuál apareció a fines del siglo XIX y principios del XX, dejó su huella que parece actualmente imborrable en la industria con su visión innovadora. Sus contribuciones parten de la industria textil⁵, especialmente con la invención del telar automático Toyoda, lo que en su día fue totalmente revolucionario en la automatización y eficiencia. Su filosofía partía de "*hacer más con menos*"⁶ y con ello sentó las bases para una mentalidad empresarial centrada en la eficiencia y la mejora continua de la que ya hemos hablado.

Sakichi Toyoda transmitiría sus enseñanzas a su hijo, Kiichiro Toyoda, quien más tarde fundó Toyota Motor Corporation en 1937. Pero no podemos olvidar el espíritu pionero de Sakichi como un cimiento clave para la cultura empresarial de Toyota, estableciendo las expectativas de eficiencia y excelencia que más tarde destacarían en el TPS.

Ya en la década de los 50, con Kiichiro Toyoda al mando, Taiichi Ohno se convirtió en una figura central en el desarrollo del TPS. Ohno, era ingeniero industrial y gerente de producción, y el mismo enfrentó desafíos económicos y de recursos similares a los de su predecesor, Sakichi Toyoda. Inspirado por la necesidad de superar estos desafíos, Ohno transformó la producción en Toyota.

Continuando con el desarrollo del TPS, Ohno desarrolló y perfeccionó dos pilares fundamentales: Justo a Tiempo (Just-In-Time) y Jidoka.

- El principio Justo a Tiempo, conocido como Just-in-Time, consiste en la producción de bienes solo en la cantidad necesaria, en el momento preciso, evitando así el exceso de inventarios y minimizando los costos asociados.
- La automatización con un toque humano, conocida como Jidoka, se centra en la detección temprana de problemas (lo antes posible), permitiendo la intervención humana para garantizar la máxima calidad y eficiencia en la producción.

Todas estas contribuciones de Ohno formarían estos principios fundamentales en un sistema que trata de abordar la eficiencia en cada aspecto de la producción. Lo que culminaría en la creación de lo que conocemos como Toyota Production System.

⁵ Sakichi Toyoda comenzó en la industria textil, ya que era uno de los sectores más importantes de la economía japonesa en aquellos momentos.

⁶ Se refiere a la capacidad de maximizar la eficiencia y la productividad utilizando la menor cantidad de recursos posible, como tiempo, materiales, espacio y mano de obra.

1.5 LA CASA DEL TOYOTA PRODUCTION SYSTEM (TPS)

Antes de comenzar el desarrollo en profundidad del Lean Manufacturing tenemos que conocer en lo que consiste la casa TPS. Se trata de una representación visual que, mediante el ejemplo práctico de una casa, nos muestra los principios y prácticas fundamentales de este sistema.

La estructura de la casa del TPS se compone de tres pilares principales: Justo a Tiempo (Just-In-Time), Jidoka (Automatización) y el respeto por las personas en Toyota, de los que hemos hablado un poco antes. Estos principios sostienen el techo de la Mejora Continua (Kaizen). Como hemos dicho antes, el Justo a Tiempo se refiere a la producción y entrega de productos exactamente en el momento en que son necesarios, minimizando así los inventarios y los desperdicios. Mientras que Jidoka se centra en la calidad mediante la detección y corrección automática de problemas en el proceso de fabricación, tratando de obtener productos de alta calidad desde el principio. Y aunque muchos libros no lo incorporen tenemos que hablar de los trabajadores y el respeto por todas las personas que forman la empresa, ya que la participación activa y la capacitación constante de los trabajadores son considerados las claves del TPS.

Estos pilares se apoyan en los cimientos de la casa, los cuales son el trabajo continuo y resolución de problemas, que son elementos esenciales para mantener la estabilidad y la mejora constante. La casa del TPS es una representación y un recordatorio visual de los principios clave que guían las operaciones de Toyota y otras empresas que buscan la excelencia operativa y la satisfacción del cliente.

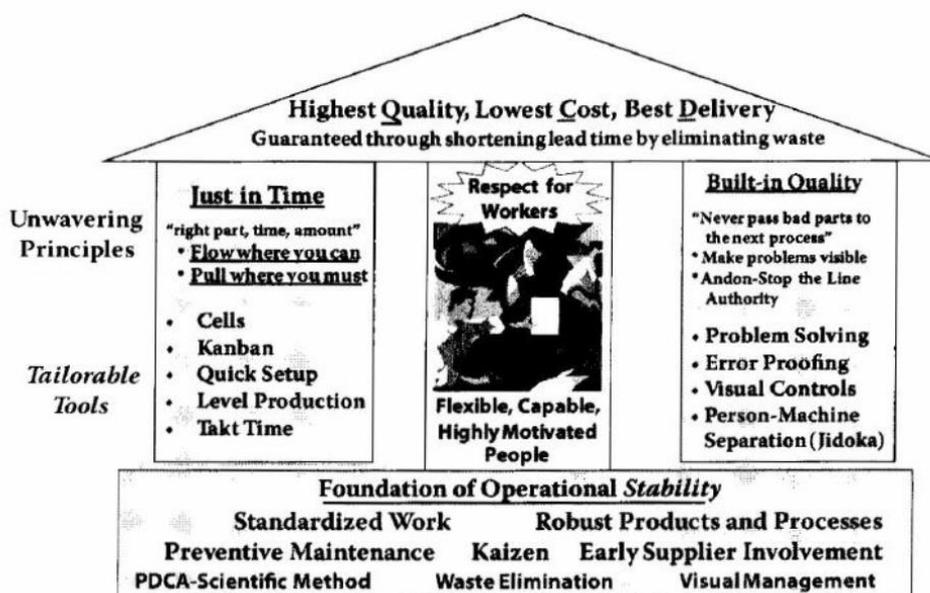


Figura 2: Toyota House Model. Adapted by (Liker, 2004).

1.6 DESARROLLO DEL CAPÍTULO I

El Lean Manufacturing, el cual también es conocido como producción sin desperdicios o producción ajustada, ya que representa un enfoque de gestión centrado en la mejora continua, dirigido a minimizar pérdidas y eliminar cualquier forma de desperdicio en los procesos productivos empresariales. Este modelo se sustenta en la premisa de que cualquier elemento que no aporte valor al producto final o servicio se considera un despilfarro.

La metodología Lean está compuesta por numerosas herramientas que se implementan en los procesos de las empresas para lograr un objetivo. Para implementar dichas herramientas de manera eficaz, resulta crucial establecer una estrategia de mejora continua. Esto implica la identificación de objetivos, el análisis del estado actual del proceso productivo, la evaluación de fortalezas y debilidades, así como la exploración del margen de mejora existente.

Es importante destacar que cada herramienta de Lean Manufacturing posee características y propósitos específicos, lo que significa que no es necesario adoptar todas las herramientas. Cada empresa tiene la responsabilidad de seleccionar aquellas que mejor se adapten a su proceso de producción. A medida que se desarrollan e implementan más herramientas, los beneficios empresariales aumentan significativamente, ya que estas se complementan mutuamente.

Una clave fundamental para el éxito del Lean Manufacturing radica en su dimensión humana, donde las personas se reconocen como el activo más valioso de la empresa. Esta estrategia requiere una colaboración y comunicación sustancial en todos los niveles de la organización. De esta manera, los trabajadores, al estar en constante contacto con el entorno laboral, son los primeros en identificar y resolver problemas, contribuyendo activamente a la mejora continua.

1.6.1 HERRAMIENTAS LEAN

Las herramientas Lean son instrumentos que ayudan a las empresas y organizaciones a implementar los principios Lean en sus procesos y operaciones diarias. Estas herramientas, desarrolladas y definidas a lo largo de décadas, proporcionan métodos para identificar y eliminar desperdicios, mejorar la eficiencia y promover una cultura de mejora continua en toda la organización.

En este apartado vamos a explorar algunas de las herramientas Lean más importantes y cómo pueden ser aplicadas en diversos contextos empresariales para lograr esos resultados que las empresas buscan. Desde el Just-in-Time hasta el Heijunka, cada herramienta tiene su propia función y beneficio único, contribuyendo al éxito general de la implementación Lean.

- **Just-in-Time (JIT)**⁷: El JIT es un sistema de producción que busca eliminar el desperdicio al producir solo lo necesario en el momento justo. Esto significa que los productos se fabrican y entregan justo a tiempo para ser utilizados en el proceso siguiente, evitando así la acumulación de inventarios y reduciendo los costos asociados con el almacenamiento. Esto se basa en el principio de "*hacer fluir el trabajo como agua*", como lo describen Womack y Jones en su libro "Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation" (Womack & Jones, 1996).



Figura 3: La herramienta Just-in-Time. Obtenida en Prezi por Carolina Herrera.

- **Kaizen**: Kaizen⁸ es el concepto de mejora continua, que implica la búsqueda constante de pequeñas mejoras en los procesos, productos y sistemas. Se basa en la participación de todos los empleados, fomentando la identificación de problemas y la implementación de soluciones de manera gradual y constante, (Imai, 1986).

⁷ JIT hace referencia a las siglas de Just-in-Time, una manera de abreviar y llamar a esta herramienta Lean.

⁸ "Kaizen" es una palabra japonesa que se compone de dos partes: "kai", que significa cambio, y "zen", que significa bueno o para mejorar. Juntas, "Kaizen" se traduce como "mejora continua".



Figura 4: ¿Qué es el Kaizen? (Imai, 1986)

- **5S:** Este método de organización y limpieza se compone de cinco palabras japonesas: Seiri (clasificación), Seiton (orden), Seiso (limpieza), Seiketsu (estandarización) y Shitsuke (disciplina). La implementación de los 5S ayuda a optimizar el entorno de trabajo, reducir el tiempo perdido en la búsqueda de herramientas o materiales, mejorar la seguridad y la eficiencia general.



Figura 5: Las 5s, (Ikeda, 2019).

- **SMED**⁹: El SMED es una técnica para reducir el tiempo de cambio de herramientas y configuraciones en la producción. Al minimizar este tiempo, se pueden realizar cambios más frecuentes y flexibles en la producción, lo que permite una respuesta más rápida a la demanda del cliente y una reducción del tiempo de inactividad.

⁹ Hace referencia al nombre inglés Single-Minute Exchange of Die.

- **Kanban:** Se trata de un sistema visual que se utiliza en gestión de inventarios, utiliza tarjetas, carteles o señales para controlar el proceso productivo. Permite mantener niveles óptimos de inventario, evitar excesos o faltantes, y facilitar la planificación y programación de la producción.
- **Jidoka:** Se refiere a la automatización con un toque humano. Se centra en la detección automática de problemas en el proceso de producción, permitiendo que las máquinas se detengan automáticamente cuando se detecta un problema. Esto permite una intervención humana inmediata para resolver el problema y garantizar la calidad del producto.

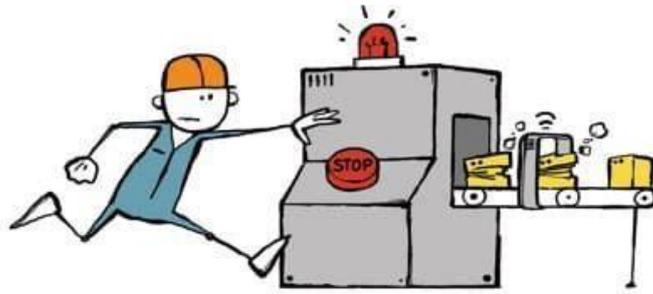


Figura 6: Jidoka, "automatización con un toque humano". Visto en (Ingeniería de Calidad, s.f.).

- **Poka-yoke:** Poka-yoke son dispositivos o mecanismos diseñados para prevenir errores o defectos en la producción, estos están muy implementado en líneas de montaje y procesos productivos. Estos pueden ser físicos, como guías o sensores, o procedimentales, como la verificación de pasos en un proceso.
- **Andon:** El sistema Andon es una herramienta de señalización utilizada para indicar problemas o anomalías en el proceso de producción. Permite a los trabajadores notificar rápidamente cualquier problema para que pueda ser abordado de manera inmediata, evitando la propagación de errores.
- **Heijunka:** Heijunka se refiere a la nivelación de la producción para mantener una carga de trabajo constante. Esto implica distribuir la producción de manera

uniforme a lo largo del tiempo para evitar picos y valles en la demanda, lo que facilita una programación más eficiente y reduce el desperdicio.

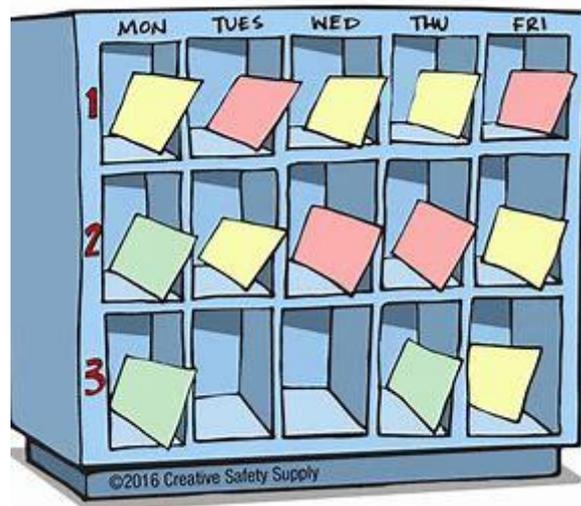


Figura 7: Heijunka Box. Sacada de (Ferraro, 2016).

Las herramientas más cruciales pueden variar según la empresa y su contexto. Todas estas herramientas abordan eficientemente la producción, la mejora continua y la eliminación de desperdicios, lo que contribuye significativamente al éxito de la implementación del Lean Manufacturing.

1.6.2 LA EXPANSIÓN DEL LEAN MANUFACTURING

El reconocimiento del éxito de Toyota en términos de eficiencia y calidad se amplificó a fines de la década de 1990 con la publicación del libro "La Máquina que Cambió el Mundo", (Womack, Jones, & Roos, 1990).

James Womack, Daniel Jones y Daniel Roos popularizaron los conceptos de eficiencia y eliminación de desperdicios, y acuñaron el término "Lean Manufacturing". Este libro destacó cómo Toyota había alcanzado niveles de excelencia operativa inigualables, convirtiendo los principios del TPS en la base del Lean Manufacturing.

El Lean Manufacturing se ha convertido en un enfoque global para mejorar la eficiencia y la calidad en diversas industrias. Organizaciones de todo el mundo han adoptado y adaptado los principios Lean para transformar sus procesos y

operaciones. La influencia del TPS en el desarrollo del Lean ha sido tan significativa que a menudo se utilizan ambos términos de manera intercambiable.

1.7 ESTUDIO DE CASOS PRÁCTICOS

En este capítulo hemos podido describir y analizar en detalle todo lo que implica y genera el Lean Manufacturing, pero a la hora de la práctica, ¿qué suponen estas dos metodologías para las empresas?

En este apartado, vamos a ver y explorar algunos de los casos más famosos que ilustran la implementación exitosa del Lean Manufacturing, vamos a destacar como emplean las herramientas Lean y las técnicas utilizadas por estas empresas líderes en diversos sectores industriales.

1.7.1 TOYOTA MOTOR CORPORATION

El caso más conocido, además de la empresa que empezó a implementar estas técnicas, Toyota es reconocida como la empresa pionera en la implementación del método Lean y el TPS.

Toyota ha sido un ejemplo destacado de cómo integrar cada uno de los principios Lean. Entre todas las herramientas Lean que emplea la empresa pionera del TPS destacan el Kanban, el Jidoka y el Kaizen en sus operaciones. Dentro de la empresa utilizan el Kanban para controlar el flujo de producción y minimizar los inventarios, lo que ha significado en una reducción significativa de los costos y un aumento en la eficiencia. Emplean el Jidoka para detectar de manera automática los problemas que surgen en la producción. Además, fomentan la mejora continua en todos los niveles de la organización aplicando la técnica Kaizen.

Esta información la podemos encontrar de manera más desarrollada en el libro *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* (Ohno, 1988), este libro nos proporciona una visión profunda del sistema de producción de Toyota.

1.7.2 GENERAL ELECTRIC (GE)

Otro ejemplo notable de una empresa que ha adoptado con éxito en sus operaciones el método Lean es General Electric (GE). Utilizando principios Lean y Six Sigma, GE se centra en la mejora de la calidad y la reducción de la variabilidad de sus operaciones, esto se traduce en una mayor satisfacción del cliente, aparte de obtener unos mejores resultados financieros.

Además, GE ha conseguido reducir los tiempos de inactividad, mejorar la toma de decisiones y una comunicación más clara y eficaz en toda la organización.

Uno de los libros que mejor expone cómo combinar los enfoques de Lean y Six Sigma¹⁰ es *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*, (George, 2003). Donde Michael George explora la integración de estas dos metodologías para lograr grandes resultados en la calidad y la eficiencia operativa.

1.7.3 BOEING

El principal fabricante de aviones comerciales y una de las empresas más grandes en la industria aeroespacial, Boeing, no dudó en la implementación de estrategias del Lean Manufacturing y ahora presume de ser líder en su sector. La compañía ha utilizado técnicas avanzadas de monitoreo, flujo de valor, optimización de procesos y análisis de datos para predecir y prevenir fallas en sus equipos, por lo que ha conseguido un enorme éxito, esto radica en la mejora de la eficiencia operativa, la reducción de los tiempos de producción y la entrega de productos de alta calidad a sus clientes.

Algunos de estos datos tan relevantes los podemos encontrar en el artículo *Applying Lean Six Sigma in the Aerospace Industry* de “The TQM Magazine”, (Joglekar & D.N, 2005). En este artículo se discute la aplicación Lean y el Six-Sigma en la industria aeroespacial, además se incluye el caso de Boeing.

1.7.4 AMAZON

Otro de los casos más reconocidos y que no podemos no hablar de esta empresa, es del gigante de Amazon.

Amazon ha aplicado el Lean Manufacturing en sus operaciones de logística y distribución, utilizando herramientas como el Just-In-Time para minimizar los inventarios y mejorar la eficiencia en la gestión de la cadena de suministro, utiliza sistemas de Kanban para gestionar el flujo de materiales y productos en sus almacenes y centros de distribución y la gestión de inventario, además de fomentar su cultura de mejora continua mediante la implementación de prácticas Kaizen en sus operaciones.

Su éxito se debe a la optimización de la cadena de suministro, la reducción de costos y la entrega rápida de productos a los clientes. Consiguiendo Amazon mantenerse competitivo en el mercado y ofrecer un servicio de alta calidad a sus clientes.

¹⁰ Seis Sigma es una metodología de mejora de procesos que busca reducir la variabilidad y los defectos, aproximadamente seis desviaciones estándar de la media.

1.8 BASES DEL TPS: EL MANTENIMIENTO

Hemos hablado y desarrollado en detalle en lo que consiste el Lean Manufacturing y el TPS, ahora vamos a ir dirigiendo a uno de los pilares fundamentales del Toyota Production System (TPS), el mantenimiento. Para ello vamos a seguir el libro “*Total Productive Maintenance*”, (Wireman, 2004).

La función del mantenimiento es garantizar la confiabilidad y la eficiencia de los equipos de producción. Dentro del mantenimiento conocemos 3 tipos que han sido aplicados en el TPS:

1.8.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento que se hace una vez ha aparecido el problema en la máquina. Lo hacen técnicos especialistas en reparación. Cuando se produce una avería, los técnicos especialistas en reparación son llamados, y estos se encargan de diagnosticar y solucionar el problema. El mantenimiento correctivo se basa en identificar la causa una vez ha fallado y posteriormente realizar las reparaciones necesarias para restaurar el funcionamiento normal del equipo.

El mantenimiento correctivo puede ser necesario en situaciones donde la causa de la falla no se pudo prever o detectar a tiempo mediante el mantenimiento preventivo o predictivo del que más tarde hablaremos, pero también puede ser necesario cuando se trata de problemas imprevistos o inesperados. Si bien el mantenimiento correctivo puede ser efectivo para solucionar problemas inmediatos, este puede ser muy costoso en términos de tiempo y recursos, ya que implica detener la producción y posiblemente reemplazar partes dañadas.

1.8.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El que se hace antes de que haya aparecido el problema, con datos estadísticos o datos del proveedor como pueden servir como ejemplo: cambio de lubricantes, herramientas, limpieza....

El mantenimiento preventivo es otro tipo de mantenimiento que se lleva a cabo antes de que ocurra un fallo o problema en un equipo o máquina. A diferencia del mantenimiento correctivo, que se activa en respuesta a una avería, el mantenimiento preventivo se encarga de prever para así evitar fallas y mantener el equipo en condiciones de funcionamiento en todo momento. Este tipo de mantenimiento lo hace directamente el operario de la máquina.

Con este tipo de mantenimiento, las empresas pueden reducir el riesgo de fallos inesperados, minimizar el tiempo de inactividad y prolongar la vida útil de los equipos o máquinas.

1.8.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Como último tipo de mantenimiento tenemos el mantenimiento predictivo que es que se encarga de aplicar técnicas estadísticas (SPC)¹¹. Su función es monitorear continuamente el estado de los equipos o las máquinas y predecir cuándo es probable que ocurra un fallo.

El objetivo principal del mantenimiento predictivo es detectar posibles problemas o fallos en los equipos antes de que ocurran, lo que permite tomar medidas correctivas antes de que se produzcan interrupciones no planificadas en la producción.

El mantenimiento predictivo es una herramienta poderosa que nos ayuda a reducir el tiempo de inactividad no planificado, minimizar los costos de reparación y así mismo garantizar la calidad nuestro producto final.

En el siguiente capítulo trataremos en detalle en lo que consiste el SPC, una herramienta que está presente actualmente en la mayoría de las grandes empresas.

¹¹ SPC hace referencia a las siglas de Control Estadístico de Procesos que es conocido en inglés como Statistical Process Control.

**CAPITULO II: CONTROL
ESTADÍSTICO DE
PROCESOS (SPC)**

2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO II

Como hemos tratado anteriormente, en un mundo tan dinámico como es el de la fabricación y la gestión empresarial, la calidad es un factor crítico para todas las empresas, esta influye directamente en la satisfacción del cliente y la competitividad de una compañía.

Hemos indagado en los principios y aplicaciones del Lean Manufacturing, pero en este contexto tenemos que hablar de una herramienta presente en todas las empresas hoy en día, el Control Estadístico de Procesos (SPC)¹².

El SPC aparece como una herramienta que busca garantizar y mejorar la calidad de los productos y servicios. El SPC se basa en el análisis estadístico de datos recopilados durante el proceso de producción, con el objetivo de identificar variaciones, prevenir defectos y optimizar la eficiencia operativa.

A lo largo de este capítulo, exploraremos en detalle el SPC, veremos en qué consiste, sus principios y fundamentos, como funciona y como lo aplican las grandes empresas, así como su importancia en la gestión de la calidad y la mejora continua. Ya que, durante los años, el SPC ha demostrado ser una herramienta poderosa y versátil para impulsar la excelencia en los procesos.

2.2 ORIGEN

El Control Estadístico de Procesos (SPC) tiene sus raíces en los años 30 del siglo XX, cuando el Dr. Walter A. Shewhart¹³, mientras trabajaba en la empresa Western Electric Company, desarrolló los fundamentos y las bases de esta herramienta.



Figura 8: El destacado ingeniero Dr. Walter A. Shewhart, obtenido en Wikipedia.

¹² Más conocido como SPC, por sus siglas en inglés, que significa "Statistical Process Control".

¹³ Dr. Walter A. Shewhart (1891–1967) fue un destacado ingeniero, físico y estadístico estadounidense, reconocido principalmente por sus contribuciones al campo del control de calidad y la estadística. Es considerado el padre del Control Estadístico de Procesos.

Por aquel entonces, los sistemas de calidad se centraban en el chequeo de productos una vez estaban acabados y la sustitución de aquellos con disconformidades o defectos. Sin embargo, Shewhart determinó que era prioritario reducir la variación en los datos de fabricación en torno a las especificaciones de diseño, promoviendo la idea de productos "*perfectos a la primera*" y un proceso continuo de ajuste para lograrlo. Además, estableció la distinción entre causas normales o aleatorias y causas especiales o asignables de defectos, una distinción que sigue siendo fundamental en el SPC y que veremos en apartados posteriores.

Shewhart también afirmó que el SPC determinaría cuáles de los defectos se considerarían normales, lo que permitiría predecir futuros escenarios del proceso.

La contribución de Shewhart revolucionó la percepción de la calidad en la industria, convirtiéndola en una realidad esencial para competir en un mercado cada vez más globalizado y competitivo.

Otro pionero en el campo del SPC fue el ingeniero y estadístico japonés Gen'ichi Taguchi¹⁴.



Figura 9: Gen'ichi Taguchi, ingeniero y estadístico japonés. obtenido en Wikipedia.

Taguchi introdujo una forma de evaluar económicamente el coste de las variaciones en las características medidas mediante su función de pérdida. Esta función asigna una pérdida a la variación respecto a la respuesta media esperada, lo que permitió una evaluación más precisa del impacto de las variaciones en la calidad del producto. Respaldo por Taguchi como explica en su libro "*Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and*

¹⁴ Gen'ichi Taguchi fue un ingeniero y estadístico japonés conocido por sus contribuciones significativas al campo de la calidad y la ingeniería de manufactura. Es especialmente conocido por el concepto de minimización del "costo de la pérdida".

Processes", (Taguchi, 1986), añadió una dimensión económica al SPC, enfatizando aún más su importancia en la mejora de la calidad y la reducción de costos en la producción.

2.3 CONCEPTO DE VARIABILIDAD DE PROCESOS

En la industria, cada producto que fabricamos es único, esto se debe a la influencia de múltiples factores que se dan en los procesos de manera aleatoria. Esto lo podemos traducir en que es prácticamente imposible lograr que dos productos sean exactamente iguales. Sin embargo, cuando la variabilidad aparece en características críticas que afectan la calidad del producto es algo que queremos minimizar. ¿Por qué? Porque queremos asegurarnos de que nuestros productos cumplan con los estándares de calidad y satisfagan las expectativas de nuestros clientes.

Como bien expresa el libro *"Control estadístico de los procesos (SPC)"*, (Vilar, 2005). Entendemos por **variación** los *cambios acaecidos en el valor de la característica media, siendo esta característica la respuesta de un proceso de terminado. La variación respecto un valor determinado, incluso dentro de las tolerancias especificadas, consideradas como las óptimas y que denominaremos valor objetivo, es el responsable de en términos empresariales de las pérdidas económicas debidas a la mala calidad del producto (ajustes, recuperaciones, reprocesado de materiales, incluso achatarramiento)*. Teniendo en cuenta esto, tenemos que aceptar la realidad de que no hay dos productos resultados de un mismo proceso que sean idénticos. La variación es parte de la respuesta de un proceso. Podemos lograr procesos con una variación mínima, pero nunca cero.

Es más que justificado que exista variación en las respuestas porque hay tantos factores que afectan a la respuesta de un subsistema y tantos subsistemas para obtener un producto final.

2.4 CAUSAS DE LA VARIACIÓN

Como hemos visto, la variación en los procesos de fabricación es una realidad inevitable. Debemos distinguir principalmente entre dos tipos de fuentes de variación: las denominadas *causas comunes* y *causas especiales*. Para abordar eficazmente las causas de variación en los procesos de fabricación, es importante reconocer que el tratamiento es diferente para cada una de ellas y comprender cada uno de ellos.

2.4.1 CAUSAS COMUNES

Las causas comunes, como su nombre nos indica, son aquellas que se presentan de manera habitual y predecible en los procesos industriales. Se originan a partir de una interacción de diversos factores que ocurren en los procesos, de manera individual, pueden tener un impacto insignificante pero que, en conjunto, contribuyen a la variación en la producción y que debemos tener en cuenta. Estas causas están presentes en todos los procesos de fabricación, sin excepción, y afectan de manera estable a las características del producto en el tiempo.

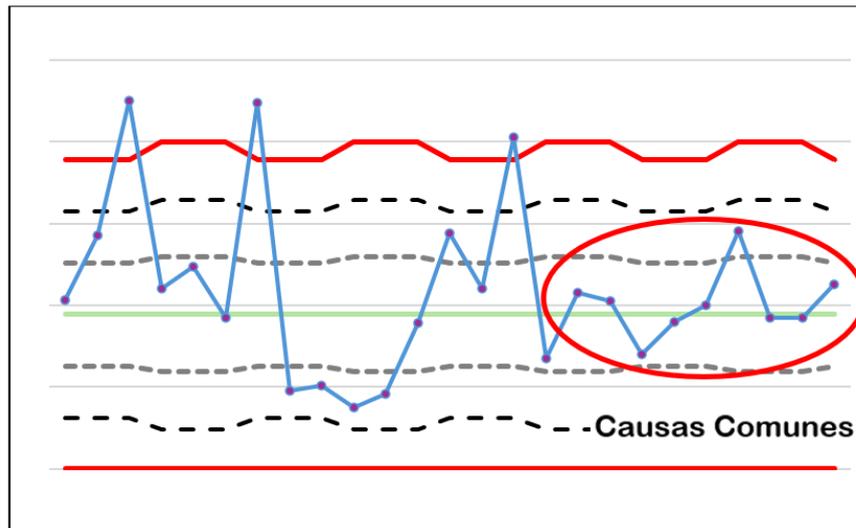


Figura 10: Causas comunes en SPC. Elaboración propia.

Una de las características distintivas de las causas comunes es su estabilidad y persistencia en el proceso. Esto significa que su efecto sobre el producto final es constante y predecible, lo que permite anticipar la calidad y homogeneidad del producto.

Debido a que las causas comunes son intrínsecas al proceso y no pueden ser eliminadas por completo, es fundamental adoptar un enfoque estratégico para su gestión. En lugar de intentar ajustes puntuales para corregir estas variaciones, se recomienda realizar cambios estructurales que procuren la reducción de estas causas a niveles mínimos.

Estas causas comunes suelen aparecer como una combinación de pequeñas variaciones en diferentes aspectos del proceso, entre las posibles razones de la aparición de estas causas se encuentran factores como:

- Vibraciones en máquinas.
- Pequeños cambios en materias primas.
- Desgaste de herramientas.
- Condiciones ambientales, como cambios de temperatura o humedad.

- Factores humanos.
- Cambios en la velocidad de producción o en la frecuencia de las operaciones.

Aunque estas variaciones pueden ser consideradas como parte inherente del proceso, es importante reconocer que su presencia puede afectar la calidad del producto final.

2.4.2 CAUSAS ESPECIALES

Las causas especiales, a diferencia de las comunes, no se manifiestan de manera aleatoria, sino que surgen de manera esporádica y puntual, tienen efectos notables en el proceso que afectan a la estabilidad de salida del producto.

Estas causas pueden originarse debido a sucesos específicos y aunque su aparición sea impredecible, mediante técnicas estadísticas es posible detectarlas anticipadamente y actuar sobre el potencial foco de manera localizada.

Es importante tener en cuenta que el proceso de medición de la característica no debe introducir ningún error adicional, ya que, de lo contrario, las medidas obtenidas no serán correctas y podrían afectar la interpretación de los datos obtenidos.

La aparición de estas causas habitualmente se debe a determinados sucesos puntuales como:

- Errores del operario.
- Ajustes incorrectos.
- Materia prima defectuosa.
- Fallos en el equipo o maquinaria.
- Cambios en el diseño del producto.
- Interrupciones en el suministro de energía.

inestable. En estos procesos, cualquier cambio significativo en la producción suele ser el resultado de modificaciones estructurales en el proceso.

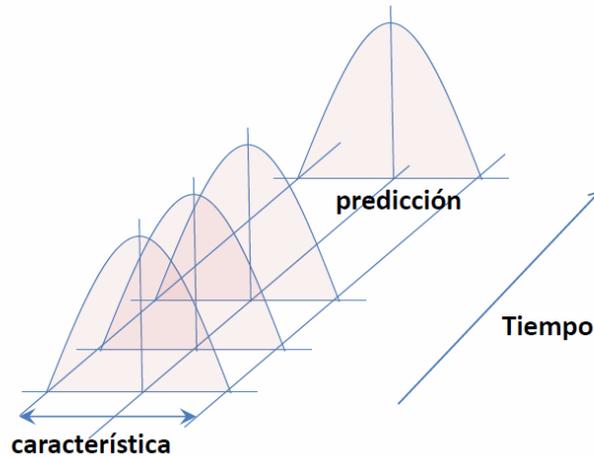


Figura 12: Proceso estable. Obtenida en Wikipedia.

El proceso estable es consistente y predecible en su desempeño a lo largo del tiempo, lo que permite realizar predicciones precisas sobre su comportamiento futuro.

Dentro de los procesos estables, se distinguen dos categorías principales: procesos capaces y procesos no capaces.

2.5.1.1 PROCESO CAPAZ

Un proceso capaz es aquel que puede producir productos que cumplen con las especificaciones del cliente de manera consistente y predecible. Esto significa que la distribución de datos de la característica medida se encuentra dentro de los límites de especificación y tolerancia establecidos para esa característica. En primer lugar, un proceso debe ser estable, como es lógico.

2.5.1.2 PROCESO NO CAPAZ

Por el contrario, un proceso no capaz es aquel en el que la distribución de datos de la característica medida se desvía significativamente de los límites de especificación establecidos. Esto indica que el proceso tiene una variabilidad excesiva que puede resultar en productos que no cumplen con las expectativas del cliente en términos de calidad.

En la realidad, es común encontrar procesos que no son capaces de cumplir con los estándares de calidad establecidos, y es necesario tomar medidas para mejorarlos. El esquema para actuar ante este tipo de procesos es el siguiente:



Figura 13: Esquema para actuar ante procesos no capaces. Elaboración propia.

2.5.2 PROCESO INESTABLE

Los procesos inestables son aquellos en los que se detecta la presencia de causas especiales de variación. Esto significa que están experimentando fluctuaciones impredecibles en sus resultados, lo que puede llevar a la producción de productos fuera de especificaciones o de baja calidad.

El esquema general para abordar los procesos inestables implica una serie de pasos estructurados destinados a identificar, analizar y corregir las causas de la inestabilidad en la producción, estos son:



Figura 14: Esquema para actuar ante procesos inestables. Elaboración propia.

El control estadístico de procesos es una herramienta clave para identificar y abordar la inestabilidad en los procesos industriales, lo que permite mejorar la calidad y la eficiencia de la producción. El SPC permite tomar medidas correctivas de manera oportuna al detectar errores o irregularidades en el proceso, lo que contribuye a mejorar la calidad y la eficiencia de la producción, lo que resulta en procesos estables y capaces que buscamos.

2.6 DEFINICIÓN DEL SPC

Es aquí donde entra en juego el Control Estadístico de Procesos (SPC). Esta herramienta nos permite establecer límites aceptables para las características críticas de nuestros productos. Estos límites nos indican hasta dónde podemos permitir que varíen estas características sin comprometer la calidad del producto.

Es un instrumento de gestión que permite, mediante la comparación del funcionamiento del proceso con unos límites establecidos estadísticamente, y la modificación de las condiciones del proceso, si es necesario, establecer y

garantizar la consecución de los objetivos deseados bajo la filosofía de la prevención, (Montgomery, 2012).

Con el SPC, podemos monitorear constantemente nuestro proceso de fabricación y detectar cualquier desviación que pueda surgir. Si los datos se salen de los límites establecidos, podemos tomar medidas correctivas para asegurarnos de que nuestro proceso siga produciendo productos de alta calidad de manera consistente.

El SPC nos sirve de gran ayuda para mantener la calidad en nuestros productos al controlar la variabilidad en nuestro proceso de fabricación.

2.7 OBJETIVO DEL SPC

El control estadístico de procesos (SPC) tiene como objetivo garantizar y mejorar la capacidad de cualquier proceso para producir dentro de las especificaciones establecidas y satisfacer las expectativas de calidad de los clientes. El SPC se enfoca en controlar y reducir la variabilidad de los procesos, lo que ayuda a evitar errores y mantener la producción uniforme. El SPC puede ser una herramienta poderosa para mejorar la calidad y la eficiencia de un proceso si se utiliza correctamente.

Es importante destacar que el SPC no es una solución instantánea ni una estrategia de "*disparar y olvidar*"¹⁵. Requiere un compromiso continuo con el mantenimiento y la atención por parte de los equipos involucrados. Sin embargo, los beneficios de una implementación SPC adecuada pueden ser significativos y valen la pena el esfuerzo invertido. El SPC puede conducir a una mejora continua y a resultados consistentes a lo largo del tiempo al monitorear constantemente el proceso y tomar medidas proactivas para corregir cualquier desviación, (Nielsen & Chong, 2023).

La implementación efectiva de SPC puede tener un efecto positivo en toda la organización, desde la reducción de costos asociados con defectos hasta la mejora de la satisfacción del cliente y la reputación de la marca. Por lo tanto, tomar medidas tempranas para implementar SPC puede ser crucial para abordar problemas de calidad y mantener la competitividad en el mercado.

¹⁵ El SPC implica un enfoque continuo para monitorear y mejorar los procesos. No se trata simplemente de implementar el SPC y luego ignorarlo, sino de mantener una vigilancia constante y realizar ajustes según sea necesario para garantizar la calidad del producto a lo largo del tiempo.

2.8 BASE ESTADÍSTICA DEL SPC

Es importante enfatizar que la mayoría de los procesos productivos siguen una distribución normal, lo que significa que la mayoría de los resultados se concentran alrededor de un valor central y se dispersan simétricamente hacia los extremos, siguiendo la forma de una campana de Gauss. Esto significa que existe una probabilidad de que ciertos valores caigan fuera de los límites establecidos superior e inferior, lo que se conoce como "probabilidad de defecto"¹⁶. Asegurando que la mayoría de nuestros productos se mantengan dentro de los límites de especificación y reduciendo así la probabilidad de defectos, el SPC nos ayuda a controlar y gestionar esta variabilidad. El libro "*Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*", (Devore, 2009), nos ofrece una introducción completa a la distribución normal y su aplicación en estadística

2.8.1 DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución normal es un modelo de probabilidad utilizado para describir una amplia variedad de fenómenos naturales, caracterizado por su función de densidad determinada por la media (μ) y la desviación estándar (S). La distribución normal se caracteriza por su forma de campana simétrica, conocida como *Campana de Gauss*¹⁷, donde la mayoría de los datos se concentran alrededor de la media y disminuyen a medida que nos alejamos de ella. Esto significa que la mayoría de las observaciones caen cerca de la media, mientras que las observaciones extremas son menos probables.

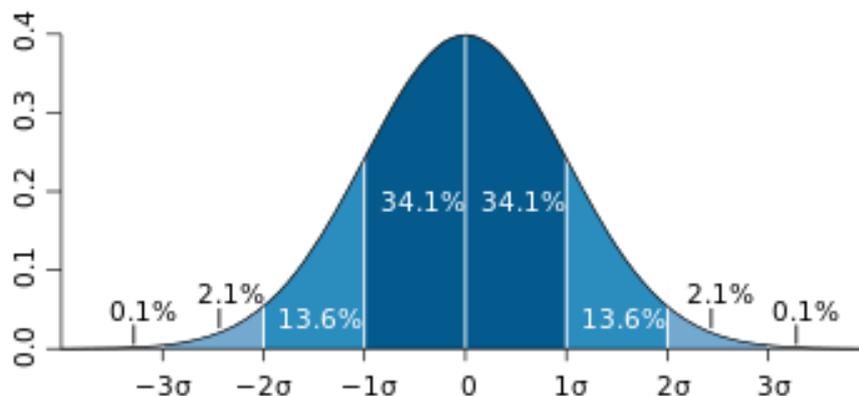


Figura 15: Campana de Gauss. Obtenido en Wikipedia.

¹⁶ Se refiere a la posibilidad de que ocurra un defecto en un producto o en un proceso. Es una medida cuantitativa que indica la proporción o la probabilidad de que una unidad de producto, una parte o un proceso no cumpla con los estándares de calidad especificados.

¹⁷ La función de densidad de probabilidad de la distribución normal suele conocerse como la «Campana de Gauss».

- **Media:** La media, representada por el símbolo μ o \bar{X} , es el valor promedio de un conjunto de datos. Es la suma de todos los valores dividida por el número total de observaciones. Proporciona una medida de la tendencia central de los datos, lo que nos permite comprender el comportamiento general del proceso.
- **Dispersión:** La dispersión, también conocida como variabilidad, es una medida de cuánto se desvían los valores individuales de la media. La dispersión puede ser evaluada utilizando diferentes medidas, como la desviación estándar (σ), que indica cuánto se alejan los datos de la media en promedio. Cuanto mayor sea la dispersión, mayor será la variabilidad en el proceso, lo que puede indicar una mayor incertidumbre en la calidad del producto final.

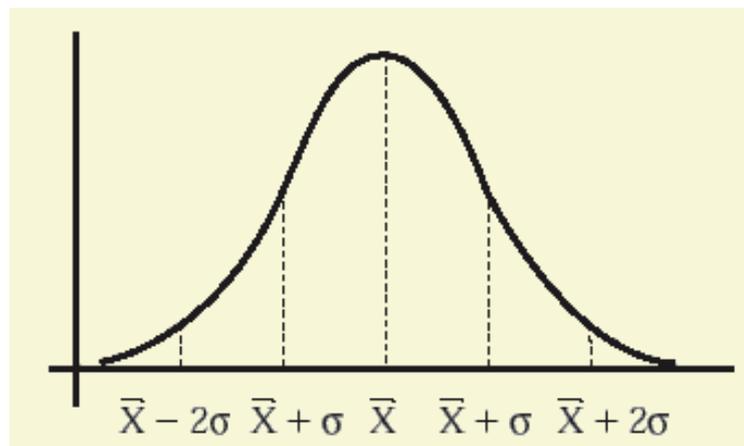


Figura 16: La media y desviación.

Para representar la dispersión en el Control Estadístico de Procesos (SPC), podemos utilizar medidas como el recorrido y la varianza:

- **Recorrido:** El recorrido es una medida simple de dispersión que indica la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en un conjunto de datos. Nos proporciona una idea general de cuánto se extienden los datos en el rango completo de observaciones. Sin embargo, el recorrido puede ser sensible a valores extremos y no proporciona información sobre la distribución de los datos en el medio.
- **Varianza:** La varianza es una medida de dispersión más precisa que determina la media de los cuadrados de las desviaciones de cada

valor en comparación con la media. En otras palabras, calcula la distancia entre los datos individuales y la media al cuadrado y luego calcula los valores promedio. La varianza mide la variabilidad de los datos alrededor de la media y es útil para comprender la dispersión general de los datos.

Una propiedad interesante es que en el intervalo $\bar{x} \pm 2S$ se pueden encontrar en torno al 75% de los datos, siempre y cuando éstos se ajusten a una distribución normal.

2.9 GRÁFICOS DE CONTROL

Conocemos los gráficos de control como una herramienta visual que muestra la variación en el tiempo de una característica de interés en un proceso industrial, junto con los límites estadísticos establecidos. Estos límites representan el rango esperado de variación si el proceso estuviera bajo control, estos límites establecidos se calculan utilizando datos históricos del proceso. La comparación entre los datos reales y los límites permite detectar de manera rápida y efectiva la presencia de causas especiales de variación, que como hemos visto anteriormente son aquellas que no son parte del funcionamiento normal del proceso. De esta manera podremos tomar medidas correctivas y mantener el proceso dentro de los límites especificados, garantizando así la calidad y la consistencia del producto final.

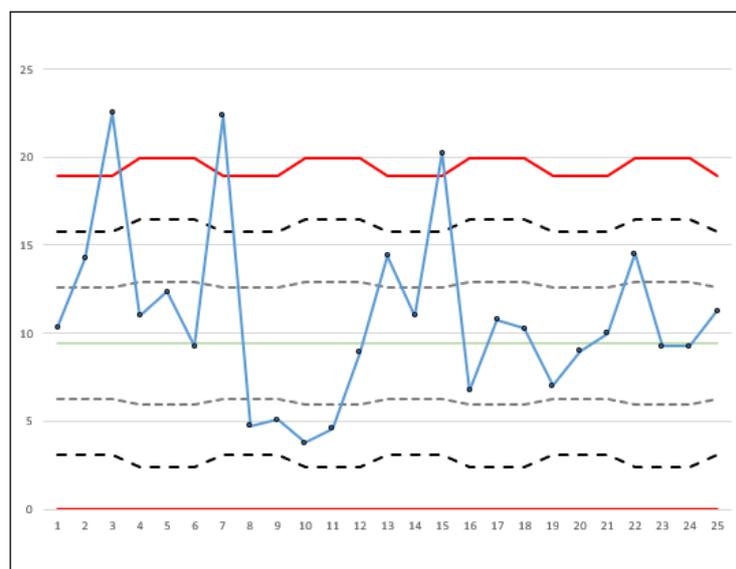


Figura 17: Ejemplo de Gráfico de Control. Elaboración propia.

Cuando el proceso está en control, los datos recopilados siguen una distribución normal. Este es el escenario típico en el que se utilizan los gráficos de control. Esto indica que el proceso está bajo control estadístico y que la variabilidad observada es principalmente el resultado de factores comunes. Al utilizar estos datos para establecer el estado de control estadístico, se definen los límites de control, que marcan la frontera entre las causas de variación, (Montgomery, 2012).

Las muestras dentro de estos límites son solo afectadas por causas comunes, mientras que las muestras fuera son afectadas por causas especiales de variación. Por lo tanto, si durante un período de tiempo ninguna muestra representativa supera los límites de control, ya sea por encima o por debajo, se considera que la característica de control está bajo control estadístico.

2.9.1 CONDICIONES DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL

Para realizar un gráfico de control, debemos tener en cuenta una serie de premisas para su correcta realización:

- Necesitamos comprender el proceso en su totalidad, incluyendo las especificaciones finales del producto y los ajustes necesarios en los parámetros del proceso.
- Debemos registrar todas las mediciones realizadas, junto con la fecha de recogida y otra información relevante, como el responsable de la toma de datos.
- Utilizando los datos recopilados, calcular los límites de control para cada característica seleccionada.
- Si se identifican puntos fuera de los límites de control, se deben tomar medidas correctivas inmediatas para investigar y abordar las causas subyacentes de las variaciones no deseadas.
- Incluso si no se observan puntos fuera de los límites de control, se debe prestar atención a los patrones o tendencias en los datos que podrían indicar problemas en el proceso.

2.9.2 TIPOS DE GRÁFICOS DE CONTROL:

Los gráficos de control se dividen en dos categorías fundamentales: “*gráficos de control por variables*” y “*gráficos de control por atributos*”.

2.9.2.1 GRÁFICOS DE CONTROL POR ATRIBUTOS

Vamos a hablar primero del Gráfico de Control de Procesos por Atributos, en nuestro contexto y en el contexto industrial, este tipo de gráficos de control es menos usado que el Gráfico de Control de Procesos por Variables, pero ofrecen una alternativa valiosa cuando la representación numérica de un proceso en los gráficos de control por variables no proporciona una comprensión clara de su desarrollo o ejecución.

En lugar de datos numéricos, estos gráficos se basan en la clasificación de las características del proceso como "conforme" o "disconforme"¹⁸. En situaciones donde la característica de control no es fácilmente mensurable, el proceso se reduce a un simple "*pasa-no pasa*"¹⁹, evaluado según las especificaciones requeridas y analizando su viabilidad económica.

Los gráficos de control por atributos son especialmente útiles para mejorar procesos con altos índices de unidades defectuosas. A diferencia de los gráficos por variables, estos no predicen eventos, sino que solo notifican fallos una vez que ocurren.

Este tipo de gráficos se clasifican según si controlan unidades defectuosas o defectos, con diferentes tipos de gráficos para cada caso. Por ejemplo, para unidades defectuosas, se utilizan gráficos de proporción de unidades defectuosas, porcentaje de unidades defectuosas y número de unidades defectuosas. Mientras que para defectos se emplean gráficos de número de defectos por unidad y número de defectos por muestra.

Debemos destacar que en los gráficos de proporción y número de defectos por unidad no es necesario que el tamaño de muestra sea constante, mientras que para los demás gráficos sí es necesario.

2.9.2.2 GRÁFICOS DE CONTROL POR VARIABLES

Por otro lado, tenemos el Gráfico de Control de Procesos por Variables, es una herramienta esencial ampliamente utilizada en el control estadístico de la calidad y en la que vamos a incidir más. Como hemos comentado antes se basa en la premisa de que un proceso sigue una distribución normal, lo que nos permite obtener muestras de datos que representan el comportamiento del proceso en un determinado intervalo de tiempo. Estas muestras se toman periódicamente y se

¹⁸ Una característica "conforme" indica que el producto o proceso es aceptable para su uso o comercialización. Por otro lado, una característica "disconforme" indica que el producto o proceso no cumple con los estándares requeridos y no es adecuado para su uso o comercialización.

¹⁹ Se trata de un criterio de aceptación utilizado en el control de calidad para determinar si un producto, componente o proceso cumple con ciertas especificaciones o estándares predefinidos.

calcula su media, la cual se sitúa dentro de unos límites de control establecidos en función de la media y la desviación estándar del proceso.

Si nos vamos a la práctica, estos datos se representan en un gráfico donde el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la media muestral. Si alguno de los puntos en el gráfico cae fuera de los límites de control establecidos, se considera que existe una causa asignable que afecta al proceso de manera estadísticamente significativa.

En este tipo de gráficos se busca un control más completo del proceso, por ello se recomienda utilizar tanto el gráfico de tendencia central (\bar{X}), conocido como el *gráfico de medias*, así como el gráfico de variabilidad (R o S). El primero nos proporciona información sobre la tendencia central de los datos, mientras que el segundo nos indica la variabilidad del proceso en función de la dispersión de las muestras.

En cuanto a los parámetros descriptivos que podemos utilizar para representar la tendencia central y la variabilidad son: media, moda, mediana, desviación típica, varianza, recorrido...

Los más habituales y en los que nos vamos a centrar son los “*Gráficos de medias y recorridos*”:

- El gráfico de medias (\bar{X}).
- El gráfico de recorridos (R).

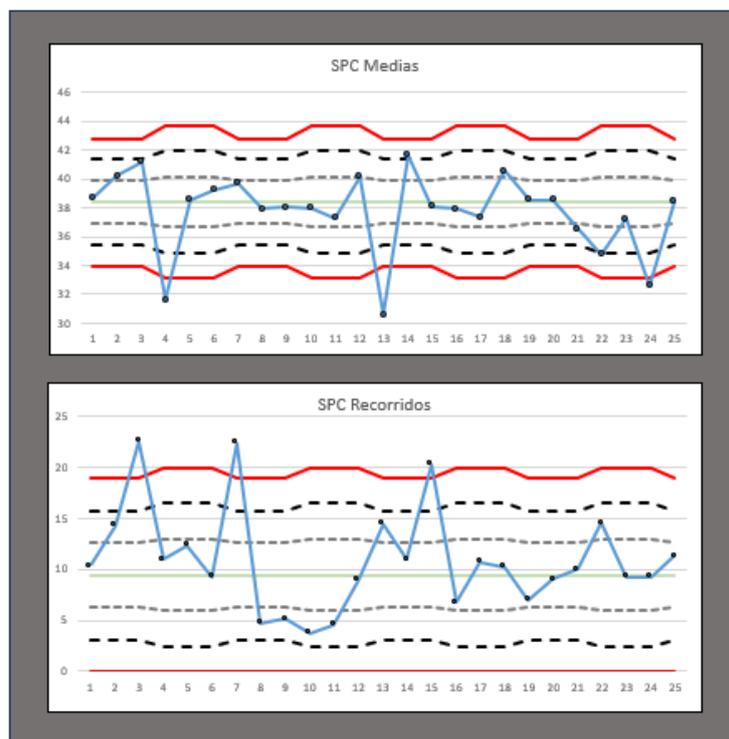


Figura 18: Gráfico de medias y recorridos. Elaboración propia.

De esta manera y como hemos recalcado, los gráficos de control por variables que vamos a estudiar se dividen en dos partes: el gráfico de medias (\bar{X}) y el gráfico de recorridos (R).

La evolución de las medias muestrales a lo largo del tiempo se muestra en el gráfico de medias, lo que permite detectar cualquier cambio en la tendencia central del proceso y evaluar su estabilidad para asegurarse de que la media permanezca dentro de los límites establecidos. Sin embargo, el gráfico de recorridos muestra las diferencias entre los valores máximo y mínimo de cada muestra, lo que nos da una idea de la variabilidad del proceso. Esta representación ayuda a evaluar la consistencia y uniformidad en la variabilidad del proceso a lo largo del tiempo y ayuda a identificar cambios en la dispersión de los datos.

Ambos gráficos son complementarios y proporcionan una visión completa de la estabilidad y el desempeño del proceso. En estos gráficos, la comparación no se efectúa con medias individuales, sino con medias muestrales de la característica para muestras de tamaños reducidos.

La principal ventaja de usar muestras de pequeño tamaño en lugar de medidas individuales es que, en lugar de analizar cada medida por separado, es más probable encontrar un cambio (causa especial) en el proceso al usar estas primeras. Por lo tanto, podemos afirmar que este método es más sensible a las anomalías.

Además, siguiendo con lo que se mencionó anteriormente, en este tipo de gráficos se representan en cada punto de control la media \bar{X} (media de las medias) y el Recorrido R de muestras de tamaño reducido, para luego calcular la variabilidad mediante el Recorrido Medio de las muestras.

2.10 CONSTRUCCIÓN DE LOS GRÁFICOS

En el siguiente apartado vamos a analizar cómo se construyen los Gráficos de control. Antes de comenzar la construcción de los gráficos de control, es crucial establecer una serie de parámetros clave. Estos componentes proporcionarán la base sólida necesaria para un monitoreo efectivo del proceso y la identificación temprana de cualquier desviación significativa.

2.10.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Como mencionamos previamente, la recolección de muestras de gran tamaño puede dificultar la detección de anomalías en el producto, invalidar la estimación de la variabilidad de la población y aumentar los costos asociados con la recopilación de datos para la empresa. El tamaño de muestra puede variar entre 2 y 10, pero un tamaño de 2 podría tener poco valor estadístico y un tamaño de 10

puede ser demasiado costoso. Por lo tanto, se opta por seleccionar muestras de tamaño equilibrado, siendo 5 el más conveniente.

El tamaño de la muestra o subgrupo debe mantenerse constante, para garantizar la consistencia en la recolección de datos y facilitar la comparación entre las mediciones.

2.10.2 FRECUENCIA DEL MUESTREO

Inicialmente, se realiza un muestreo más frecuente, generalmente cada 15 a 30 minutos al inicio del estudio para capturar la variabilidad inicial del proceso. A medida que el proceso se estabiliza, la frecuencia de muestreo puede reducirse a una o dos horas para mantener un monitoreo efectivo sin sobrecargar los recursos.

2.10.3 NÚMERO DE MUESTRAS

Se recomienda recopilar al menos 25 muestras o más, cada una compuesta por 4 o 5 piezas, para pruebas de estabilidad, lo que equivale a un mínimo de 100 valores individuales.

Durante este estudio, se fabrican 5 unidades de producto en condiciones controladas (mismas herramientas, operario, turno, etc.) para garantizar que cualquier variación registrada sea principalmente atribuible a causas comunes. Para establecer los límites de control con confianza estadística y garantizar la representatividad de los datos.

De manera similar, en lo que respecta a la variabilidad, se debe establecer un intervalo de muestreo basado en la experiencia y el criterio práctico. Por lo tanto, es importante evitar intervalos de tiempo tan cortos que no permitan la detección de variaciones en el producto, así como intervalos demasiado largos que puedan hacer que las causas especiales pasen desapercibidas.

2.10.4 REGISTRO DE DATOS

La media está en la parte superior del gráfico y el recorrido está en la parte inferior. La escala horizontal representa el tiempo entre las tomas de muestras, mientras que la escala vertical representa los valores de las medias y los recorridos. La media de cada muestra y su recorrido se muestran en cada punto del gráfico, lo que proporciona una imagen clara del comportamiento del proceso a lo largo del tiempo.

2.11 FÓRMULAS DEL GRÁFICO (\bar{X} , R)

2.11.1 GRÁFICO \bar{X}

- Media:
$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$
- Línea Central:
$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \dots + \bar{X}_k}{k}$$
- Límite de Control Superior:
$$LSC_X = X + 3\sigma_X = X + A_2\bar{R}$$
- Límite de Control Inferior:
$$LIC_X = X - 3\sigma_X = X - A_2\bar{R}$$

n = tamaño de muestra

k = número de muestras

2.11.2 GRÁFICO R

- Recorrido:
$$R = X_{max} - X_{min}$$
- Línea central:
$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_k}{k}$$
- Límite de Control Superior:
$$LSC_R = D_4\bar{R}$$
- Límite de Control Inferior:
$$LIC_R = D_3\bar{R}$$

Nota: A_2 , D_3 y D_4 son constantes que están tabuladas²⁰.

2.12 APÉNDICE

n	A_2	A_3	B_3	B_4	E_2	E_3	D_3	D_4
2	1,880	2,659	0	3,267	2,660	3,760	0	3,267
3	1,023	1,954	0	2,568	1,772	3,385	0	2,574
4	0,729	1,628	0	2,266	1,457	3,256	0	2,282
5	0,577	1,427	0	2,089	1,290	3,191	0	2,114
6	0,483	1,287	0,030	1,970	1,184	3,153	0	2,004
7	0,419	1,182	0,118	1,882	1,109	3,129	0,076	1,924
8	0,373	1,099	0,185	1,815	1,054	3,109	0,136	1,864
9	0,337	1,032	0,239	1,761	1,010	3,095	0,184	1,816
10	0,308	0,975	0,284	1,716	0,075	3,084	0,223	1,777

Tabla 1: Constantes fórmulas SPC. Elaboración propia.

2.13 SITUACIONES POSIBLES

Hasta ahora, hemos asociado la presencia de puntos fuera de los límites de control con la existencia de causas de variación especial. Sin embargo, esta relación no siempre es tan directa, ya que ciertos patrones de comportamiento pueden sugerir la presencia de causas especiales sin necesariamente manifestarse en puntos más allá de los límites establecidos, incluso si no hay puntos que excedan los límites. Vamos a examinar las circunstancias potenciales que podrían conducir a razones especiales:

2.13.1 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DE CONTROL

Estos puntos son aquellos que están por encima o por debajo de los límites de control establecidos en el gráfico. Indican la presencia de causas especiales de variación en el proceso, lo que significa que algo inusual ha ocurrido que ha afectado la calidad o el rendimiento del proceso.

²⁰ Estar *tabulado* significa que los datos han sido organizados y presentados en una tabla o formato estructurado.

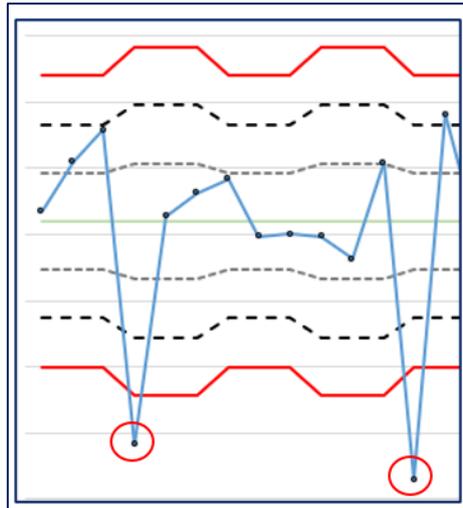


Figura 19: Ejemplo de puntos fuera de los límites. Elaboración propia.

2.13.2 PAUTAS

Las pautas son patrones repetitivos o secuencias inusuales de puntos en el gráfico de control. Estos puntos tienen una cierta dispersión de datos cada vez menor conforme, lo que hace que se vayan alejando de la línea central.

Estos patrones pueden indicar la presencia de causas especiales de variación que afectan al proceso. Alguno de los casos de pautas que vamos a estudiar son:

- 2 de 3 puntos consecutivos están a más de las dos desviaciones típicas.
- 4 de 5 puntos consecutivos están a más de una desviación típica.

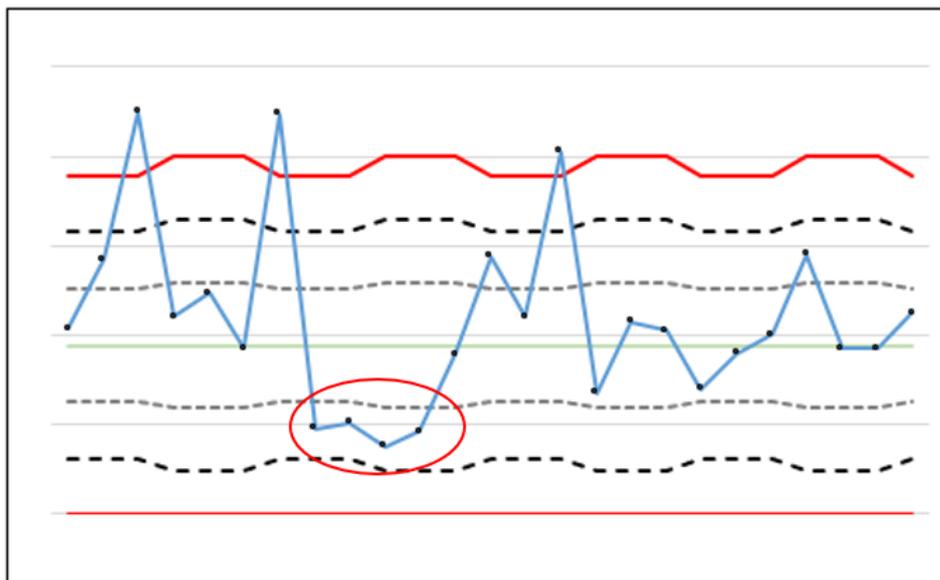


Figura 20: Ejemplo de pauta en un SPC. Elaboración propia.

2.13.3 TRAMAS/RACHAS

Las tramas, también conocidas como rachas, son secuencias de puntos consecutivos que muestran una dirección clara en el comportamiento de los datos a lo largo del tiempo. Se señala el último punto de la racha o trama y se traza una línea hasta el comienzo de la racha o trama para indicar el periodo de actuación de las causas de variación.

- Las rachas por encima o en línea ascendente, significan aumento de la variabilidad.
- Las rachas por debajo o la línea descendente, significan disminución de la variabilidad. En este caso es fundamental identificarlas para incorporarlas al proceso.

Estos patrones pueden indicar la presencia de causas especiales de variación que afectan al proceso. Las más habituales tienen que ver con la naturaleza del material de los útiles y máquinas, es normal que presenten ciertos desgastes con el tiempo. Éstas infieren un error constante enmarcado en primera instancia dentro de las causas comunes, pero que se pueden analizar de manera más meticulosa, pudiéndose englobar en determinadas ocasiones bajo causas especiales.

Los casos de tendencias que vamos a estudiar son:

- 7 puntos consecutivos, o más, todos al mismo lado del recorrido medio.
- 7 puntos consecutivos, o más, todos en línea ascendente o descendente.
- De 11 puntos consecutivos, 10 están al mismo lado del recorrido medio y el restante, antes del séptimo, al otro lado.

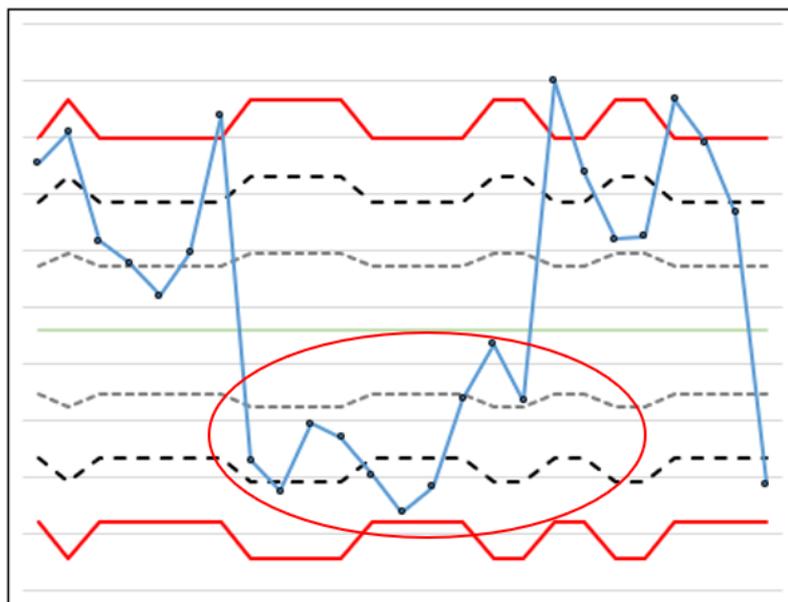


Figura 21: Ejemplo de Tendencia Creciente en un SPC. Elaboración propia.

2.13.4 CICLOS

Un caso menos habitual son los ciclos, se tratan de un caso en los gráficos de control en el que aparecen patrones repetitivos en forma de oscilaciones o fluctuaciones, las cuales se repiten a intervalos regulares.

Los cambios en las condiciones de fabricación, como los cambios en el personal, la temperatura, la humedad, la presión, el agotamiento del trabajador y las variaciones en el suministro de energía, son extremadamente resistentes a ciertos procesos, esto se puede traducir en comportamientos que entendemos como ciclos.



Figura 22: Ejemplo de ciclos en un SPC. Elaboración propia.

2.14 ACTUACIÓN SOBRE EL PROCESO

Cuando se dan este tipo de situaciones, debemos de tomar medidas al respecto. Es importante analizar si son causas beneficiosas para incorporarlas al proceso o al contrario si son causas perjudiciales, eliminarlas. Vamos a analizar cómo se debe actuar en el SPC y los motivos por los que se pueden dar:

2.14.1 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DEL GRÁFICO DE RECORRIDO

Cuando hay puntos del recorrido que están por encima del límite superior del gráfico de Recorridos (LSC_R), esto sugiere que podría haber piezas defectuosas en el lote en cuestión. En tales casos, se recomienda detener la producción y realizar una inspección exhaustiva del 100% de las piezas fabricadas durante ese período de muestreo. Es esencial no reanudar el trabajo hasta que se haya identificado y eliminado la causa de la variación.

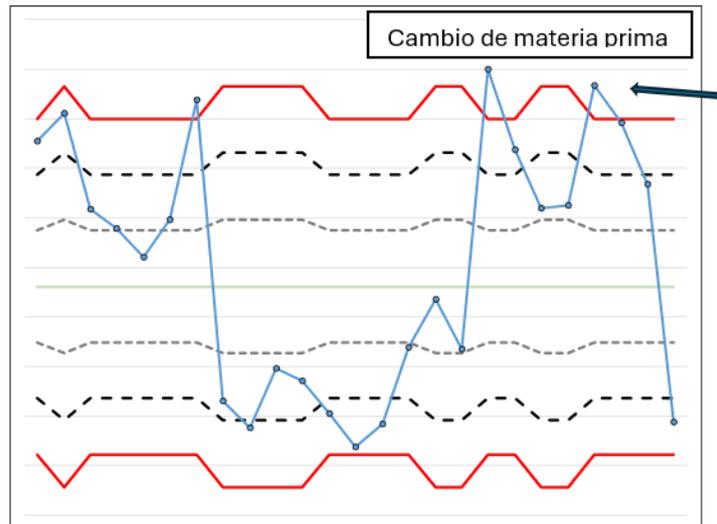


Figura 23: Puntos por encima del límite superior del Gráfico de Recorridos. Elaboración propia.

Sin embargo, si los puntos de recorrido están por debajo del límite inferior de control (LIC_R), la variabilidad del proceso está disminuida. En esta situación, se debe analizar el proceso para determinar la causa principal de esta reducción en la variabilidad y luego implementar las medidas correctivas necesarias para mantener una variabilidad controlada y consistente.

2.14.2 PUNTOS FUERA DE LOS LÍMITES DEL GRÁFICO DE MEDIAS

Cuando se detectan puntos del gráfico de medias que se encuentran fuera de los límites de control, esto sugiere que el proceso ha experimentado alguna variación, pero no necesariamente implica la presencia de piezas defectuosas en el lote. En este caso, se puede permitir que el proceso continúe mientras se realiza una verificación adicional de la producción durante ese período para investigar las causas potenciales de esta variación.

2.14.3 PAUTAS O RACHAS, CAUSAS ESPECIALES

Cuando se identifican pautas/rachas en un gráfico de control, la actuación es la misma, tanto en el gráfico de recorridos como el gráfico de medias.

Implica que el proceso ha experimentado una variación, que puede ser debido a desajustes de la maquinaria, factores ambientales o cambios de operarios. En esta situación, el proceso puede continuar operando, pero se debe realizar una inspección detallada de la producción durante ese período para investigar las causas que han generado esa variación.

Si estas causas resultan ser beneficiosas, como pueden ser mejoras en la calidad de la materia prima o una optimización de la maquinaria, se estudiarán para incorporarlas al proceso y mejorar su desempeño. Por otro lado, se tomarán medidas para eliminar las causas y restablecer la estabilidad del proceso si son negativas y afectan negativamente al proceso.

2.15 RECÁLCULO DE LOS LÍMITES DE CONTROL

Como último paso para construir los gráficos de control y una vez comprendidas las causas y corregidas, se recalculan los límites.

Los límites de control deben ser recalculados cada vez que se observen períodos fuera de control cuyas causas ya han sido detectadas y corregidas. Garantizando así que los límites de control se ajusten dinámicamente para reflejar las condiciones reales del proceso. Entrando en detalle:

2.15.1 RECÁLCULO EN EL GRÁFICO DE RECORRIDOS

- A. Cuando se detectan muestras que se sitúan por encima del Límite Superior de Control (LSC_R) en el gráfico de recorridos, se activa una señal de alerta indicando que el proceso ha salido de su estado de control. Se debe eliminar la muestra y recalcular los nuevos límites (LSC_R y LIC_R)²¹.

- B. Una vez eliminadas dichas muestras, se debe volver a analizar las muestras restantes respecto a lo nuevos límites de control (LSC_R y LIC_R). Se dan 2 casos posibles:
 - 1. Si no hubiera más puntos por encima del LSC_R , podemos pasar a estudiar el gráfico de medias.
 - 2. En caso contrario, si hubiera muestras por encima del nuevo límite LSC_R se deben eliminar y recalcular de nuevo los límites de control (LSC_R y LIC_R). En este caso volveríamos al paso B.

²¹ LSC_R y LIC_R son las siglas de los límites de control del gráfico de recorridos, tanto superior como inferior.

2.15.2 RECÁLCULO EN EL GRÁFICO DE MEDIAS

Una vez que el gráfico de recorridos se ha estabilizado y no muestra puntos fuera de los límites de control, el siguiente paso es examinar el gráfico de medias:

- A. De manera similar al procedimiento de recálculo de límites en el Gráfico de Recorridos, si existen muestras por encima y por debajo de los límites LSC_x y LIC_x , se debe eliminar la muestra y recalcularse nuevos LSC_x y LIC_x ²².

- B. Una vez eliminadas dichas muestras, se vuelve a analizar las muestras que quedan con respecto a los nuevos LSC_x/LIC_x . Se dan 2 casos posibles:
 1. Si no hubiera más puntos fuera de LSC_x/LIC_x , se pasa a estudiar la capacidad y el comportamiento del proceso.
 2. En caso contrario, si todavía hubiese puntos fuera de LSC_x/LIC_x , se vuelven a eliminar estas muestras y recalcularse los nuevos LSC_x/LIC_x . Volveríamos al paso B.

2.16 CONCLUSIÓN DEL SPC

Como hemos visto en este capítulo el Control Estadístico de Procesos (SPC) es más que una técnica de control de calidad, se trata de una filosofía implementada en todo tipo de contexto empresarial, en el que se incorporan una serie de aspectos importantes que van más allá de la simple gestión de la calidad.

Las empresas pueden implementar SPC para garantizar la calidad de sus productos mediante el monitoreo constante de la variabilidad del proceso. Esto aumenta la confianza del cliente y la reputación de la marca. Al identificar y resolver eficientemente las causas de la variabilidad, eliminando desperdicios y retrabajos, esta vigilancia sistemática también reduce los costos.

Además, el SPC fomenta una cultura de mejora continua, donde la toma de decisiones se basa en datos objetivos y análisis estadísticos, lo que permite a las empresas identificar oportunidades de optimización y mantener su competitividad en el mercado. Finalmente, esta herramienta ayuda a la empresa a cumplir con los estándares regulatorios y garantiza su sostenibilidad a largo plazo

²² LSC_x y LIC_x son las siglas de los límites de control del gráfico de medias, tanto superior como inferior.

CAPÍTULO III: LA
NUEVA PERSPECTIVA
DEL SPC FRENTE A LA
INDUSTRIA 4.0

3.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO III

Como hemos visto durante el anterior capítulo, el Control Estadístico de Procesos (SPC) ha sido una metodología fundamental en la producción desde su desarrollo en la década de los 30 por el Dr. Walter A. Shewhart. El SPC se ha aplicado tradicionalmente mediante el uso de gráficos de control y análisis de varianza para monitorear y controlar un proceso, asegurándose de que opere con una variabilidad mínima y dentro de sus límites de control. Sin embargo, la creciente complejidad de los procesos de producción y la introducción de nuevas tecnologías han hecho que sea necesario cambiar el SPC tradicional. El SPC debe adaptarse y aprovechar las nuevas herramientas y metodologías disponibles en la era de la Industria 4.0, donde la digitalización, la automatización y la interconectividad son la norma. Esta evolución no solo aumentará la eficiencia y la precisión del SPC, sino que también permitirá a las empresas mantener su competitividad en un mercado cada vez más exigente y dinámico.

3.2 EVOLUCIÓN RECIENTE DEL SPC CLÁSICO

¿Pero realmente el SPC ha ido evolucionando en los últimos años? La respuesta es sí. En la última década, el SPC ha evolucionado de manera significativa gracias a la introducción de nuevas herramientas estadísticas y software avanzado. Cada empresa desarrolla plataformas en función de las necesidades que quiere cubrir, alguno de los softwares más reconocidos a nivel estadístico son Minitab²³ y JMP²⁴, también está Spotfire²⁵ como ejemplo de una plataforma de análisis de datos utilizada en múltiples empresas, como por ejemplo Renault Valladolid.

Estas herramientas han llevado el análisis de datos a un nivel superior, ofreciendo capacidades de análisis y visualización avanzadas que facilitan la interpretación y el uso de datos. Por ejemplo, Minitab cuyo logo podemos ver en la Figura 24, ofrece gráficos de control personalizados, análisis de regresión y análisis de varianza. Estas herramientas ayudan a los ingenieros y analistas de calidad de cada empresa

²³ Minitab es un software estadístico desarrollado en la Universidad Estatal de Pensilvania en los años 70, utilizado principalmente para el análisis de datos y la mejora de procesos en diversas industrias. Se emplea ampliamente en SPC y metodologías Six Sigma.

²⁴ Por otro lado, el JMP es otro software de análisis estadístico desarrollado por SAS Institute, lanzado en 1989. Se utiliza principalmente para el análisis exploratorio de datos y la visualización interactiva en diversos campos.

²⁵ Mientras que Spotfire es un software de análisis de datos y visualización desarrollado por TIBCO Software, lanzado en 1996. Se utiliza principalmente para la exploración interactiva de datos, análisis predictivo y visualización en tiempo real en todo tipo de industrias.

encontrar rápidamente las causas fundamentales de los problemas de calidad y corregirlos.



Figura 24: Logo de Minitab. Obtenido en su página web.

Por el contrario, JMP, un software de análisis de datos creado por SAS²⁶, permite el análisis y la visualización dinámicos. Esto ayuda a los usuarios a comprender mejor los datos a través de gráficos interactivos y modelos predictivos. La integración de análisis de datos con técnicas de diseño de experimentos (DOE)²⁷ se facilita con JMP, lo que es crucial para optimizar procesos y mejorar la calidad del producto.



Figura 25: Logo de JMP. Obtenido en su página web.

También podemos hablar de Spotfire, una plataforma que he tenido la oportunidad de utilizar en mi estancia en Renault, se trata de una herramienta creada por TIBCO Software. Es muy popular en diversas industrias para la toma de decisiones basada en datos.



Figura 26: Logo de Spotfire. Obtenido en su página web.

²⁶ SAS son las siglas en inglés de Statistical Analysis System, en este caso se refieren al SAS Institute, fundado por Anthony J. Barr, James Goodnight, John Sall, y Jane Helwig en la Universidad Estatal de Carolina del Norte.

²⁷ DOE hace referencia a el Diseño de Experimentos por sus siglas en inglés, Design of Experiments.

3.3 INDUSTRIA 4.0

Para seguir introduciéndonos al capítulo, tenemos que hablar del concepto de Industria 4.0. Todo este desarrollo se debe a su aparición, la Industria 4.0, también conocida como la Cuarta Revolución Industrial²⁸. La incorporación de tecnologías avanzadas y la digitalización completa de la cadena de valor representa una transformación significativa en los procesos industriales que representa lo que llamamos hoy en día la Industria 4.0.



Figura 27: La Industria 4.0. (Semerena, 2019).

El núcleo de esta revolución es la unión de sistemas ciberfísicos, que combinan el mundo digital de la información y la comunicación con el mundo físico de la producción. A través del uso de sensores, actuadores y redes de comunicación sofisticadas, estos sistemas ciberfísicos permiten a las empresas y fábricas operar de manera autónoma, (Vaidya et al., 2021).

Una de las principales tecnologías que implementa la Industria 4.0 es el Internet de las Cosas (IoT)²⁹, este desarrollo conecta dispositivos y máquinas a Internet, permitiendo una comunicación y coordinación en tiempo real. A través de IoT, los equipos y sistemas pueden recopilar, intercambiar y analizar grandes volúmenes de datos, mejorando la eficiencia y la capacidad de respuesta. Vinculado a este concepto, tenemos que hablar del Big Data, una herramienta en auge que nos permite tomar decisiones a través de procesar y analizar grandes volúmenes de datos, con el objetivo de optimizar los procesos de producción, prever mantenimientos, reducir tiempos de inactividad, mejorar la calidad del producto...

²⁸ La Industria 4.0 se conoce como la Cuarta Revolución Industrial porque representa una transformación significativa en la forma en que se producen los bienes y servicios.

²⁹ IoT son las siglas de "Internet of Things" (Internet de las Cosas).

Otras tecnologías destacables que aparecen con la cuarta revolución son la inteligencia artificial (IA)³⁰ y la automatización (machine learning)³¹, se tratan de tecnologías en continuo desarrollo que nos permiten mejorar el rendimiento de producción sin intervención humana. Estas tecnologías se aplican en múltiples campos, pero algunas que podemos destacar son la automatización de tareas complejas, la optimización de procesos y la personalización de productos y servicios.

La Industria 4.0 depende también de la robótica avanzada, ya que estos robots colaborativos, ayudan a las empresas a aumentar la flexibilidad y la seguridad en las líneas de producción. Los robots pueden realizar tareas repetitivas y peligrosas, lo que permite a los trabajadores concentrarse en actividades de mayor valor añadido.

También está en pleno desarrollo la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR)³², se tratan de tecnologías que mediante simulaciones y visualizaciones en 3D mejoran la formación de los empleados, el mantenimiento y la reparación de equipos, y la planificación de la producción, entre otras tareas.

Por último, tenemos que hablar del concepto de nube, el cual permite el almacenamiento y procesamiento de datos a gran escala, facilitando el acceso y la colaboración remota. Esto se facilita gracias a las redes 5G, que proporcionan la conectividad necesaria para la transmisión rápida y segura de datos entre dispositivos y sistemas.

Como hemos podido analizar, la Industria 4.0 no solo cambia la fabricación, sino también los modelos de negocio, impulsando la producción bajo demanda y la personalización masiva. Las empresas pueden adaptar los productos y servicios a las necesidades particulares de los clientes, lo que crea nuevas oportunidades de mercado y aumenta la competitividad.

Todo esto lo podemos traducir en la creación de fábricas inteligentes y conectadas, donde las tecnologías avanzadas y la digitalización total permiten una producción más eficiente, flexible y personalizada. Esta transformación promete mejoras significativas en la productividad, la sostenibilidad y la capacidad de innovación, lo que permite a las empresas adaptarse rápidamente a las demandas del mercado y las expectativas de los consumidores.

³⁰ IA son las siglas de Inteligencia Artificial.

³¹ Machine Learning es lo que entendemos en español como aprendizaje automático, una rama de la inteligencia artificial.

³² Las siglas "AR" corresponden a "Realidad Aumentada" (Augmented Reality en inglés), mientras que "VR" corresponde a "Realidad Virtual" (Virtual Reality en inglés). Ambas son tecnologías que alteran la percepción del entorno físico.

3.4 ¿CÓMO VA A EVOLUCIONAR EL SPC EN LA ERA DE LA INDUSTRIA 4.0?

Con la aparición de la Industria 4.0 se ha transformado profundamente el Control Estadístico de Procesos, impulsándolo hacia una nueva era de eficiencia y precisión. Con la llegada de la Industria 4.0 y la aparición de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas, Big Data y la inteligencia artificial han revolucionado completamente esta herramienta, (Merlo et al., 2023).

Por un lado, los sensores y los dispositivos conectados por el IoT van a poder recopilar datos en tiempo real y analizarlos de manera instantánea en el SPC, lo que permite a las empresas una visibilidad del estado de la producción y posibilita una respuesta rápida a cualquier desviación.

El desarrollo del Big Data facilita el almacenamiento y el análisis de cantidades significativas de datos, lo que permite al SPC identificar patrones y tendencias con mayor precisión. Además, la incorporación de la inteligencia artificial y la automatización en el SPC ha mejorado esta metodología, favoreciendo la mejora continua de procesos en tiempo real y la predicción de fallos, sin la intervención humana.

Como resultado, el SPC ha cambiado de ser una herramienta reactiva basada en análisis históricos a una herramienta proactiva y predictiva que se adapta dinámicamente a las condiciones de producción en tiempo real, redefiniendo los estándares de calidad y eficiencia en la industria moderna.

3.5 INTEGRACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL SPC

A la hora de la práctica, si una empresa quisiera implementar el SPC en plena 4ª Revolución es crucial que integre nuevas tecnologías con los sistemas existentes. Esto incluye la instalación de sensores IoT en las máquinas y líneas de producción para recopilar datos en tiempo real, para seleccionar los tipos de sensores debemos tener en cuenta:

- Primero habrá que identificar las variables críticas del proceso que necesitan ser monitoreadas (temperatura, presión, humedad, vibraciones).
- Posteriormente tendremos que seleccionar los sensores IoT más adecuados para medir estas variables.
- Para después, instalar los sensores en los puntos críticos de la línea de producción.
- Por último, habrá que configurar los sensores para que transmitan datos en tiempo real a una plataforma central.

Además del desarrollo de software por parte de los informáticos para el uso de plataformas de Big Data. También podríamos elegir algunas de las ya existentes y de las que ya hemos hablado, si se adaptan bien a nuestras necesidades. Los pasos que debemos seguir:

- Configurar la infraestructura de almacenamiento para recibir y almacenar los datos enviados por los sensores IoT.
- Implementar herramientas de procesamiento de datos que puedan limpiar, filtrar y analizar los datos en tiempo real.
- Elegir software especializado en SPC que pueda integrarse con la plataforma de Big Data.

En cuanto a la utilización de Inteligencia Artificial para mejorar el SPC y con ello su automatización, las empresas deben seguir varios pasos clave:

- El primer paso es desarrollar modelos de inteligencia artificial que puedan analizar datos en tiempo real y predecir posibles fallos en la línea de producción o adaptar alguna IA emergente para esta herramienta. Se debería comenzar con la recopilación de datos históricos del proceso para entrenar estos modelos.
- Una vez desarrollada dicha IA, es importante adaptarla al software, de esta manera los modelos predictivos podrán analizar los datos en tiempo real y generar alertas y sugerencias para ajustes de proceso.
- El último paso es la implementación de la automatización de los ajustes de procesos que se derivan de las predicciones y recomendaciones de los modelos de IA.

De esta manera las empresas van a ver una clara mejora en sus líneas de producción, asegurando que se optimice de manera continua.

3.6 BENEFICIOS Y DESAFÍOS

La evolución de la Industria 4.0 ha provocado numerosos beneficios en la herramienta que estamos investigando, el SPC, (TOTVS, 2022). Algunos de los beneficios más evidentes son:

- El aumento de la calidad y eficiencia de los procesos de producción.
- La reducción de costos.
- Mayor flexibilidad.
- La capacidad para adaptarse rápidamente a los cambios en la demanda.

La 4^o revolución industrial ha mejorado la interconectividad y el monitoreo en tiempo real, permitiendo detectar y resolver problemas de inmediato, lo que reduce el desperdicio y mejora la consistencia del producto.

Sin embargo, también existen desafíos significativos o ciertos inconvenientes que dificultan su desarrollo. La implementación de nuevas tecnologías en sistemas viejos puede ser complicada y costosa. Las empresas deben asegurarse de que los nuevos sistemas y los existentes se comuniquen eficazmente.

Además, la capacitación del personal es esencial para garantizar una implementación exitosa. Las empresas deben contar en su personal con personas capacitadas para el desarrollo de los software y herramientas que hemos ido hablando a lo largo del capítulo. El personal debe estar capacitado no solo para el desarrollo, sino también para el uso de las nuevas tecnologías, con trabajadores preparados para la interpretación de los datos y la toma de decisiones basadas en esos datos.

Pero estas no solo son los únicos desafíos que se presentan, en las empresas también existen preocupaciones de seguridad y privacidad de los datos, aspectos críticos que las empresas deben gestionar de manera cuidadosa para evitar brechas de seguridad y asegurar el cumplimiento de las normativas.

A pesar de esto, el SPC ofrece un futuro mejorado para las empresas, permitiéndoles alcanzar nuevos niveles de eficiencia y competitividad en un mercado cada vez más exigente.

3.7 FUTURO DEL SPC EN LA INDUSTRIA 4.0

Dicho futuro marcará la evolución del SPC, en función de las tendencias emergentes que vayan apareciendo. La rápida evolución de tecnologías clave como la Inteligencia Artificial, el Internet de las Cosas y el desarrollo de análisis de datos afectarán el futuro del SPC en la Industria 4.0. Estas tendencias emergentes aumentarán la precisión de la SPC y cambiarán la forma en que se utiliza en los procesos industriales.

Se prevé que los sistemas de SPC incorporarán modelos predictivos más complejos y efectivos a medida que avanza la IA. Estos modelos no solo detectarán desviaciones en tiempo real, sino que también podrán prever problemas potenciales antes de que surjan, lo que permite acciones correctivas proactivas.

Al permitir la recolección de datos en tiempo real desde varios puntos del proceso, la mejora continua en la conectividad del Internet de las cosas será crucial. Esto permitirá un seguimiento más detallado y en tiempo real, lo que resultará en datos aún más precisos para el análisis estadístico.

Además, una interpretación más profunda y significativa de los datos recopilados será posible gracias a los avances en tecnologías de análisis de datos como el machine learning y el Big Data. Esto mejorará la capacidad de detectar patrones y anomalías y facilitará decisiones estratégicas basadas en datos.

3.8 LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL SPC

Tras lo comentado durante el anterior capítulo y la evolución acelerada de la tecnología en las últimas décadas, tenemos que hablar explícitamente de la Inteligencia Artificial (IA)³³, la nueva tecnología que ha emergido como una herramienta poderosa y transformadora en una variedad de sectores industriales. Si hablamos en particular, de la integración de la IA en el Control Estadístico de Procesos (SPC), esta ha revolucionado significativamente la manera en que se gestiona controla y mejora los procesos industriales. Ya son muchas las empresas que utilizan esta combinación, el desarrollo de IA con métodos tradicionales de SPC y control de gráficos. Esta combinación no solo ha aumentado la precisión y eficiencia en la detección y corrección de problemas, sino que también ha permitido predecir y prevenir fallos con una anticipación suficiente. A medida que las empresas han ido adoptando estas innovaciones, se están viendo mejoras considerables en la calidad del producto, la reducción de costes y el aumento de la competitividad en el mercado. Todo esto lo iremos analizando en los siguientes apartados, lo que está claro es que la IA está estableciendo nuevos estándares en la gestión de procesos.

3.9 APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN SPC

La IA en el SPC, ¿qué podemos esperar de esta combinación? Esta combinación permite a las empresas analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y predecir problemas antes de que ocurran, mejorando significativamente la capacidad de respuesta y la precisión en la toma de decisiones. Todas estas ventajas son las diversas IA que han sido desarrolladas y adaptadas para mejorar el SPC. Entre las más utilizadas se encuentran:

3.9.1 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Redes Neuronales Artificiales, también conocidas como las ANNs³⁴, se tratan de modelos computacionales inspirados en el cerebro humano, capaces de aprender y generalizar a partir de datos, (Ramos, 2020). En nuestro contenido, el SPC, se utilizan para reconocer patrones complejos en los datos de producción y calidad, permitiendo identificar anomalías y predecir fallos con alta precisión.

³³ IA, como lo denominaremos a partir de ahora, son las siglas de Inteligencia Artificial.

³⁴ Se llaman de esta manera por sus siglas en inglés, Artificial Neural Networks.

Por ejemplo, las ANNs pueden predecir defectos en piezas durante el proceso de fabricación, basándose en variaciones mínimas de los datos de sensores.

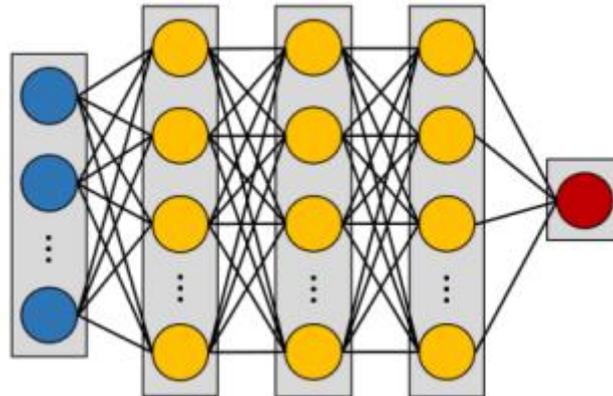


Figura 28: Ejemplo de ANN. Obtenido en (Ramos, 2020)

3.9.2 MACHINE LEARNING

Como hemos hablado en capítulos anteriores el Machine Learning utiliza algoritmos de aprendizaje automático que analizan datos históricos y actuales para desarrollar modelos predictivos que pueden prever problemas antes de que se manifiesten, (Mahesh, 2020). Llevándolo a un caso real, pueden predecir cuándo una línea de producción podría experimentar un fallo, permitiendo intervenciones preventivas que evitan tiempos de inactividad costosos.

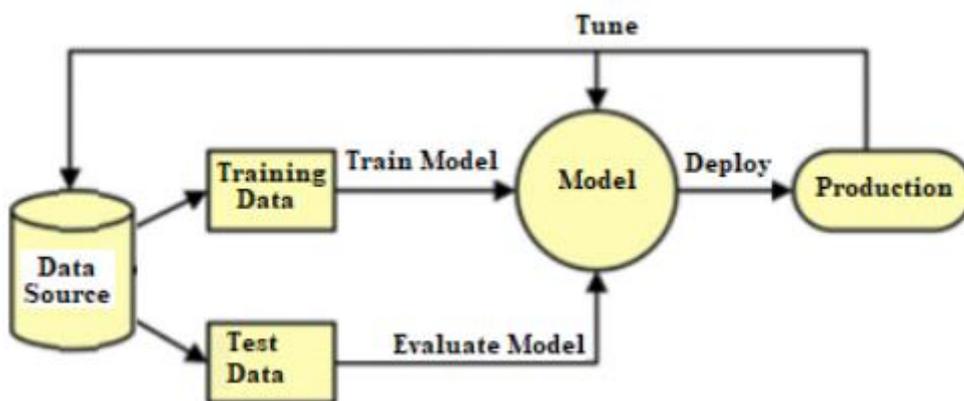


Figura 29: Supervised Machine Learning Flow. Obtenido en (Mahesh, 2020).

3.9.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Los PCA ³⁵, estos son utilizados para la reducción de dimensionalidad y la identificación de patrones subyacentes en datos multivariados. Agrupan datos similares, facilitando la detección de anomalías y la comprensión de las relaciones

³⁵ PCA proviene de sus siglas en inglés, que significan "Principal Component Analysis", es decir, "Análisis de Componentes Principales" en español.

entre diferentes variables del proceso. Pueden identificar lotes de producción que no cumplen con los estándares de calidad debido a variables fuera de control, (Mahesh, 2020).

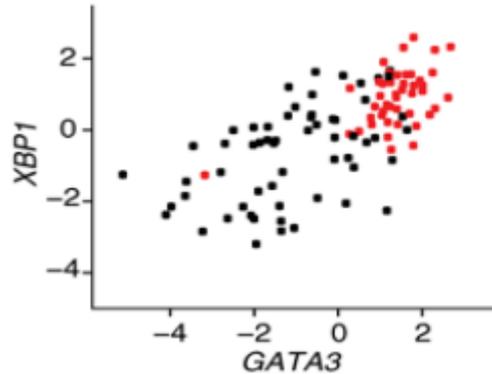


Figura 30: Ejemplo de PCA. Obtenido en (Mahesh, 2020).

3.10 ESTUDIOS DE CASOS DE IMPLEMENTACIÓN IA

Analizada la teoría y como hemos comentado anteriormente, hay que hablar de casos reales y los beneficios que ha generado la IA. Algunas de las empresas más grandes del mundo utilizan estas metodologías.

3.10.1 TESLA

La gigantesca empresa Tesla, ha invertido y ha adoptado un avanzado Sistema de Control Estadístico de Procesos en su Gigafactory de Shanghái, para conseguirlo ha integrado tecnologías clave de las que hemos hablado anteriormente de la Industria 4.0, como la IA, el análisis de Big Data y el Internet de las Cosas, (Tesla, 2024).



Figura 31: Logo de Tesla. Obtenido en su página web.

Para ello, Tesla utiliza una red extensa de sensores para recopilar datos en tiempo real de sus coches sobre métricas críticas como la temperatura, presión, alineamiento de componentes y calidad de soldaduras. Tesla también utiliza algoritmos de aprendizaje automático, donde puede analizar estos datos para identificar patrones y prever posibles fallos antes de que ocurran, mejorando así sus gráficos de control. Esta capacidad predictiva permite a la empresa minimizar el tiempo de inactividad y reducir los costes de mantenimiento, ahorrando así millones de euros, (Xiao Han, 2023).

Además, Tesla ya está utilizando representaciones virtuales de los procesos físicos, para simular y optimizar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones. Como se puede ver, el mantenimiento predictivo es otro componente crucial del SPC moderno de Tesla, permitiendo prever y realizar el mantenimiento antes de que se produzcan fallos, lo que reduce significativamente el tiempo de inactividad no planificado y lo que ha convertido a esta empresa en una de las empresas con mayor valor.

Estos avances se traducen en una mejora notable en la calidad de los vehículos eléctricos de Tesla. La implementación de estas tecnologías avanzadas no solo ha mejorado la calidad y la eficiencia de los procesos de Tesla, sino que también ha proporcionado una ventaja competitiva significativa en este mercado tan competitivo como es el de la automoción.

3.10.2 INTEL

Por otro lado, también tenemos como ejemplo a Intel, esta gigantesca empresa en 2024 ha implementado técnicas avanzadas de las que hemos hablado antes en sus sistemas de control de procesos. Al igual que Tesla ha desarrollado tecnologías de la Industria 4.0 y sobre todo de IA en sus fábricas de semiconductores.

De igual manera que Tesla, utiliza una red de sensores avanzados que recopilan datos en tiempo real sobre diversas métricas del proceso de fabricación, como la temperatura, la humedad y la presión, pero en este caso en la producción de chips y no en la de coches. Intel utiliza IA de aprendizaje automática para analizar en sus líneas de producción patrones sutiles y prever posibles defectos de chips.

Como es común en todas las grandes empresas, Intel ya implementa IA para crear réplicas virtuales de los procesos, estas facilitan la simulación y optimización del rendimiento de los sistemas bajo diferentes condiciones, lo que mejora la eficiencia operativa y asegura una calidad constante en la producción de sus semiconductores. El control de gráficos se ha visto altamente mejorado con la implementación de la IA en Intel, lo que se traduce en poder ajustar factores como la velocidad de las máquinas y la alineación de componentes para mantener altos estándares de calidad y ser una de las empresas más grandes en su sector industrial, (Intel, 2024).



Figura 32: Smart Manufacturing Intel. Obtenido en (Intel, 2024).

3.11 IMPACTO Y MEJORAS DE LA IA RESPECTO AL SPC CLÁSICO

Como hemos visto la integración de la Inteligencia Artificial en el Control Estadístico de Procesos representa una evolución significativa en la gestión de la calidad y la eficiencia en la producción industrial de todas las empresas. Empresas como pueden ser Tesla e Intel ya están aprovechando los beneficios de la IA para mejorar sus prácticas de SPC. A medida que la tecnología continúa avanzando y creciendo, es probable que más empresas utilicen la IA para mejorar el rendimiento del SPC.

Si ponemos en común lo analizado durante el capítulo, podemos asegurar que algunos de los beneficios que se han podido ya ver en estas empresas son que la combinación de IA con el SPC genera:

- Una precisión significativamente mayor en la detección de anomalías comparada con el SPC clásico. Gracias al aprendizaje automático pueden identificar patrones en los datos que las técnicas estadísticas convencionales no detectaban.
- La IA permite mejorar la capacidad para predecir y prevenir problemas antes de que ocurran. Los modelos basados en IA anticipan fallos en el equipo y problemas de calidad, lo podemos traducir en que las empresas que lo incorporan en sus procesos toman medidas preventivas en lugar de reactivas.
- La IA permite con los gráficos de control la optimización en tiempo real de los procesos de producción, con sistemas que ajustan automáticamente

los parámetros que requiera la empresa para mantener la calidad y eficiencia, algo difícil de lograr con métodos tradicionales. El ajuste y mejora continua asegura que los sistemas se mantengan en condiciones óptimas.

- Podemos concretar que la implementación de la IA en el SPC ayuda a conseguir el objetivo principal de las empresas, la reducción significativa de costes, ya que como hemos dicho, se mejora la precisión en la detección de anomalías y se predicen problemas.

CAPÍTULO IV: MANUAL DE USUARIO

4.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO IV

En este cuarto capítulo, se detalla la funcionalidad de la aplicación desarrollada en este trabajo fin de grado, que hemos creado en Excel. Diseñado con el usuario en mente, el uso de nuestro programa es muy sencillo y eficiente, en la que solo se requiere la introducción de datos en un archivo de texto (.txt). Una vez que el usuario carga su archivo, el programa se encarga del resto, generando los Gráficos de Control y calculando de manera automática las pautas y rachas necesarias para el control y análisis de los datos del usuario.

La simplicidad de uso es una de las características clave de nuestro programa. No es necesario tener conocimientos avanzados en Excel o en programación para utilizarlo. Todo el proceso ha sido optimizado para que cualquier usuario pueda obtener resultados precisos y visualmente atractivos con un solo clic. A lo largo de este capítulo, se detallará paso a paso para que se pueda aprovechar al máximo esta herramienta, asegurando que el usuario pueda tomar decisiones informadas basadas en los datos generados por el programa.

4.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

Como hemos dicho el funcionamiento es muy sencillo, el usuario solo va a tener acceso a una sola hoja de cálculo de Excel, llamada “Datos de Entrada”. En esta hoja el usuario no va a poder editar y escribir nada, solo podrá dar a un botón para insertar los datos.



Figura 33: Botón del usuario. Elaboración propia.

Esta hoja de cálculo, solo contiene el botón y donde se insertarán los datos del usuario, que como hemos dicho no podrá modificar o editar desde la hoja de cálculo.

Análisis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Control		
1	13,5	15	14	10,5	10,75	12,5	16,25	11,25	11	11	13,75	9,5	11	11,5	14,5	6,25	14,25	21	13,5	14,5	13,25	8,5	18,25	13,5	6,50	11	20	21
2	16	11,5	12,5	12,75	10	12	16	11,5	13,5	12,5	13	11,5	11	16	11	12	10,5	14,25	9,5	12,25	19,75	14,25	11,25	12,25	12,25	11	21	22
3	17,5	22,25	17,5	16,25	20,75	16,25	19,25	13,5	13,5	11,5	13,25	6,25	13	8,5	13,25	6,75	13,5	13,5	10	20,5	16,5	21,25	21,25	11	11,75	11	22	23
4	19,5	20	20	20,75	19,5	23,75	20,25	11,25	12,25	16	12,75	6,75	12,5	11	14	12,25	3,25	19	19,5	16	20	21	17	17,5	14,5	11	23	24
5	19,25	21,75	18,25	19,5	19,5	19,25	14	11,5	13,75	10,5	9,75	14,5	11,5	17,75	11,5	17,75	6,5	20,5	19,5	19,25	26,5	18,5	19,5	9,75	11	24	25	26
6	19,5	9,75	11,95	10,74	8,75	18,75																					27	28
7																											29	30
8																											31	32
9																											33	34
10																											35	36



Figura 34: Datos de Entrada 1. Elaboración propia.

Entendido que la única función del usuario es pulsar el botón, al pulsarlo se nos abrirá una ventana de exploración que nos permitirá seleccionar la ruta del documento de texto .txt que deseemos abrir, para realizar nuestro SPC.

4.3 FORMATO DE NUESTRO DOCUMENTO .TXT

Los datos de las muestras deberán de disponerse en formato tabla, con tantas filas como tamaño de muestra tengan los datos, y tantas columnas como número de muestras se hayan recogido para realizar el estudio SPC. Las columnas deben ir separadas por el tabulador, pulsando la tecla Tab:

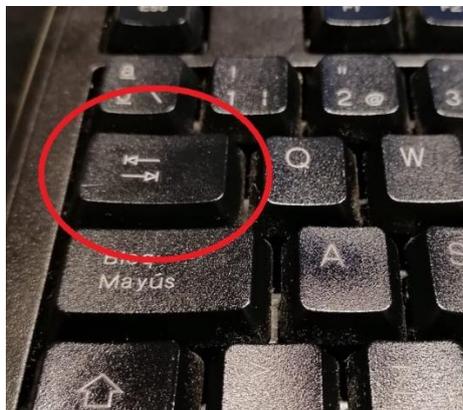


Figura 35: Tecla Tab. Obtenida en imágenes de Google.

En el Bloc de Notas es importante que solo estén los datos de las muestras para que el programa funcione correctamente. Ejemplo de una toma de datos correcta:

```

13,5 15 14 10,5 10,75 12,5 16,25 11,25 11 11 13,75 9,5 11 11,5 14,5 16,25 14,25 21 13,5 14,5
16 11,5 12,5 12,75 10 12 16 11,5 10,5 12,5 13,25 12 11,5 11 15 16 12 19,5 14,25 9,5
17,5 22,25 17,5 19,25 20,75 19,25 19,25 13,5 13,5 11,5 13,25 15,25 13 8,5 13,25 15,75 13,5 19,5 18 20,5
19,5 20 25 20,75 19,5 23,75 20,25 11,25 12,25 16 12,75 15,75 12,5 11 14 12,25 9,25 19 19,5 18
19,25 21,75 18,25 19,5 19,5 19,75 14 11,5 13,75 10,5 9,75 9,5 14,5 9,5 11,5 17,75 18,5 18,5 18,5
19,5 9,75 11,95 10,74 8,75 18,75
    
```

Figura 36: Ejemplo de muestra. Elaboración propia.

- El programa solo permite hasta un máximo de 27 muestras, en caso de que se supere el número máximo, el programa lanzará una alerta y no se ejecutará:

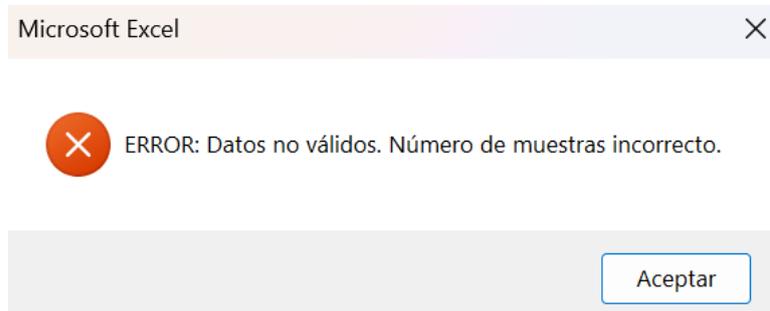


Figura 37: Mensaje de error por superar el número de muestras. Elaboración propia.

- Como se ha comentado en otros capítulos, el tamaño de muestra debe estar comprendido entre 2 y 10, en caso de que no se cumpla el programa lanzará un mensaje de alerta y no se ejecutará:

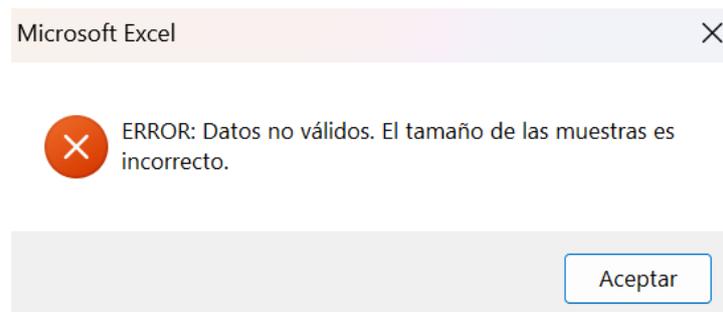


Figura 38: Mensaje de error por tamaño de muestra incorrecto. Elaboración propia.

- En caso de que las muestras tengan decimales, es preferible que los datos utilicen comas, pero el programa está diseñado para que si se utilizan puntos cambiarlos por comas.

4.4 RESULTADOS DEL PROGRAMA

- Una vez entendido el formato correcto para la introducción de las muestras, al seleccionar el Bloc de Notas lo primero que va a hacer la aplicación es analizar si hay alguna muestra fuera de los límites de control de nuestros gráficos. Si se diese el caso de que hay puntos fuera de los límites, la aplicación este diseñada para alertar en qué tipo de gráfico se encuentra la muestra y lanzar un mensaje de aviso:

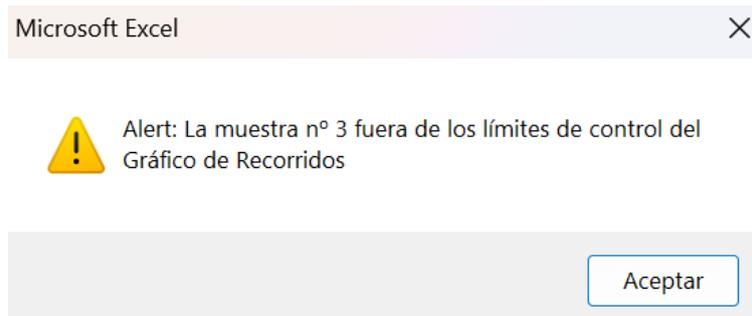


Figura 39: Mensaje de alerta por puntos fuera de los límites. Elaboración propia.

Si hubiese varias muestras fuera de los límites de control, el programa lanzaría los mensajes de alerta necesarios para cada muestra.

Nota: Esta aplicación está creada para alertar y notificar del comportamiento y situación de las muestras, es el usuario el que tiene la última palabra y toma las decisiones en función de lo que se analiza en la aplicación.

- Una vez el usuario es alertado de todos los puntos fuera de los límites de control, debe pulsar en “Aceptar” para que la aplicación realice el estudio SPC. Al pulsar en “Aceptar” en todos los mensajes de alerta, la aplicación creará automáticamente una hoja nueva llamada SPC.

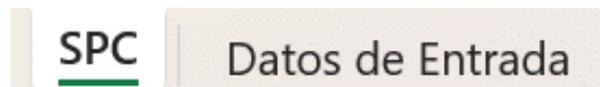


Figura 40: Hoja SPC. Elaboración propia.

En esta hoja nos aparecerá automáticamente todo el informe realizado sobre los datos de nuestras muestras. Podremos ver los Gráficos de Control de Medias y Recorridos, además de las pautas y rachas de cada gráfico, de una manera visual y sencilla. De esta manera el usuario podrá analizar el comportamiento de sus muestras y tener suficiente información para tomar una decisión en su línea de producción.

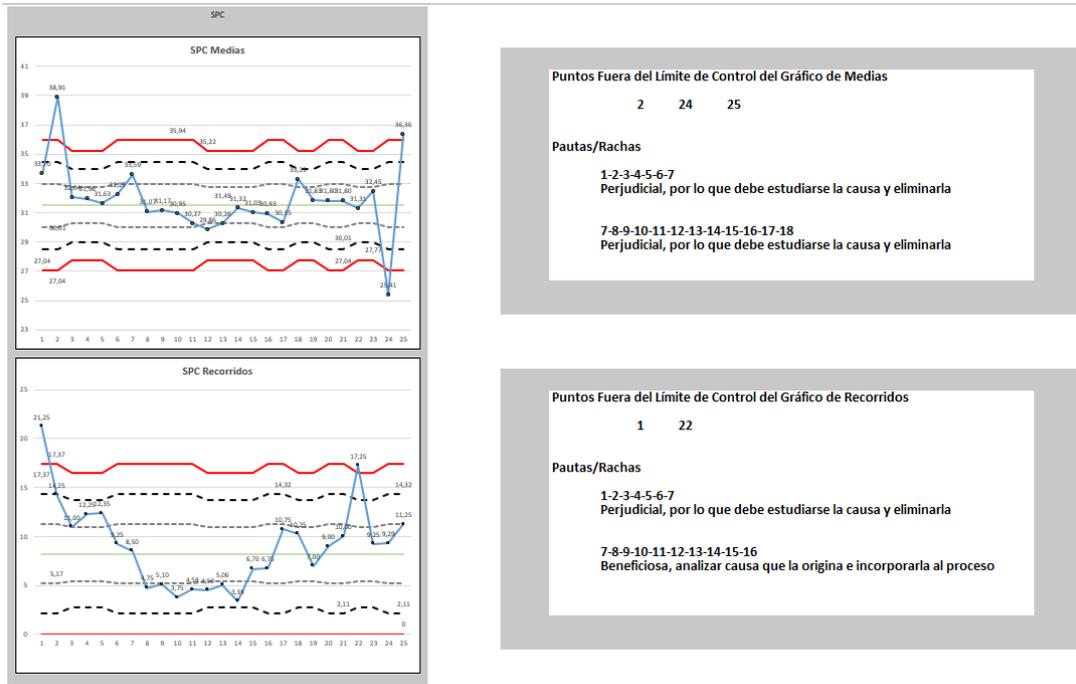


Figura 41: SPC. Elaboración propia.

- Por último, debajo de los gráficos de control con sus respectivas pautas y rachas, la aplicación creará una tabla de datos resumen con los valores de los límites según se van eliminando las muestras en cada paso. Esta tabla contiene toda la información de los valores de los límites para cada paso según la aplicación va eliminando las muestras en función de los distintos tamaños de muestras que tengan los datos. Además, la aplicación indica las muestras que se han eliminado en cada paso. Si existieran muestras de seguimiento, la aplicación realizaría lo mismo para las muestras de seguimiento al final de la tabla.

	Recorrido Paso 1		Recorrido Paso 2		Recorrido Paso 3		Seguimiento
n	5	6	5	6	5	6	6
LCS	19,234863	18,233995	18,164545	17,21937	17,368808	16,465038	15,448836
L2	15,856175	15,18893	14,973863	14,343747	14,317901	13,715388	12,86889067
L1	12,477488	12,143865	11,783182	11,468123	11,266994	10,965737	10,28894533
R	9,0988	9,0988	8,5925	8,5925	8,216087	8,216087	7,709
L-1	5,7201123	6,0537349	5,4018183	5,7168767	5,16518	5,4664365	5,129054667
L-2	2,3414245	3,0086699	2,2111367	2,8412533	2,114273	2,7167861	2,549109333
LCL	0	0	0	0	0	0	0
n OUT	1		22				

	Medias Paso 1		Medias Paso 2		Medias Paso 3		Seguimiento
n	5	6	5	6	5	6	6
LCS	36,502769	35,730457	36,269672	35,529176	35,940593	35,215947	35,215947
L2	34,922542	34,407667	34,754543	34,260879	34,457895	33,974798	33,974798
L1	33,342314	33,084877	33,239414	32,992582	32,975198	32,733649	32,733649
R	31,762087	31,762087	31,724286	31,724286	31,4925	31,4925	31,4925
L-1	30,18186	30,439297	30,209157	30,455989	30,009802	30,251351	30,251351
L-2	28,601632	29,116507	28,694028	29,187692	28,527105	29,010202	29,010202
LCL	27,021405	27,793717	27,1789	27,919396	27,044407	27,769053	27,769053
n OUT	2 24		25				

Figura 42: Tabla resumen de datos. Elaboración propia.

CAPÍTULO V: MANUAL DE PROGRAMADOR

5.1 DESARROLLO DE UN SPC

Una vez explicado el funcionamiento de la herramienta informática que se ha diseñado y que el usuario conozca a fondo el uso de la herramienta creada en *Microsoft Excel*, se va a detallar el lenguaje de programación *Visual Basic for Applications* que viene asociada al Excel. Para utilizar este lenguaje de programación el complemento de macros (VBA³⁶) debe estar activado:

1. Abrir Excel.

2. Acceder a las Opciones de Excel:

- Haz clic en Archivo en la esquina superior izquierda.
- Selecciona Más y posteriormente Opciones en el menú.

3. Mostrar la pestaña de Desarrollador:

- En la ventana de Opciones de Excel, selecciona la categoría Personalizar cinta de opciones.
- En el panel derecho, bajo la lista de pestañas principales, busca la opción Desarrollador y márcala.
- Haz clic en Aceptar para cerrar la ventana.

Ahora deberías ver la pestaña Desarrollador en la cinta de opciones de Excel.

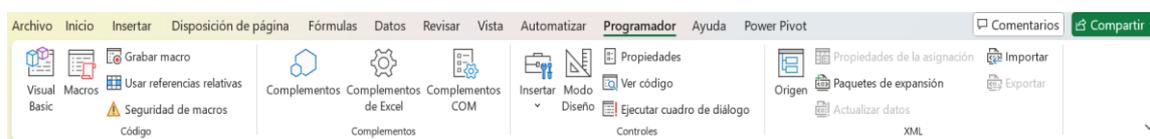


Figura 43: Mostrar pestaña de desarrollador. Elaboración propia.

El proyecto utiliza varias hojas de Excel, las cuales muchas de ellas se mantendrán en oculto porque son parte del proceso, pero se explicará cada una de ellas para comprender el funcionamiento. En los siguientes apartados se explica cómo está organizado el Excel y se detalla su proceso de creación.

Los siguientes apartados están divididos por las diferentes hojas de la aplicación, entendiendo el funcionamiento de cada una.

³⁶ VBA hace referencia a las siglas en inglés Visual Basic for Applications, correspondientes al lenguaje de macros en Excel.

5.2 ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA

5.2.1 DATOS DE ENTRADA

El desarrollo de esta hoja es muy simple, se trata de un diseño para insertar los datos que el usuario desea analizar y controlar. En la aplicación, como se ha explicado en otros capítulos, se analiza un número de muestras de hasta 25 y dos más de seguimiento, la idea es que se introduzcan muestras cercanas a 25 para estabilizar los límites de control. Y cada muestra tendrá un tamaño entre 2 y 10, para estabilizar el control es mejor que el tamaño de la muestra se constante (4,5 y 6 pueden ser lo ideal).

El diseño propuesto es el siguiente:

Análisis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Control	26	27
1	13,5	15	14	10,5	10,75	11,5	16,25	11,25	11	11	13,75	9,5	11	11,5	14,5	16,25	14,25	21	13,5	14,5	13,25	8,5	18,25	13,5	15,13			
2	18	11,5	12,5	15,75	20	11	8	11,5	10,5	11,25	11	11,5	11	15	18	11	19,5	14,25	9,5	9,25	14,75	14,25	11,25	10,13				
3	17,5	23,25	17,5	19,25	20,75	18,25	19,25	19,5	13,5	13,5	15,25	16,25	13	8,5	13,25	15,75	13,5	19,5	10	20,5	19,5	11,25	11,25	19	11,13			
4	19,5	20	25	20,75	19,5	23,75	20,25	11,25	12,25	16	12,75	15,75	12,5	11	14	12,25	9,25	19	19,5	18	20	21	17	17,5	14,5			
5	18,25	21,75	18,25	19,5	19,5	23,5	19,75	14	11,5	13,75	10,5	9,75	9,5	14,5	9,5	11,5	13,75	14,5	20,5	18,5	19,25	19,5	18,5	8,75				
6	19,5	21,75	9,75	11,95	10,74	8,75	18,75						10	10,75	14,95	14						21,15	18,25	19,15	10,73			
7																												
8																												
9																												
10																												

Figura 44: Diseño para insertar datos. Elaboración propia.

Los datos serán insertados en las celdas B3:Z12 y AB3:AC12. Para insertar los datos vamos a crear un botón.



Figura 45: Botón de insertar datos. Elaboración propia.

Para crear el botón tenemos que:

1. Insertar el Botón:

- En la pestaña desarrollador, haz clic en Insertar dentro del grupo Controles.
- En Controles de formulario, selecciona Botón.
- Haz clic y arrastra en la hoja de cálculo para dibujar el botón.

2. Asignar la Macro al Botón:

- Después de dibujar el botón, automáticamente aparecerá una ventana para Asignar Macro.
- Selecciona la macro que hemos creado y daremos click en **Aceptar**.

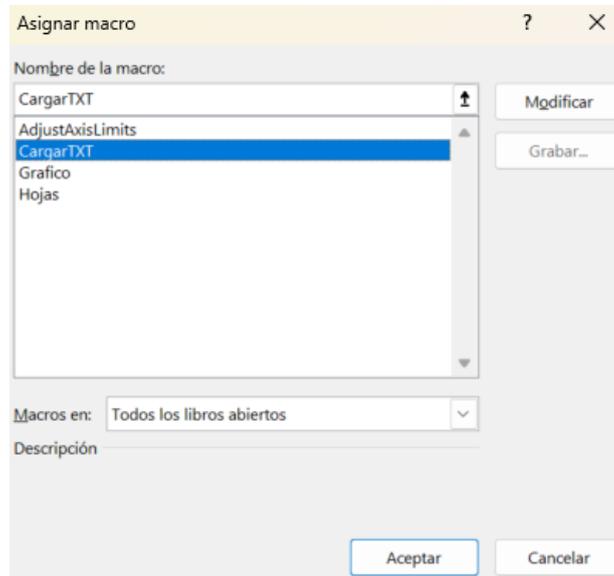


Figura 46: Asignar macro al botón. Elaboración propia.

3. Personalizar el botón a nuestro gusto.

Nota: El desarrollo de las macros lo veremos en próximos apartados.

5.2.2 CONSTANTES

En la siguiente hoja de cálculo que vamos a crear, solo la utilizaremos para poner los valores a las constantes, las cuales utilizaremos para calcular los límites de control de nuestros gráficos SPC. Los valores son los que indicamos en el capítulo 2.

Fijaremos los valores de las constantes dependiendo del tamaño de muestra en unas celdas en concreto. Estas son las constantes que emplearemos en función del tamaño de la muestra:

N	A2	D3	D4
2	1,88	0	3,267
3	1,023	0	2,574
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,114
6	0,483	0	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777

Figura 47: Constantes. Elaboración propia.

En nuestro caso hemos ocupado las celdas G11:J20. Celdas que debemos de tener para posteriores fórmulas.

5.2.3 RECORRIDO PASO 1

En el siguiente apartado nos vamos a centrar en realizar el gráfico de control de recorridos, para ello vamos a calcular los límites de control y las diferentes zonas del SPC. Posteriormente para realizar el Informe de Recorridos lo realizaremos en 3 pasos.

1º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
R	6	10,75	15,25	10,25	10,75	15	4,25	2,75	3	5	3,25	6,25	3,5	6,05	5,5	4,75	8,5	4,5	7	11	10,75	16,8	7	8,25	6,5			
X	17,542	18,1	16,167	15,783	15,207	15,958	18,375	12,3	11,75	12,95	12,7	12,042	11,375	11,842	13,375	14,35	13,35	19	17,375	16,2	16,25	18,675	17,917	16,667	11,875			
Recorrido Medio		7,704																										
n	6	5	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6	6	6	0	0
A ₂	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483		
D ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
D ₄	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004			
LCS	15,439	16,286	15,439	15,439	15,439	15,439	15,439	16,286	16,286	16,286	16,286	15,439	15,439	15,439	15,439	16,286	16,286	15,439	15,439	16,286	16,286	15,439	15,439	15,439	15,439			
LCL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
σ	2,5783	2,8608	2,5783	2,5783	2,5783	2,5783	2,5783	2,8608	2,8608	2,8608	2,8608	2,5783	2,5783	2,5783	2,5783	2,8608	2,8608	2,5783	2,5783	2,8608	2,8608	2,5783	2,5783	2,5783	2,5783			
U _u	12,861	13,426	12,861	12,861	12,861	12,861	13,426	13,426	13,426	13,426	12,861	12,861	12,861	12,861	13,426	13,426	12,861	12,861	13,426	13,426	12,861	12,861	12,861	12,861	12,861			
U _l	10,282	10,565	10,282	10,282	10,282	10,282	10,565	10,565	10,565	10,565	10,282	10,282	10,282	10,282	10,565	10,565	10,282	10,282	10,565	10,565	10,282	10,282	10,282	10,282	10,282			
L _u	5,1257	4,8432	5,1257	5,1257	5,1257	5,1257	4,8432	4,8432	4,8432	4,8432	5,1257	5,1257	5,1257	5,1257	4,8432	4,8432	5,1257	5,1257	4,8432	4,8432	5,1257	5,1257	5,1257	5,1257	5,1257			
L _l	2,5475	1,9825	2,5475	2,5475	2,5475	2,5475	1,9825	1,9825	1,9825	1,9825	2,5475	2,5475	2,5475	2,5475	1,9825	1,9825	2,5475	2,5475	1,9825	1,9825	2,5475	2,5475	2,5475	2,5475	2,5475			
R	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704	7,704			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
	IN	IN	X	X																								

Figura 48: Recorrido Paso 1. Elaboración propia.

Aunque parezca más laborioso el hecho de calcular los límites y zona para cada muestra no lo es, ya que solo tendremos que arrastrar las fórmulas una vez calculado para la primera muestra.

1. Lo primero es calcular el Recorrido y Media para cada muestra:

- a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

=SI(CONTAR(Hoja1!B3:B12)=0;"";MAX(Hoja1!B3:B12)-MIN(Hoja1!B3:B12))

Aclaración: B3:B12 corresponde al rango de celdas donde se insertarán los datos de nuestra muestra nº1, en caso de que estén vacíos no podremos calcular el recorrido.

- b. Para calcular la media de la muestra 1 (celda B3):

=SI(CONTAR(Hoja1!B3:B12)=0;"";PROMEDIO(Hoja1!B3:B12))

2. Una vez calculado el recorrido y la media de la muestra nº1, arrastramos nuestras celdas hasta la muestra nº25. Así podremos calcular el recorrido medio (celda E5):

=PROMEDIO(B2:Z2)

Aclaración: B2:Z2 corresponden al rango de los recorridos desde la muestra nº1 hasta la muestra nº25.

3. Lo siguiente va a ser calcular las constantes para cada muestra:
- a. Lo primero es calcular el tamaño de cada muestra (de manera similar ha como hemos hecho antes), para nuestra muestra nº1 (celda B7):

=CONTAR(Hoja1!B3:B12)

- b. Sabiendo el tamaño de nuestra muestra nº1, calculamos A2 (celda B8):

=SI(B7=0;"";SI(B7=2;Constantes!\$H\$12;SI(B7=3;Constantes!\$H\$13;SI(B7=4;Constantes!\$H\$14;SI(B7=5;Constantes!\$H\$15;SI(B7=6;Constantes!\$H\$16;SI(B7=7;Constantes!\$H\$17;SI(B7=8;Constantes!\$H\$18;SI(B7=9;Constantes!\$H\$19;SI(B7=10;Constantes!\$H\$20))))))))))

Aclaración: Lo que hace esta fórmula es analizar el tamaño de la muestra nº1 que está en la celda B7 y en función de su tamaño le dará el valor A2 que hemos puesto correctamente en dichas celdas en la hoja Constantes anteriormente.

- c. Sabiendo el tamaño de nuestra muestra $n^{\circ}1$, calculamos D3 (celda B9):

=SI(B7=0;"";SI(B7=2;Constantes!\$I\$12;SI(B7=3;Constantes!\$I\$13;SI(B7=4;Constantes!\$I\$14;SI(B7=5;Constantes!\$I\$15;SI(B7=6;Constantes!\$I\$16;SI(B7=7;Constantes!\$I\$17;SI(B7=8;Constantes!\$I\$18;SI(B7=9;Constantes!\$I\$19;SI(B7=10;Constantes!\$I\$20))))))))))

- d. Sabiendo el tamaño de nuestra muestra $n^{\circ}1$, calculamos D4 (celda B10):

=SI(B7=0;"";SI(B7=2;Constantes!\$J\$12;SI(B7=3;Constantes!\$J\$13;SI(B7=4;Constantes!\$J\$14;SI(B7=5;Constantes!\$J\$15;SI(B7=6;Constantes!\$J\$16;SI(B7=7;Constantes!\$J\$17;SI(B7=8;Constantes!\$J\$18;SI(B7=9;Constantes!\$J\$19;SI(B7=10;Constantes!\$J\$20))))))))))

Aclaración: Para calcular D3 y D4 se realiza similar a A2, pero con sus valores correspondientes.

4. Una vez calculado sus constantes podemos calcular los límites de control:
- a. Para el Límite de Control Superior de la muestra $n^{\circ}1$ (celda B12):

=SI(B7=0;"";B10*\$E\$5)

- b. Para el Límite de Control Inferior de la muestra $n^{\circ}1$ (celda B13):

=SI(B7=0;"";B9*\$E\$5)

Aclaración: B7 corresponde al tamaño de la muestra $n^{\circ}1$, B10 = D4, B9 = D3 y E5 = Recorrido medio.

5. Lo siguiente es calcular las zonas del SPC:

- a. Lo primero es calcular σ de la muestra $n^{\circ}1$ (celda B15):

=SI(B7=0;"";(B12-\$E\$5)/3)

- b. Ahora podemos calcular las zonas, empezamos por $L_{2\sigma}$ de la muestra $n^{\circ}1$ (celda B17):

=SI(B7=0;"";\$E\$5+2*B15)

c. $L_{1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B18):

=SI(B7=0;"";\$E\$5+B15)

d. $L_{-1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B19):

=SI(B7=0;"";\$E\$5-B15)

e. $L_{-2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B20):

=SI(B7=0;"";\$E\$5-2*B15)

f. R de la muestra nº1 (celda B21):

=SI(B7=0;"";\$E\$5)

Una vez calculadas las zonas de nuestro gráfico de control de Recorridos para la muestra nº1, para calcular para las demás muestras es tan fácil como arrastrar desde B7:B21 (celdas que corresponden a la muestra nº1) hasta las celdas Z7:Z21 (celdas que corresponden a la muestra nº25).

6. Por últimos, si quisiéramos saber que muestras están dentro y cuales fuera de nuestros límites de control podríamos hacer (celda B25 y arrastrar hasta la celda Z25):

=SI(B2="";"X";SI(O(B2<B13;B2>B12);"OUT";"IN"))

Incluir formato condicional si se quisiera un diseño más visual.

5.2.4 RECORRIDO PASO 2

En esta hoja vamos a eliminar los puntos que han quedado fuera de los límites en el anterior apartado, que como sabemos se eliminarían en 3 pasos.

2º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R	6	10,75	15,25	10,25	10,75	15	4,25	2,75	3	5	3,25	6,25	3,5	6,05	5,5	4,75	8,5	4,5	7	11	10,75		7	8,25	6,5
X	17,54	18,1	16,17	15,78	15,21	15,96	18,38	12,3	11,75	12,95	12,7	12,04	11,38	11,84	13,38	14,35	13,35	19	17,38	16,2	16,25		17,92	16,67	11,88
	Recorrido Medio			7,325																					
n	6	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6
Az	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483
D3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004
LCS	14,68	15,49	14,68	14,68	14,68	14,68	14,68	15,49	15,49	15,49	15,49	14,68	14,68	14,68	14,68	15,49	15,49	14,68	14,68	15,49	15,49	14,68	14,68	14,68	14,68
LCL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ	2,451	2,72	2,451	2,451	2,451	2,451	2,451	2,72	2,72	2,72	2,72	2,451	2,451	2,451	2,451	2,72	2,72	2,451	2,451	2,72	2,72	2,451	2,451	2,451	2,451
L2σ	12,23	12,77	12,23	12,23	12,23	12,23	12,23	12,77	12,77	12,77	12,77	12,23	12,23	12,23	12,23	12,77	12,77	12,23	12,23	12,77	12,77	12,23	12,23	12,23	12,23
L1σ	9,776	10,05	9,776	9,776	9,776	9,776	9,776	10,05	10,05	10,05	10,05	9,776	9,776	9,776	9,776	10,05	10,05	9,776	9,776	10,05	10,05	9,776	9,776	9,776	9,776
L-1σ	4,874	4,605	4,874	4,874	4,874	4,874	4,874	4,605	4,605	4,605	4,605	4,874	4,874	4,874	4,874	4,605	4,605	4,874	4,874	4,605	4,605	4,874	4,874	4,874	4,874
L-2σ	2,422	1,885	2,422	2,422	2,422	2,422	1,885	1,885	1,885	1,885	1,885	2,422	2,422	2,422	2,422	1,885	1,885	2,422	2,422	1,885	1,885	2,422	2,422	2,422	2,422
R	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325	7,325
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	IN	IN	OUT	IN	IN	OUT	IN	X	IN	IN	IN														

Figura 49: Recorrido Paso 2. Elaboración propia.

Como vemos el diseño es similar y solo hemos eliminado los puntos fuera, por lo que en esta hoja solo tendremos que:

1. Eliminar los puntos fuera de los límites de control, por ello, la fórmula que usaremos ahora donde los recorridos y medias será:

- a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

$$=SI(O('Recorrido Paso 1'!B2<'Recorrido Paso 1'!B13;'Recorrido Paso 1'!B2>'Recorrido Paso 1'!B12);""; MAX(Hoja1!B3:B12)-MIN(Hoja1!B3:B12))$$

- b. Para la Media de la muestra 1 (celda B3):

$$=SI(B7=0;"";SI(O('Recorrido Paso 1'!B2<'Recorrido Paso 1'!B13;'Recorrido Paso 1'!B2>'Recorrido Paso 1'!B12);"";PROMEDIO(Hoja1!B3:B12)))$$

- c. Y arrastramos desde las celdas B2:B3 hasta las celdas Z2:Z3 para las demás muestras.

2. Para el resto tendríamos que copiar y pegar las celdas A4:Z25 de la anterior hoja, Recorrido Paso 1.

5.2.5 RECORRIDO PASO 3

Ya en el tercer y último paso del informe de recorridos, creamos otra hoja donde vamos a eliminar los puntos que han quedado fuera de los límites en el anterior apartado, para posteriormente, realizar nuestro SPC de recorridos.

3º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R	6	10,75		10,25	10,75		4,25	2,75	3	5	3,25	6,25	3,5	6,05	5,5	4,75	8,5	4,5	7	11	10,75		7	8,25	6,5
X	17,542	18,1		15,783	15,207		18,375	12,3	11,75	12,95	12,7	12,042	11,375	11,842	13,375	14,35	13,35	19	17,375	16,2	16,25		17,917	16,667	11,875
	Recorrido Medio				6,6159																				
n	6	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6
A2	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483
D3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004
LCS	13,258	13,986	13,258	13,258	13,258	13,258	13,258	13,986	13,986	13,986	13,986	13,258	13,258	13,258	13,258	13,986	13,986	13,258	13,258	13,986	13,986	13,258	13,258	13,258	13,258
LCI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ	2,2141	2,4567	2,2141	2,2141	2,2141	2,2141	2,2141	2,4567	2,4567	2,4567	2,4567	2,2141	2,2141	2,2141	2,2141	2,4567	2,4567	2,2141	2,2141	2,4567	2,4567	2,2141	2,2141	2,2141	2,2141
L2σ	11,044	11,529	11,044	11,044	11,044	11,044	11,044	11,529	11,529	11,529	11,529	11,044	11,044	11,044	11,044	11,529	11,044	11,044	11,529	11,529	11,044	11,044	11,044	11,044	11,044
L1σ	8,83	9,0726	8,83	8,83	8,83	8,83	8,83	9,0726	9,0726	9,0726	9,0726	8,83	8,83	8,83	8,83	9,0726	9,0726	8,83	8,83	9,0726	9,0726	8,83	8,83	8,83	8,83
L-1σ	4,4018	4,1592	4,4018	4,4018	4,4018	4,4018	4,4018	4,1592	4,1592	4,1592	4,1592	4,4018	4,4018	4,4018	4,4018	4,1592	4,1592	4,4018	4,4018	4,1592	4,1592	4,4018	4,4018	4,4018	4,4018
L-2σ	2,1877	1,7025	2,1877	2,1877	2,1877	2,1877	2,1877	1,7025	1,7025	1,7025	1,7025	2,1877	2,1877	2,1877	2,1877	1,7025	1,7025	2,1877	2,1877	1,7025	1,7025	2,1877	2,1877	2,1877	2,1877
R	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159	6,6159
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	IN	IN	X	IN	IN	X	IN	X	IN	IN	IN														

Figura 50: Recorrido Paso 3. Elaboración Propia.

Como vemos el diseño vuelvo a ser similar, hemos eliminado los puntos fuera y todos los puntos quedarían dentro de nuestros límites, por lo que en esta hoja solo tendremos que:

1. Eliminar los puntos fuera de los límites de control, por ello, la fórmula que usaremos ahora donde los recorridos y medias será:

- a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

$$=SI(O('Recorrido Paso 2'!B2<'Recorrido Paso 2'!B13;'Recorrido Paso 2'!B2>'Recorrido Paso 2'!B12);'';'Recorrido Paso 2'!B2)$$

- b. Para la Media de la muestra 1 (celda B3):

$$=SI(B7=0;'';SI(O('Recorrido Paso 2'!B2<'Recorrido Paso 2'!B13;'Recorrido Paso 2'!B2>'Recorrido Paso 2'!B12);'';'Recorrido Paso 2'!B3))$$

- c. Y arrastramos desde las celdas B2:B3 hasta las celdas Z2:Z3 para las demás muestras.

2. Para el resto tendríamos que copiar y pegar las celdas A4:Z25 de las anteriores hojas, Recorrido Paso 1 o Recorrido Paso 2.

Una vez realizada estas tres hojas de Recorridos ya podemos realizar nuestro gráfico de control de Recorridos con Excel, para ello:

- Seleccionamos las LCS, LCI, L_{2σ}, L_{1σ}, L_{-1σ} y L_{-2σ} de cada muestra en nuestra hoja “Recorrido Paso 3”.
- Insertamos nuestro gráfico de líneas.

- Añadimos la serie de valores correspondientes a los recorridos de cada muestra en nuestra hoja “Recorrido Paso 1”, dando a seleccionar datos y posteriormente a agregar. Y ya tendríamos nuestro gráfico de control de Recorridos.
- Estilizar a nuestro gusto.

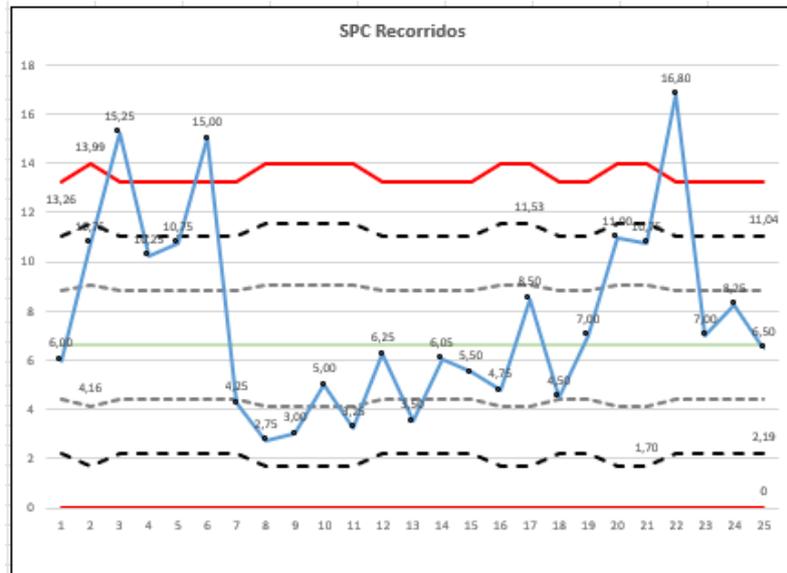


Figura 51: Gráfico de Control de Recorridos. Elaboración propia.

5.2.6 INFORME RECORRIDO

Una vez hemos realizado los 3 pasos para eliminar todos los puntos fuera de los límites y poder realizar el Gráfico de Control de Recorridos, vamos a analizar dicho gráfico, esta es la función de esta nueva hoja que hemos creado.

Este es el diseño que hemos elegido:

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
¿En qué zona está?	C-	B+	OUT	B+	B+	OUT	B-	B-	B-	C-	B-	C-	B-	C-	C-	C-	C+	C-	C+	B+	B+	OUT	C+	C+	C-
Pauta A o más allá	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Pauta B o más allá superior	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO														
Pauta B o más allá inferior	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO										
7 puntos consecutivos por encima	1	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
7 puntos consecutivos por debajo	X	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO
Racha de 7 Creciente	X	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
Racha de 7 Decreciente	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	6	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	8	7	6	5
	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Puntos fuera de los límites	3	6	22																						

Figura 52: Informe gráfico de Recorridos. Elaboración propia.

Esta es la hoja más laboriosa y va a requerir de fórmulas bastante complejas. En el diseño que hemos realizado, donde pone “MUESTRA” es la celda B4 para ubicarnos mejor. Empezamos:

1. Lo primero que vamos a hacer es ver en que zona está cada muestra, para la muestra nº1 (celda C5) ponemos la fórmula:

```
=SI(CONTAR(Hoja1!B3:B12=0);"";SI(O('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B12;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B13);"OUT";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B17;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B12);"A+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B18;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B17);"B+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B21;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B18);"C+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B19;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B21);"C-";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B20;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B19);"B-";SI(Y('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B13;'Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B20);"A-"))))))))
```

Esta fórmula nos indicará en que zona está la muestra nº1 y si arrastramos hasta la celda AA5 sabremos en que zona está la muestra (hasta la nº25).

2. Sabiendo la zona en la que está cada muestra, podemos empezar a calcular las Pautas y Rachas de manera automática.

a. Pauta en zona A o más allá.

- Nos situamos en la celda C6:

```
=SI(C5="";"";SI(CONTAR.SI(C5:E5;"A+")+CONTAR.SI(C5:E5;"A-")+CONTAR.SI(C5:E5;"OUT")<2;"NO";"SI"))
```

- Nos situamos en la celda D6:

```
=SI(D5="";"";SI(CONTAR.SI(D5:F5;"A+")+CONTAR.SI(D5:F5;"A")+CONTAR.SI(D5:F5;"OUT")<2;SI(CONTAR.SI(C5:E5;"A+")+CONTAR.SI(C5:E5;"A-")+CONTAR.SI(C5:E5;"OUT")<2;"NO";"SI");"SI"))
```

- Nos situamos en la celda E6:

```
=SI(E5="";"";SI(CONTAR.SI(E5:G5;"A+")+CONTAR.SI(E5:G5;"A-")+CONTAR.SI(E5:G5;"OUT")<2;SI(CONTAR.SI(D5:F5;"A+")+CONTAR.SI(D5:F5;"A")+CONTAR.SI(D5:F5;"OUT")<2;SI(CONTAR.SI(C5:E5;"A+")+CONTAR.SI(C5:E5;"A")+CONTAR.SI(C5:E5;"OUT")<2;"NO";"SI");"SI");"SI"))
```

- Y arrastramos desde la celda E6 hasta la celda AA6. Estas fórmulas nos pondrán la palabra SI en caso de haber pauta y en caso contrario nos pondrán NO.

- Posteriormente en la celda C7, ponemos:

=SI(C6="SI";C4;"")

- Y arrastramos desde C7 hasta AA7, de esta manera en caso de que haya pauta, obtendremos la muestra en dichas celdas.

- b. Pauta en zona B o más allá. Al menos hay 4 puntos de 5 consecutivos en la Zona B o más allá, por encima de la media:
 - Nos situamos en la celda C8:
 =SI(C5="";"";SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A+")+CONTAR.SI(C5:G5;"B+")
 +CONTAR.SI(C5:G5;"OUT")<4;"NO";"SI"))

 - Nos situamos en la celda D8:
 =SI(D5="";"";SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A+")+CONTAR.SI(D5:H5;"B+")
 +CONTAR.SI(D5:H5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A+")+CONT
 AR.SI(C5:G5;"B+")+CONTAR.SI(C5:G5;"OUT")<4;"NO";"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda E8:
 =SI(E5="";"";SI(CONTAR.SI(E5:I5;"A+")+CONTAR.SI(E5:I5;"B+")+C
 ONTAR.SI(E5:I5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A+")+CONTAR.S
 I(D5:H5;"B+")+CONTAR.SI(D5:H5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5
 ;"A+")+CONTAR.SI(C5:G5;"B+")+CONTAR.SI(C5:G5;"OUT")<4;"N
 O";"SI");"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda F8:
 =SI(F5="";"";SI(CONTAR.SI(F5:J5;"A+")+CONTAR.SI(F5:J5;"B+")+C
 ONTAR.SI(F5:J5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(E5:I5;"A+")+CONTAR.SI
 (E5:I5;"B+")+CONTAR.SI(E5:I5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A+
 ") +CONTAR.SI(D5:H5;"B+")+CONTAR.SI(D5:H5;"OUT")<4;SI(CON
 TAR.SI(C5:G5;"A+")+CONTAR.SI(C5:G5;"B+")+CONTAR.SI(C5:G5;
 "OUT")<4;"NO";"SI");"SI");"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda G8:
 =SI(G5="";"";SI(CONTAR.SI(G5:K5;"A+")+CONTAR.SI(G5:K5;"B+")
 +CONTAR.SI(G5:K5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(F5:J5;"A+")+CONTA
 R.SI(F5:J5;"B+")+CONTAR.SI(F5:J5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(E5:I5;
 "A+")+CONTAR.SI(E5:I5;"B+")+CONTAR.SI(E5:I5;"OUT")<4;SI(CO
 NTAR.SI(D5:H5;"A+")+CONTAR.SI(D5:H5;"B+")+CONTAR.SI(D5:H
 5;"OUT")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A+")+CONTAR.SI(C5:G5;"B+")
 +CONTAR.SI(C5:G5;"OUT")<4;"NO";"SI");"SI");"SI");"SI");"SI"))

 - Y arrastramos desde la celda G8 hasta la celda AA8.

 - Nos situamos en la celda C10:

=SI(C8="SI";C4;"")

- Y arrastramos desde la celda C10 hasta la celda AA10.

- c. Pauta en zona B o más allá. Al menos hay 4 puntos de 5 consecutivos en la Zona B o más allá, por debajo de la media:
 - Nos situamos en la celda C9:
=SI(C5="";"";SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A-")+CONTAR.SI(C5:G5;"B-")<4;"NO";"SI"))

 - Nos situamos en la celda D9:
=SI(D5="";"";SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A-")+CONTAR.SI(D5:H5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A-")+CONTAR.SI(C5:G5;"B-")<4;"NO";"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda E9:
=SI(E5="";"";SI(CONTAR.SI(E5:I5;"A-")+CONTAR.SI(E5:I5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A-")+CONTAR.SI(D5:H5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A-")+CONTAR.SI(C5:G5;"B-")<4;"NO";"SI");"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda F9:
=SI(F5="";"";SI(CONTAR.SI(F5:J5;"A-")+CONTAR.SI(F5:J5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(E5:I5;"A-")+CONTAR.SI(E5:I5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A-")+CONTAR.SI(D5:H5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A-")+CONTAR.SI(C5:G5;"B-")<4;"NO";"SI");"SI");"SI");"SI"))

 - Nos situamos en la celda G9:
=SI(G5="";"";SI(CONTAR.SI(G5:K5;"A-")+CONTAR.SI(G5:K5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(F5:J5;"A-")+CONTAR.SI(F5:J5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(E5:I5;"A-")+CONTAR.SI(E5:I5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(D5:H5;"A-")+CONTAR.SI(D5:H5;"B-")<4;SI(CONTAR.SI(C5:G5;"A-")+CONTAR.SI(C5:G5;"B-")<4;"NO";"SI");"SI");"SI");"SI");"SI"))

 - Y arrastramos desde la celda G9 hasta la celda AA9.

 - Nos situamos en la celda C11:
=SI(C9="SI";C4;"")

 - Y arrastramos desde la celda C11 hasta la celda AA11.

d. Existen al menos 7 puntos consecutivos por encima o debajo de la media:

- Nos situamos en la celda C12:
`=SI(C5="";"";SI('Recorrido Paso 1!B2>'Recorrido Paso 3!B21;"SI";SI('Recorrido Paso 1!B2<'Recorrido Paso 3!B21;"NO";"MEDIA")))`

- Y arrastramos desde la celda C12 hasta la celda AA12.

- Nos situamos en la celda C13:
`=SI(C12="";"";SI(C12="MEDIA";0;1))`

- Nos situamos en la celda D13:
`=SI(D12="";"";SI(D12=C12;C13+1;SI(D12="MEDIA";C13;1)))`

- Y arrastramos desde la celda D13 hasta la celda AA13.

- Nos situamos en la celda C14 para saber si hay 7 puntos consecutivos por encima:
`=SI(C12="SI";SI(MAX(C13:I13)>=7;C4;"");"")`

- Y arrastramos desde la celda C14 hasta la celda AA14.

- Nos situamos en la celda C15, para saber si hay 7 puntos consecutivos por debajo:
`=SI(C12="NO";SI(MAX(C13:I13)>=7;C4;"");"")`

- Y arrastramos desde la celda C15 hasta la celda AA15.

e. Racha de al menos 7 puntos consecutivos de forma ascendente o descendente:

- Nos situamos en la celda C16:
`=SI(C5="";"";"X")`

- Nos situamos en la celda D16:
`=SI(D5="";"";SI('Recorrido Paso 1!C2>'Recorrido Paso 1!B2;"SI";SI('Recorrido Paso 1!C2='Recorrido Paso 1!B2;"IGUAL";"NO")))`

- Y arrastramos desde la celda D16 hasta la celda AA16.

- Nos situamos en la celda C17:
=SI(C5<>"", "X", "")
 - Nos situamos en la celda D17:
=SI(D5=""; "", 1)
 - Nos situamos en la celda E17:
=SI(E5=""; "", SI(E16=D16; D17+1; SI(E16="IGUAL"; D17; 1)))
 - Y arrastramos desde la celda E17 hasta la celda AA17.
 - Nos situamos en la celda C18:
=SI(C16="SI"; SI(MAX(C17:I17)>=7; C4; ""); "")
 - Y arrastramos desde la celda C18 hasta la celda AA18.
 - Nos situamos en la celda C19:
=SI(C16="NO"; SI(MAX(C17:I17)>=7; C4; ""); "")
 - Y arrastramos desde la celda C19 hasta la celda AA19.
- f. Al menos hay 11 puntos consecutivos de los cuales 10 se comportan como una racha y solo 1 la rompe (racha de puntos consecutivos por encima de la media):
- Nos situamos en la celda C20:
=SI(C5=""; "", CONTAR.SI(C12:M12; "SI"))
 - Nos situamos en la celda D20:
=SI(D5=""; "", MAX(CONTAR.SI(C12:M12; "SI"); CONTAR.SI(D12:N12; "SI")))
 - Nos situamos en la celda E20:
=SI(E5=""; "", MAX(CONTAR.SI(C12:M12; "SI"); CONTAR.SI(D12:N12; "SI"); CONTAR.SI(E12:O12; "SI")))
 - Nos situamos en la celda F20:
=SI(F5=""; "", MAX(CONTAR.SI(C12:M12; "SI"); CONTAR.SI(D12:N12; "SI"); CONTAR.SI(E12:O12; "SI"); CONTAR.SI(F12:P12; "SI")))
 - Nos situamos en la celda G20:

=SI(G5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI")))

- Nos situamos en la celda H20:
=SI(H5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI")))
- Nos situamos en la celda I20:
=SI(I5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI");CONTAR.SI(I12:S12;"SI")))
- Nos situamos en la celda J20:
=SI(J5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI");CONTAR.SI(I12:S12;"SI");CONTAR.SI(J12:T12;"SI")))
- Nos situamos en la celda K20:
=SI(K5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI");CONTAR.SI(I12:S12;"SI");CONTAR.SI(J12:T12;"SI");CONTAR.SI(K12:U12;"SI")))
- Nos situamos en la celda L20:
=SI(L5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI");CONTAR.SI(I12:S12;"SI");CONTAR.SI(J12:T12;"SI");CONTAR.SI(K12:U12;"SI");CONTAR.SI(L12:V12;"SI")))
- Nos situamos en la celda M20:
=SI(M5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"SI");CONTAR.SI(D12:N12;"SI");CONTAR.SI(E12:O12;"SI");CONTAR.SI(F12:P12;"SI");CONTAR.SI(G12:Q12;"SI");CONTAR.SI(H12:R12;"SI");CONTAR.SI(I12:S12;"SI");CONTAR.SI(J12:T12;"SI");CONTAR.SI(K12:U12;"SI");CONTAR.SI(L12:V12;"SI");CONTAR.SI(M12:W12;"SI")))
- Y arrastramos desde la celda M20 hasta la celda AA20.
- Nos situamos en la celda C22:

=SI(C5="";"";SI(C20>=10;C4;""))

- Y arrastramos desde la celda C22 hasta la celda AA22.

g. Al menos hay 11 puntos consecutivos de los cuales 10 se comportan como una racha y solo 1 la rompe (racha de puntos consecutivos por debajo de la media):

- Nos situamos en la celda C21:

=SI(C5="";"";CONTAR.SI(C12:M12;"NO"))

- Nos situamos en la celda D21:

=SI(D5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO")))

- Nos situamos en la celda E21:

=SI(E5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO")))

- Nos situamos en la celda F21:

=SI(F5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO")))

- Nos situamos en la celda G21:

=SI(G5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO")))

- Nos situamos en la celda H21:

=SI(H5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO")))

- Nos situamos en la celda I21:

=SI(I5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO");CONTAR.SI(I12:S12;"NO")))

- Nos situamos en la celda J21:

=SI(J5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");C

ONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO");CONTAR.SI(I12:S12;"NO");CONTAR.SI(J12:T12;"NO"))

- Nos situamos en la celda K21:
=SI(K5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO");CONTAR.SI(I12:S12;"NO");CONTAR.SI(J12:T12;"NO");CONTAR.SI(K12:U12;"NO"))
- Nos situamos en la celda L21:
=SI(L5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO");CONTAR.SI(I12:S12;"NO");CONTAR.SI(J12:T12;"NO");CONTAR.SI(K12:U12;"NO");CONTAR.SI(L12:V12;"NO"))
- Nos situamos en la celda M21:
=SI(M5="";"";MAX(CONTAR.SI(C12:M12;"NO");CONTAR.SI(D12:N12;"NO");CONTAR.SI(E12:O12;"NO");CONTAR.SI(F12:P12;"NO");CONTAR.SI(G12:Q12;"NO");CONTAR.SI(H12:R12;"NO");CONTAR.SI(I12:S12;"NO");CONTAR.SI(J12:T12;"NO");CONTAR.SI(K12:U12;"NO");CONTAR.SI(L12:V12;"NO");CONTAR.SI(M12:W12;"NO"))
- Y arrastramos desde la celda M21 hasta la celda AA21.
- Nos situamos en la celda C23:
=SI(C5="";"";SI(C21>=10;C4;""))
- Y arrastramos desde la celda C23 hasta la celda AA23.

h. Al menos hay 11 puntos consecutivos de los cuales 10 se comportan como una racha y solo 1 la rompe (racha creciente):

- Nos situamos en la celda C24:
=SI(C5="";"";CONTAR.SI(C16:M16;"SI"))
- Nos situamos en la celda D24:
=SI(D5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI"))
- Nos situamos en la celda E24:

=SI(E5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI")))

- Nos situamos en la celda F24:
=SI(F5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI")))
- Nos situamos en la celda G24:
=SI(G5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI")))
- Nos situamos en la celda H24:
=SI(H5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI")))
- Nos situamos en la celda I24:
=SI(I5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI");CONTAR.SI(I16:S16;"SI")))
- Nos situamos en la celda J24:
=SI(J5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI");CONTAR.SI(I16:S16;"SI");CONTAR.SI(J16:T16;"SI")))
- Nos situamos en la celda K24:
=SI(K5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI");CONTAR.SI(I16:S16;"SI");CONTAR.SI(J16:T16;"SI");CONTAR.SI(K16:U16;"SI")))
- Nos situamos en la celda L24:
=SI(L5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI");CONTAR.SI(I16:S16;"SI");CONTAR.SI(J16:T16;"SI");CONTAR.SI(K16:U16;"SI");CONTAR.SI(L16:V16;"SI")))
- Nos situamos en la celda M24:

=SI(M5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"SI");CONTAR.SI(D16:N16;"SI");CONTAR.SI(E16:O16;"SI");CONTAR.SI(F16:P16;"SI");CONTAR.SI(G16:Q16;"SI");CONTAR.SI(H16:R16;"SI");CONTAR.SI(I16:S16;"SI");CONTAR.SI(J16:T16;"SI");CONTAR.SI(K16:U16;"SI");CONTAR.SI(L16:V16;"SI");CONTAR.SI(M16:W16;"SI"))

- Y arrastramos desde la celda M24 hasta la celda AA24.
- Nos situamos en la celda C26:
=SI(C5="";"";SI(C24>=10;C4;""))
- Y arrastramos desde la celda C26 hasta la celda AA26.
- i. Al menos hay 11 puntos consecutivos de los cuales 10 se comportan como una racha y solo 1 la rompe (racha decreciente):
 - Nos situamos en la celda C25:
=SI(C5="";"";CONTAR.SI(C16:M16;"NO"))
 - Nos situamos en la celda D25:
=SI(D5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO")))
 - Nos situamos en la celda E25:
=SI(E5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO")))
 - Nos situamos en la celda F25:
=SI(F5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO")))
 - Nos situamos en la celda G25:
=SI(G5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO")))
 - Nos situamos en la celda H25:
=SI(H5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO")))
 - Nos situamos en la celda I25:

=SI(I5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO");CONTAR.SI(I16:S16;"NO")))

- Nos situamos en la celda J25:

=SI(J5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO");CONTAR.SI(I16:S16;"NO");CONTAR.SI(J16:T16;"NO")))

- Nos situamos en la celda K25:

=SI(K5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO");CONTAR.SI(I16:S16;"NO");CONTAR.SI(J16:T16;"NO");CONTAR.SI(K16:U16;"NO")))

- Nos situamos en la celda L25:

=SI(L5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO");CONTAR.SI(I16:S16;"NO");CONTAR.SI(J16:T16;"NO");CONTAR.SI(K16:U16;"NO");CONTAR.SI(L16:V16;"NO")))

- Nos situamos en la celda M25:

=SI(M5="";"";MAX(CONTAR.SI(C16:M16;"NO");CONTAR.SI(D16:N16;"NO");CONTAR.SI(E16:O16;"NO");CONTAR.SI(F16:P16;"NO");CONTAR.SI(G16:Q16;"NO");CONTAR.SI(H16:R16;"NO");CONTAR.SI(I16:S16;"NO");CONTAR.SI(J16:T16;"NO");CONTAR.SI(K16:U16;"NO");CONTAR.SI(L16:V16;"NO");CONTAR.SI(M16:W16;"NO")))

- Y arrastramos desde la celda M25 hasta la celda AA25.

- Nos situamos en la celda C27:

=SI(C5="";"";SI(C25>=10;C4;""))

- Y arrastramos desde la celda C27 hasta la celda AA27.

j. Puntos fuera de los límites de control:

- Nos situamos en la celda C28:

=FILTRAR('Recorrido Paso 3'!B26:Z26;ESNUMERO('Recorrido Paso 3'!B26:Z26);''')

Y ya habríamos terminado el informe de Recorridos, tras este laborioso proceso podríamos obtener todas las pautas y rachas de nuestro gráfico de Recorridos. Posteriormente crearemos una macro que nos las muestre por pantalla.

Ahora sí podemos pasar al gráfico e informe de Medias.

5.2.7 MEDIAS PASO 1

En el siguiente apartado nos vamos a centrar en realizar el gráfico de control de medias, para ello vamos a calcular los límites de control y las diferentes zonas del SPC, para posteriormente, poder realizar el Informe de Medias como hemos hecho con el de Recorridos. Lo realizaremos en 3 pasos.

1º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R	6	10,75		10,25	10,75		4,25	2,75	3	5	3,25	6,25	3,5	6,05	5,5	4,75	8,5	4,5	7	11	10,75		7	8,25	6,5
X	17,542	18,1		15,783	15,207		18,375	12,3	11,75	12,95	12,7	12,042	11,375	11,842	13,375	14,35	13,35	19	17,375	16,2	16,25		17,917	16,667	11,875
	Recorrido Medio			6,6159	X Medio			14,833																	
n	6	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6
A ₂	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483
D ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D ₄	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004
LCS	18,028	18,65	18,028	18,028	18,028	18,028	18,65	18,65	18,65	18,65	18,028	18,028	18,028	18,028	18,65	18,65	18,028	18,028	18,65	18,65	18,028	18,028	18,028	18,028	18,028
LCI	11,637	11,015	11,637	11,637	11,637	11,637	11,015	11,015	11,015	11,015	11,637	11,637	11,637	11,637	11,015	11,015	11,637	11,637	11,015	11,015	11,637	11,637	11,637	11,637	11,637
σ	1,0652	1,2725	1,0652	1,0652	1,0652	1,0652	1,0652	1,2725	1,2725	1,2725	1,2725	1,0652	1,0652	1,0652	1,0652	1,2725	1,2725	1,0652	1,0652	1,2725	1,2725	1,0652	1,0652	1,0652	1,0652
Lze	16,963	17,378	16,963	16,963	16,963	16,963	16,963	17,378	17,378	17,378	17,378	16,963	16,963	16,963	16,963	17,378	17,378	16,963	16,963	17,378	17,378	16,963	16,963	16,963	16,963
Lte	15,898	16,105	15,898	15,898	15,898	15,898	15,898	16,105	16,105	16,105	16,105	15,898	15,898	15,898	15,898	16,105	16,105	15,898	15,898	16,105	16,105	15,898	15,898	15,898	15,898
Lze	13,768	13,56	13,768	13,768	13,768	13,768	13,56	13,56	13,56	13,56	13,768	13,768	13,768	13,768	13,56	13,56	13,768	13,768	13,56	13,56	13,768	13,768	13,768	13,768	13,768
Lze	12,703	12,288	12,703	12,703	12,703	12,703	12,288	12,288	12,288	12,288	12,288	12,703	12,703	12,703	12,703	12,288	12,288	12,703	12,703	12,288	12,288	12,288	12,703	12,703	12,703
X	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833	14,833
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	IN	IN	X	IN	IN	X	OUT	IN	X	IN	IN	IN													

Figura 53: Medias Paso 1. Elaboración propia.

Vamos a seguir un procedimiento similar al SPC de Recorridos

1. Lo primero es calcular el Recorrido y Media de las muestras que no han sido eliminadas:

a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

=SI(O('Recorrido Paso 3'!B2<'Recorrido Paso 3'!B13;'Recorrido Paso 3'!B2>'Recorrido Paso 3'!B12);'';'Recorrido Paso 3'!B2)

- b. Para calcular la media de la muestra 1 (celda B3):

=SI(O('Recorrido Paso 3'!B2<'Recorrido Paso 3'!B13;'Recorrido Paso 3'!B2>'Recorrido Paso 3'!B12);"";'Recorrido Paso 3'!B3)

- Y arrastramos las celdas B2:B3 hasta las celdas Z2:Z3

2. Así podremos calcular el recorrido medio (celda E5):

=PROMEDIO(B2:Z2)

3. Y también calculamos la X media (celda J5):

=PROMEDIO(B3:Z3)

4. Como las constantes las hemos calculado anteriormente y las fórmulas son las mismas podemos copiar y pegar de otras hojas, nos vamos a la hoja de “Recorrido Paso 1” y copiamos las celdas desde B7 hasta Z10 y las pegamos en nuestra hoja “Medias Paso 1” en las celdas B7:Z10.

5. Una vez tenemos las constantes podemos calcular los límites de control del gráfico de control de medias:

- a. Para el Límite de Control Superior de la muestra nº1 (celda B12):

=SI(B7=0;""; \$J\$5+B8*\$E\$5)

- b. Para el Límite de Control Inferior de la muestra nº1 (celda B13):

=SI(B7=0;""; \$J\$5-B8*\$E\$5)

Aclaración: B7 corresponde al tamaño de la muestra nº1, J5 = X Medio, B8 = A2 y E5 = Recorrido medio.

6. Lo siguiente es calcular las zonas del SPC:

- a. Lo primero es calcular σ de la muestra nº1 (celda B15):

=SI(B7=0;""; (B8*\$E\$5)/3)

- b. Ahora podemos calcular las zonas, empezamos por $L_{2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B17):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5+2*B15)$$

- c. $L_{1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B18):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5+B15)$$

- d. $L_{-1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B19):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5-B15)$$

- e. $L_{-2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B20):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5-2*B15)$$

- f. X Medio de la muestra nº1 (celda B21):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5)$$

Una vez calculadas las zonas de nuestro gráfico de control de Medias para la muestra nº1, para calcular para las demás muestras es tan fácil como arrastrar desde B12:B21 (celdas que corresponden a la muestra nº1) hasta las celdas Z12:Z21 (celdas que corresponden a la muestra nº25).

7. Por últimos, si quisiéramos saber que muestras están dentro y cuales fuera de nuestros límites de control podríamos hacer (celda B25 y arrastrar hasta la celda Z25):

$$=SI(B3="";"X";SI(O(B3<B13;B3>B12);"OUT";SI(O(B3>B13;B3<B12);"IN")))$$

Incluir formato condicional si se quisiera un diseño más visual.

5.2.8 MEDIAS PASO 2

En la siguiente hoja se deben eliminar los puntos que han quedado fuera de los límites en el anterior apartado, que como sabemos se realiza en 3 pasos.

2º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R	6	10,75		10,25	10,75			2,75	3	5	3,25	6,25		6,05	5,5	4,75	8,5		7	11	10,75		7	8,25	6,5
X	17,542	18,1		15,783	15,207			12,3	11,75	12,95	12,7	12,042		11,842	13,375	14,35	13,35		17,375	16,2	16,25		17,917	16,667	11,875
	Recorrido Medio			7,0158	X Medio			14,609																	
n	6	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6
A2	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483
D3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004
LCS	17,998	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998	17,998	18,657	18,657	18,657	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998	18,657	18,657	17,998	17,998	18,657	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998
LCI	11,22	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22	11,22	10,561	10,561	10,561	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22	10,561	10,561	11,22	11,22	10,561	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22
σ	1,1295	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295
L2σ	16,868	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868	16,868	17,308	17,308	17,308	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868	17,308	17,308	16,868	16,868	17,308	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868
L1σ	15,739	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739	15,739	15,958	15,958	15,958	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739	15,958	15,958	15,739	15,739	15,958	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739
L1σ	13,48	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48	13,26	13,26	13,26	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48	13,26	13,26	13,48	13,48	13,26	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48
L2σ	12,35	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35	11,91	11,91	11,91	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35	11,91	11,91	12,35	12,35	11,91	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35
X	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	IN	IN	X	IN	IN	X	X	IN	IN	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN

Figura 54: Medias Paso 2. Elaboración propia.

Como vemos el diseño es similar y solo se han eliminado los puntos fuera, junto los eliminado anteriormente en el proceso de gráfico de recorridos, por lo que en esta hoja:

1. Eliminar los puntos fuera de los límites de control, por ello, la fórmula que se utilizará ahora donde los recorridos y medias será:

- a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

$$=SI(O('Medias Paso 1'!B3<'Medias Paso 1'!B13;'Medias Paso 1'!B3>'Medias Paso 1'!B12);'';'Medias Paso 1'!B2)$$

- b. Para la Media de la muestra 1 (celda B3):

$$=SI(O('Medias Paso 1'!B3<'Medias Paso 1'!B13;'Medias Paso 1'!B3>'Medias Paso 1'!B12);'';'Medias Paso 1'!B3)$$

- c. Y arrastramos desde las celdas B2:B3 hasta las celdas Z2:Z3 para las demás muestras.

2. Para el resto tendríamos que copiar y pegar las celdas A4:Z25 de la anterior hoja, Medias Paso 1.

5.2.9 MEDIAS PASO 3

Ya en el tercer y último paso antes del informe de medias, creamos otra hoja donde vamos a eliminar los puntos que han quedado fuera de los límites en el anterior apartado, para posteriormente, realizar nuestro SPC de medias.

3º Paso:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R	6	10,75		10,25	10,75			2,75	3	5	3,25	6,25		6,05	5,5	4,75	8,5		7	11	10,75		7	8,25	6,5
X	17,542	18,1		15,783	15,207			12,3	11,75	12,95	12,7	12,042		11,842	13,375	14,35	13,35		17,375	16,2	16,25		17,917	16,667	11,875
	Recorrido Medio			7,0158	X Medio			14,609																	
n	6	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	6	6
A2	0,483	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483
D3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	2,004	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004
LCS	17,998	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998	17,998	18,657	18,657	18,657	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998	18,657	18,657	17,998	17,998	18,657	18,657	17,998	17,998	17,998	17,998
LCI	11,22	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22	11,22	10,561	10,561	10,561	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22	10,561	10,561	11,22	11,22	10,561	10,561	11,22	11,22	11,22	11,22
σ	1,1295	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,3494	1,3494	1,1295	1,1295	1,1295	1,1295
L2σ	16,868	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868	16,868	17,308	17,308	17,308	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868	17,308	17,308	16,868	16,868	17,308	17,308	16,868	16,868	16,868	16,868
L1σ	15,739	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739	15,739	15,958	15,958	15,958	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739	15,958	15,958	15,739	15,739	15,958	15,958	15,739	15,739	15,739	15,739
L-1σ	13,48	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48	13,26	13,26	13,26	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48	13,26	13,26	13,48	13,48	13,26	13,26	13,48	13,48	13,48	13,48
L-2σ	12,35	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	11,91	11,91	11,91	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35	11,91	11,91	12,35	12,35	11,91	11,91	12,35	12,35	12,35	12,35
X	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609	14,609
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	IN	IN	X	IN	IN	X	X	IN	IN	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN	X	IN	IN	IN

Figura 55: Medias Paso 3. Elaboración propia.

Como vemos el diseño vuelvo a ser similar, hemos eliminado los puntos fuera y todos los puntos quedarían dentro de nuestros límites, por lo que en esta hoja solo tendremos que:

1. Eliminar los puntos fuera de los límites de control, por ello, la fórmula que usaremos ahora donde los recorridos y medias será:

- a. Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

$$=SI(O('Medias Paso 2'!B3<'Medias Paso 2'!B13;'Medias Paso 2'!B3>'Medias Paso 2'!B12);"";'Medias Paso 2'!B2)$$

- b. Para la Media de la muestra 1 (celda B3):

$$=SI(O('Medias Paso 2'!B3<'Medias Paso 2'!B13;'Medias Paso 2'!B3>'Medias Paso 2'!B12);"";'Medias Paso 2'!B3)$$

- c. Y arrastramos desde las celdas B2:B3 hasta las celdas Z2:Z3 para las demás muestras.

2. Para el resto tendríamos que copiar y pegar las celdas A4:Z25 de las anteriores hojas, Medias Paso 1 o Medias Paso 2.

Una vez realizada estas tres hojas de Medias ya podemos realizar nuestro gráfico de control de Medias con Excel, para ello:

- Seleccionamos las LCS, LCI, $L_{2\sigma}$, $L_{1\sigma}$, $L_{-1\sigma}$ y $L_{-2\sigma}$ de cada muestra en nuestra hoja “Medias Paso 3”.

- Insertamos nuestro gráfico de líneas.
- Añadimos la serie de valores correspondientes a las medias de cada muestra en nuestra hoja “Recorrido Paso 1”, dando a seleccionar datos y posteriormente a agregar. Y ya tendríamos nuestro gráfico de control de Medias.
- Estilizar a nuestro gusto.

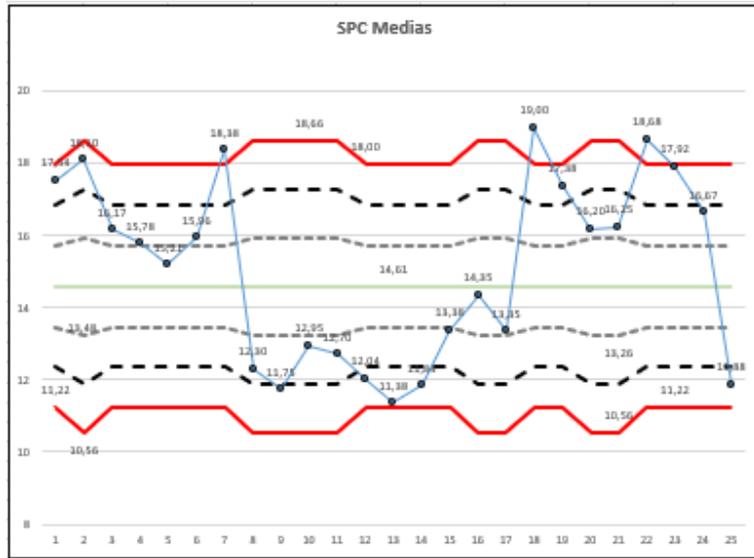


Figura 56: Gráfico de control de Medias. Elaboración propia.

5.2.10 INFORME MEDIAS

Una vez hemos realizado los 3 pasos para eliminar todos los puntos fuera de los límites y poder realizar el Gráfico de Control de Medias, de manera similar como hicimos con el informe de Recorridos vamos a analizar dicho gráfico, esta es la función de esta nueva hoja que hemos creado.

Este es el diseño que hemos elegido:

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
¿En qué zona está?	A+	A+	B+	B+	C+	B+	OUT	B-	A-	B-	B-	A-	A-	B-	C-	C-	OUT	A+	B+	B+	OUT	A+	B+	A-	
Pauta A o más allá	1	2	3				7	8	9		11	12	13	14	15		17	18	19	20	21	22	23	24	25
Pauta B o más allá inferior	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Pauta B o más allá superior	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
7 puntos consecutivos por debajo	SI																								
7 puntos consecutivos por encima	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Racha de 7 Creciente	X	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	
Racha de 7 Decreciente	X	1	1	2	3	1	2	1	2	1	1	2	3	1	2	3	1	1	1	2	1	2	1	2	
	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	8	7	6	5	
							7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18							
	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	

Figura 57: Informe gráfico de Medias. Elaboración propia.

Al igual que en el informe de Recorridos es una hoja muy laboriosa y va a requerir de fórmulas bastante complejas, pero podemos copiar y pegar bastantes partes de

la hoja “Informe Recorrido”. En el diseño que hemos realizado, donde pone “MUESTRA” es la celda B4 para ubicarnos mejor. Empezamos:

1. Lo primero que vamos a hacer es ver en qué zona está cada muestra, para la muestra nº1 (celda C5) ponemos la fórmula:

```
=SI(CONTAR(Hoja1!B3:B12=0);"";SI(O('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B12;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B13);"OUT";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B17;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B12);"A+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B18;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B17);"B+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B21;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B18);"C+";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B19;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B21);"C-";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B20;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B19);"B-";SI(Y('Recorrido Paso 1!B3>'Medias Paso 3!B13;'Recorrido Paso 1!B3<'Medias Paso 3!B20);"A-"))))))))
```

Está fórmula nos indicará en qué zona está la muestra nº1 y si arrastramos hasta la celda AA5 sabremos en qué zona está la muestra (hasta la nº25).

2. Sabiendo la zona en la que está cada muestra, podemos empezar a calcular las Pautas y Rachas de manera automática.

- a. Pauta en zona A o más allá.
 - Esta pauta la podemos calcular igual que en el Informe de Recorridos por lo que copiamos desde la celda C6:C7 hasta las celdas AA6:AA7 de la hoja “Informe Recorrido” y pegamos en nuestra celda C6 de la hoja “Informe Medias”.
- b. Pauta en zona B o más allá. Al menos hay 4 puntos de 5 consecutivos en la Zona B o más allá, por encima o debajo de la media:
 - Al igual que antes esta pauta la podemos calcular igual que en el Informe de Recorridos por lo que copiamos desde la celda C8:C11 hasta las celdas AA8:AA11 de la hoja “Informe Recorrido” y pegamos en nuestra celda C8 de la hoja “Informe Medias”.

c. Existen al menos 7 puntos consecutivos por encima o debajo de la media:

- Esta parte ya es ligeramente distinta, nos situamos en la celda C12:

```
=SI(C5="";"";SI('Recorrido Paso 1!'B3>'Medias Paso
3!'B21;"SI";SI('Recorrido Paso 1!'B3<'Medias Paso
3!'B21;"NO";"MEDIA"))
```

- Y arrastramos desde la celda C12 hasta la celda AA12.

- Nos situamos en la celda C13:

```
=SI(C12="";"";SI(C12="MEDIA";0;1))
```

- Nos situamos en la celda D13:

```
=SI(D12="";"";SI(D12=C12;C13+1;SI(D12="MEDIA";C13;1)))
```

- Y arrastramos desde la celda D13 hasta la celda AA13.

- Nos situamos en la celda C14 para saber si hay 7 puntos consecutivos por encima:

```
=SI(C12="SI";SI(MAX(C13:I13)>=7;C4;"");"")
```

- Y arrastramos desde la celda C14 hasta la celda AA14.

- Nos situamos en la celda C15, para saber si hay 7 puntos consecutivos por debajo:

```
=SI(C12="NO";SI(MAX(C13:I13)>=7;C4;"");"")
```

- Y arrastramos desde la celda C15 hasta la celda AA15.

d. Racha de al menos 7 puntos consecutivos de forma ascendente o descendente:

- Nos situamos en la celda C16:

```
=SI(C5="";"";"X")
```

- Nos situamos en la celda D16:

```
=SI(D5="";"";SI('Recorrido Paso 1!'C3>'Recorrido Paso
1!'B3;"SI";SI('Recorrido Paso 1!'C3='Recorrido Paso
1!'B3;"IGUAL";"NO"))
```

- Y arrastramos desde la celda D16 hasta la celda AA16.

- Nos situamos en la celda C17:
=SI(C5<>"", "X", "")
 - Nos situamos en la celda D17:
=SI(D5=""; "", 1)
 - Nos situamos en la celda E17:
=SI(E5=""; "", SI(E16=D16; D17+1; SI(E16="IGUAL"; D17; 1)))
 - Y arrastramos desde la celda E17 hasta la celda AA17.
 - Nos situamos en la celda C18:
=SI(C16="SI"; SI(MAX(C17:I17)>=7; C4; ""); "")
 - Y arrastramos desde la celda C18 hasta la celda AA18.
 - Nos situamos en la celda C19:
=SI(C16="NO"; SI(MAX(C17:I17)>=7; C4; ""); "")
 - Y arrastramos desde la celda C19 hasta la celda AA19.
- e. Al menos hay 11 puntos consecutivos de los cuales 10 se comportan como una racha y solo 1 la rompe:
- Al igual que antes esta pauta/racha podemos calcularla igual que en el Informe de Recorridos por lo que copiamos desde la celda C20:C27 hasta las celdas AA20:AA27 de la hoja “Informe Recorrido” y pegamos en nuestra celda C20 de la hoja “Informe Medias”.
- f. Puntos fuera de los límites de control:
- Nos situamos en la celda C28:
=FILTRAR('Medias Paso 3'!B26:Z26; ESNUMERO('Medias Paso 3'!B26:Z26); "")

Una vez hecho los informes de Recorridos y Medias, podemos realizar las operaciones de seguimiento para posteriormente programar las macros que nos saquen por pantalla todo el informe y gráficos de manera automática.

5.2.11 OPERACIONES SEGUIMIENTO

Una vez programados los informes de Recorridos y de Medias, nos vamos a centrar en las operaciones de seguimiento. La aplicación está diseñada para analizar un extra de dos muestras más para mantener el control. Esta hoja de cálculo está diseñada para realizar el seguimiento de 2 muestras de control en el caso de que se insertasen sus datos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
R			11	12,25	12,35	9,25	8,5	4,75	5,1	3,75	4,58	4,5	5,06	3,39	6,7	6,75	10,75	10,25	7	9	10				6,25	11,75		
X			32,042	31,958	31,625	32,254	33,59	31,07	31,17	30,95	30,266	29,862	30,26	31,315	31,033	30,93	30,35	33,292	31,833	31,8	31,8				32,45	35,583	34,833	
			Recorrido Medio			7,709							X Medio			31,493												
n	5	5	6	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	5	5	6	6	
Az	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,483	0,483	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	0,577	0,577	0,483	0,483	
Ds	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ds	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,114	2,114	2,114	2,114	2,114	2,004	2,004	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	2,114	2,114	2,004	2,004	
RECORRIDOS																												
LCS	16,297	16,297	15,449	15,449	15,449	16,297	16,297	16,297	16,297	16,297	16,297	15,449	15,449	15,449	15,449	16,297	16,297	15,449	15,449	16,297	16,297	15,449	15,449	16,297	16,297	15,449	15,449	
LO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
u	2,8626	2,8626	2,5799	2,5799	2,5799	2,8626	2,8626	2,8626	2,8626	2,8626	2,8626	2,5799	2,5799	2,5799	2,5799	2,8626	2,8626	2,5799	2,5799	2,8626	2,8626	2,5799	2,5799	2,8626	2,8626	2,5799	2,5799	
L2s	13,434	13,434	12,869	12,869	12,869	13,434	13,434	13,434	13,434	13,434	13,434	12,869	12,869	12,869	12,869	13,434	13,434	12,869	12,869	13,434	13,434	12,869	12,869	13,434	13,434	12,869	12,869	
Lk	10,572	10,572	10,289	10,289	10,289	10,572	10,572	10,572	10,572	10,572	10,572	10,289	10,289	10,289	10,289	10,572	10,572	10,289	10,289	10,572	10,572	10,289	10,289	10,572	10,572	10,289	10,289	
L-k	4,8464	4,8464	5,1291	5,1291	5,1291	4,8464	4,8464	4,8464	4,8464	4,8464	4,8464	5,1291	5,1291	5,1291	5,1291	4,8464	4,8464	5,1291	5,1291	4,8464	4,8464	5,1291	5,1291	4,8464	4,8464	5,1291	5,1291	
L-2s	1,9838	1,9838	2,5491	2,5491	2,5491	1,9838	1,9838	1,9838	1,9838	1,9838	1,9838	2,5491	2,5491	2,5491	2,5491	1,9838	1,9838	2,5491	2,5491	1,9838	1,9838	2,5491	2,5491	1,9838	1,9838	2,5491	2,5491	
R	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	7,709	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
X	X	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	
MEDIAS																												
LCS	35,941	35,941	35,216	35,216	35,216	35,941	35,941	35,941	35,941	35,941	35,941	35,216	35,216	35,216	35,216	35,941	35,941	35,216	35,216	35,941	35,941	35,216	35,216	35,941	35,941	35,216	35,216	
LO	27,044	27,044	27,769	27,769	27,769	27,044	27,044	27,044	27,044	27,044	27,044	27,769	27,769	27,769	27,769	27,044	27,044	27,769	27,769	27,044	27,044	27,769	27,769	27,044	27,044	27,769	27,769	
u	1,4827	1,4827	1,2411	1,2411	1,2411	1,4827	1,4827	1,4827	1,4827	1,4827	1,4827	1,2411	1,2411	1,2411	1,2411	1,4827	1,4827	1,2411	1,2411	1,4827	1,4827	1,2411	1,2411	1,4827	1,4827	1,2411	1,2411	
L2s	34,458	34,458	33,975	33,975	33,975	34,458	34,458	34,458	34,458	34,458	34,458	33,975	33,975	33,975	33,975	34,458	34,458	33,975	33,975	34,458	34,458	33,975	33,975	34,458	34,458	33,975	33,975	
Lk	32,975	32,975	32,734	32,734	32,734	32,975	32,975	32,975	32,975	32,975	32,975	32,734	32,734	32,734	32,734	32,975	32,975	32,734	32,734	32,975	32,975	32,734	32,734	32,975	32,975	32,734	32,734	
L-k	30,01	30,01	30,251	30,251	30,251	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,251	30,251	30,251	30,251	30,01	30,01	30,251	30,251	30,01	30,01	30,251	30,251	30,01	30,01	30,251	30,251	
L-2s	28,527	28,527	29,01	29,01	29,01	28,527	28,527	28,527	28,527	28,527	28,527	29,01	29,01	29,01	29,01	28,527	28,527	29,01	29,01	28,527	28,527	29,01	29,01	28,527	28,527	29,01	29,01	
X	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	31,493	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
X	X	X	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	

Figura 58: Operaciones seguimiento. Elaboración propia.

Vamos a seguir un procedimiento similar al SPC de Recorridos y Medias:

- Lo primero es calcular el Recorrido y Media de las muestras que no han sido eliminadas en los pasos anteriores:

- Para el Recorrido de la muestra 1 (celda B2):

$$=SI(O('Medias Paso 3'!B3<'Medias Paso 3'!B13;'Medias Paso 3'!B3>'Medias Paso 3'!B12);"";'Medias Paso 3'!B2)$$

- Para calcular la media de la muestra 1 (celda B3):

$$=SI(O('Medias Paso 3'!B3<'Medias Paso 3'!B13;'Medias Paso 3'!B3>'Medias Paso 3'!B12);"";'Medias Paso 3'!B3)$$

- Y arrastramos las celdas B2:B3 hasta las celdas AC2:AC3

2. Así podremos calcular el recorrido medio (celda E5):

=PROMEDIO(B2:Z2)

3. Y también calculamos la X media (celda J5):

=PROMEDIO(B3:Z3)

4. Como las constantes las hemos calculado anteriormente y las fórmulas son las mismas podemos copiar y pegar de otras hojas, nos vamos a la hoja de “Recorrido Paso 1” y copiamos las celdas desde B7 hasta B10 y las pegamos en nuestra hoja “Operaciones Seguimiento”, arrastramos hasta AC7:AC10.

5. Una vez tenemos las constantes podemos calcular los límites de control del gráfico de control del seguimiento, empezamos por el de recorrido:

- a. Para el Límite de Control Superior de la muestra nº1 (celda B14):

=SI(B7=0;"";\$E\$5*B10)

- b. Para el Límite de Control Inferior de la muestra nº1 (celda B15):

=SI(B7=0;"";\$E\$5*B9)

6. Lo siguiente es calcular las zonas del SPC:

- a. Lo primero es calcular σ de la muestra nº1 (celda B17):

=SI(B7=0;"";(B14-\$E\$5)/3)

- b. Ahora podemos calcular las zonas, empezamos por $L_{2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B19):

=SI(B7=0;"";\$E\$5+2*B17)

- c. $L_{1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B20):

=SI(B7=0;"";\$E\$5+B17)

- d. $L_{-1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B21):

=SI(B7=0;"";\$E\$5-B17)

- e. $L_{-2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B22):

$$=SI(B7=0;"";\$E\$5-2*B17)$$

- f. Recorrido Medio de la muestra nº1 (celda B23):

$$=SI(B7=0;"";\$E\$5)$$

Una vez calculadas las zonas de nuestro gráfico de control de seguimiento de Recorridos para la muestra nº1, para calcular para las demás muestras es tan fácil como arrastrar desde B14:B23 (celdas que corresponden a la muestra nº1) hasta las celdas AC14:AC23 (celdas que corresponden a la muestra nº27 de control).

7. Por últimos, si quisiéramos saber que muestras están dentro y cuales fuera de nuestros límites de control podríamos hacer (celda B26 y arrastrar hasta la celda AC26):

$$=SI(B2="";"X";SI(O(B2<B15;B2>B14);"OUT";SI(O(B2>B15;B2<B14);"IN")))$$

Incluir formato condicional si se quisiera un diseño más visual.

8. Una vez hemos calculado el valor de los límites de Recorrido para todas las muestras incluyendo las de control, vamos a realizar lo mismo para los límites de las Medias.
- a. Para el Límite de Control Superior de la muestra nº1 (celda B31):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5+B8*\$E\$5)$$

- b. Para el Límite de Control Inferior de la muestra nº1 (celda B32):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5-B8*\$E\$5)$$

9. Lo siguiente es calcular las zonas del SPC:

- a. Lo primero es calcular σ de la muestra nº1 (celda B34):

$$=SI(B7=0;"";(B8*\$E\$5)/3)$$

- b. Ahora podemos calcular las zonas, empezamos por $L_{2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B36):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5+2*B34)$$

c. $L_{1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B37):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5+B34)$$

d. $L_{-1\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B38):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5-B34)$$

e. $L_{-2\sigma}$ de la muestra nº1 (celda B39):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5-2*B34)$$

f. \bar{X} Medio de la muestra nº1 (celda B40):

$$=SI(B7=0;"";\$J\$5)$$

Una vez calculadas las zonas de nuestro gráfico de control de seguimiento de Medias para la muestra nº1, para calcular para las demás muestras es tan fácil como arrastrar desde B31:B40 (celdas que corresponden a la muestra nº1) hasta las celdas AC31:AC40 (celdas que corresponden a la muestra nº27 de control).

10. Por últimos, si quisiéramos saber que muestras están dentro y cuales fuera de nuestros límites de control podríamos hacer (celda B44 y arrastrar hasta la celda AC44):

$$=SI(B3="";"X";SI(O(B3<B32;B3>B31);"OUT";SI(O(B3>B32;B3<B31);"IN")))$$

Incluir formato condicional si se quisiera un diseño más visual.

5.2.12 PROGRAMACIÓN DE MACROS

Este proyecto también cuenta con una pequeña parte de programación, como hemos comentado antes lo vamos a realizar en el lenguaje VBA. Para ello, vamos a crear diferentes módulos y como cada uno tiene su programación correspondiente iremos tratando uno a uno, el código de cada módulo figurará en sus respectivos anexos.

5.2.11.1 MÓDULO 1

Este módulo contiene la función `CargarTXT()`, ver código en Anexo 1, la cual asignaremos a nuestro botón, realiza una serie de acciones orientadas a cargar datos desde un archivo de texto (.txt) y luego procesarlos e insertarlos a nuestra hoja de cálculo específica ("Datos de Entrada").

Declaración de Variables

- **filePath:** Almacena la ruta del archivo .txt seleccionado.
- **fileContent:** Guarda el contenido del archivo .txt.
- **fileNum:** Utilizado para identificar el archivo abierto.
- **line:** Una línea del contenido del archivo.
- **cell:** Representa una celda en la hoja de cálculo donde se insertarán los datos.
- **i y j:** Contadores para los bucles For.
- **lines y columns:** Arrays que almacenan las líneas y columnas de datos del archivo.
- **ws:** Referencia a la hoja de cálculo donde se pegarán los datos.
- **numRows y numColumns:** Contadores para el número de filas y columnas de datos.

Explicación del código

Nuestro Módulo 1 comienza seleccionando la hoja de trabajo que hemos asignado "Datos de Entrada" como el destino donde se insertarán los datos. A continuación, se muestra un cuadro de diálogo para que el usuario seleccione un archivo .txt. Si el usuario cancela la selección, la macro se detiene; de lo contrario, se abre el archivo y se lee su contenido en la variable `fileContent`, para luego cerrar el archivo.

Posteriormente, el código reemplaza las comas por puntos en el contenido del archivo para asegurar un formato numérico correcto y divide este contenido en líneas utilizando `Split` basado en saltos de línea (`vbCrLf`). A continuación, verifica que el tamaño de las muestras está dentro del rango permitido y que el número de muestras esté dentro del rango permitido.

Después de estas validaciones, el código limpia el rango de celdas B3:Z12 y AB3:AC12 en la hoja de cálculo para eliminar cualquier contenido previo, que es donde insertaremos los datos.

Establecemos la celda inicial B3 como el punto de partida para insertar los datos. Y recorremos cada línea del archivo, dividiendo las líneas en columnas y asignando los valores correspondientes a las celdas en la hoja de cálculo. Los datos se insertan en el rango especificado, con una lógica especial para las columnas 26 y 27, que se insertan en las columnas AC y AD, respectivamente.

Finalmente, la macro llama a otras subrutinas como Hojas, AdjustAxisLimits, y Grafico, que realizan tareas adicionales que veremos más adelante.

5.2.11.2 MÓDULO 2

El segundo módulo de la aplicación contiene dos funciones: ControlMuestra (hoja As Worksheet) y Hojas(), ver código en Anexo 2. La primera función, ControlMuestra (hoja As Worksheet), está diseñada para mostrar mensajes de alerta si detecta que los hay puntos fuera de nuestros límites de control.

Declaración de Variables

- **rango:** Define el rango de celdas que se van a revisar.
- **celda:** Se utiliza para iterar a través de cada celda en el rango.
- **lastValues:** Es un array estático que almacena los valores anteriores de las celdas en el rango para compararlos con los valores actuales. Tiene un tamaño de 27 elementos, que coincide con el número de celdas en el rango (P6:AP6).
- **i:** Un contador para iterar sobre las celdas en el rango.

Explicación del código

Este Módulo 2 revisa un rango específico de celdas en dos hojas de Excel ("Informe Recorrido" y "Informe Medias"), ese rango de celdas corresponde a los puntos fuera de los límites, cada vez que se actualicen los valores de ese rango de celdas se generarán alertas que indican los puntos fuera de los límites de control. La función Hojas() facilita la ejecución de esta verificación en ambas hojas de manera secuencial.

5.2.11.3 MÓDULO 3

El tercer módulo y más complejo, se va a encargar de crear una nueva hoja llamada "SPC" y en esta hoja creada va a copiar los gráficos de control que hemos creado antes en las hojas "Informe Medias" y "Informe Recorrido", los ajusta en la nueva hoja, y luego inserta las pautas y rachas que hemos calculado antes en dicho informe para presentar los resultados del control estadístico del proceso, ver código en Anexo 3.

Declaración de Variables

- Se declaran varias variables de tipo **Worksheet** y **ChartObject** para gestionar las hojas y gráficos involucrados.
- **resultado** y **resultado1** almacenan los resultados obtenidos de la función **ObtenerValores()**.

Explicación del código

Aunque este tercer módulo aparentemente parezca complejo, su única función es crear una nueva hoja de cálculo donde presentará los gráficos de control, pautas y rachas calculadas y realizadas anteriormente de una manera visual para realizar una presentación limpia del proyecto.

5.2.11.4 MÓDULO 4

El cuarto módulo de la aplicación es más sencillo, contiene la función **AdjustAxisLimits()**, ver código en Anexo 4, que está diseñada para ajustar automáticamente los límites del eje Y de nuestro gráfico de control de Medias, ya que en Excel da ligeros problemas.

Declaración de Variables

- **chart:** Es una variable de tipo **ChartObject** que representa el gráfico que se va a ajustar.
- **series:** Se utiliza para iterar sobre las series de datos dentro del gráfico.
- **minY** y **maxY:** Estas variables almacenan los valores mínimos y máximos encontrados en las series de datos.
- **i:** Es un contador para recorrer las series de datos.

Explicación del código

Esta macro automatiza el proceso de ajuste de los límites del eje Y de un gráfico en Excel, en nuestro caso el gráfico de control de Medias. Escanea todos los valores

de las series de datos dentro del gráfico, determina los valores mínimo y máximo, les aplica un margen, y luego ajusta el eje Y del gráfico en consecuencia. El objetivo de crear esta macro es garantizar que los datos se presenten de manera clara y ajustada a la escala adecuada, sin necesidad de hacerlo manualmente.

5.2.11.5 MÓDULO 5

En el quinto módulo aparecen tres funciones: `ObtenerValores`, `GenerarCadena` y `QuickSort`, ver código en Anexo 5, que trabajan en conjunto para recopilar, ordenar y procesar las pautas y rachas que hemos calculado, generando una cadena de texto.

Declaración de Variables

- **dict:** Un diccionario para almacenar valores únicos.
- **cell:** Para manejar celdas individuales en un rango.
- **rng:** Para iterar sobre diferentes rangos de celdas.
- **i:** Un contador utilizado para iterar sobre arrays.
- **pivot:** Elemento pivot para el algoritmo QuickSort.
- **temp:** Variable temporal para el intercambio de valores en QuickSort.

Explicación del código

Nuestra última macro en conjunto: Este módulo en conjunto:

- Recoge valores únicos de rangos especificados en una hoja de cálculo.
- Ordena esos valores.
- Crea una cadena de texto formateada que representa esos valores.

Vamos a utilizar este código para analizar y procesar las pautas y rachas de nuestro Excel, ya que queremos trabajar con valores únicos ordenados y presentarlos en un formato específico.

5.2.11.6 MÓDULO 6

El sexto y último módulo de la aplicación contiene la función `TablaControl()`, ver código en Anexo 6, que tiene como objetivo realizar una tabla resumen con los valores límites a medida que se van eliminando las muestras.

Declaración de Variables

- **dict:** Un diccionario para almacenar valores únicos.
- **wsOrigen:** Hoja de trabajo de origen desde la cual se extraen los datos.
- **wsDestino:** Hoja de trabajo de destino donde se creará la tabla.
- **valoresUnicos:** Colección utilizada para almacenar valores únicos extraídos de las hojas de origen.
- **celda:** Representa cada celda de la hoja de origen.
- **filaDestino:** Número de la fila donde comenzará la tabla en la hoja de destino.
- **columnaDestino:** Número de la columna donde comenzará la tabla en la hoja de destino.
- **valor:** Valor único que se encuentra en el rango de la hoja de origen.
- **col:** Representa cada celda dentro del rango para comparar los valores.
- **i:** Contador utilizado para iterar a través de las hojas de origen.
- **nombreHoja:** Nombre de la hoja de trabajo actual que se está procesando.
- **inicioColumna:** Columna inicial para combinar celdas con el nombre de la hoja.

Explicación del código

La última macro va a realizar una tabla resumen de los valores de los límites según la aplicación vaya eliminando las muestras. Para ello, el código analiza diferentes hojas de cálculo y recopila tantas columnas por hoja como tamaño de muestras diferentes existan, para posteriormente crear la tabla con los valores de los límites respectivos a cada tamaño de muestra.

CAPÍTULO VI: ESTUDIO
ECONÓMICO Y
ESTUDIO DE LOS ODS

6.1 GESTIÓN DEL PROYECTO

Bajo el supuesto ficticio de que somos una consultora, el proyecto que se nos presenta tiene la finalidad de diseñar, desarrollar e implementar un Sistema de Control Estadístico de Procesos (SPC) para una empresa líder en la producción de componentes electrónicos. Esta iniciativa nos permitirá optimizar los procesos de producción, mejorar la calidad del producto y reducir significativamente los tiempos de inactividad y los costos asociados con fallos de producción.

Como consultora especializada en la implementación de tecnologías de la Industria 4.0, hemos sido contratados para abordar este desafío. Nuestro primer paso será evaluar minuciosamente los procesos actuales para determinar las áreas cruciales donde la implementación de SPC podría tener un mayor impacto. A partir de ahí, procederemos a desarrollar un sistema personalizado a la empresa.

Se llevará a cabo una simulación detallada durante el proceso del estudio económico para reflejar los tiempos y los costos relacionados con la implementación de SPC. Vamos a realizar un análisis detallado de costos de desarrollo, instalación, capacitación del personal y mantenimiento continuo del sistema. Y posteriormente, en los siguientes apartados, presentaremos las cifras precisas de costos y tiempos para brindar una comprensión clara y detallada del impacto económico y operativo del proyecto.

6.2 JERARQUÍA EN LA GESTIÓN DEL PROYECTO

Para una empresa líder en su campo, hay que ser conscientes de la complejidad del proyecto, por eso es fundamental una buena comunicación entre las diferentes partes que van a formar nuestro equipo de proyecto. Para ello, se requiere una interacción y coordinación de información continua entre las diversas partes. El equipo de proyecto está formado por el jefe del proyecto, que en nuestro caso es el mismo que el director técnico, un ingeniero de proyecto, un técnico de desarrollo especializado en SPC y un especialista en soporte técnico y mantenimiento.

- El jefe de proyecto y a su vez el director técnico, tiene como misión asegurar el buen desarrollo del proyecto, coordinando y supervisando todas las fases del mismo, desde la planificación inicial hasta la implementación final. Este rol incluye la gestión de los recursos humanos y materiales, la supervisión de la calidad del trabajo realizado, y la garantía de que el proyecto se mantenga dentro de los plazos y presupuestos establecidos.

- El ingeniero de proyecto se encarga de supervisar la implementación técnica, resolver problemas específicos y mantener la documentación del progreso del proyecto, asegurando la calidad técnica y el cumplimiento de las normas establecidas por la empresa.
- El técnico de desarrollo especializado en SPC se encarga del desarrollo del SPC, para ello va a implementar los algoritmos específicos para mejorar la calidad y eficiencia del proceso productivo, ajustándose a las necesidades de nuestro cliente.
- El especialista en soporte técnico y mantenimiento se encargará una vez desarrollada la herramienta, de asegurar el funcionamiento continuo del sistema, solucionando problemas técnicos y brindando soporte a los usuarios.

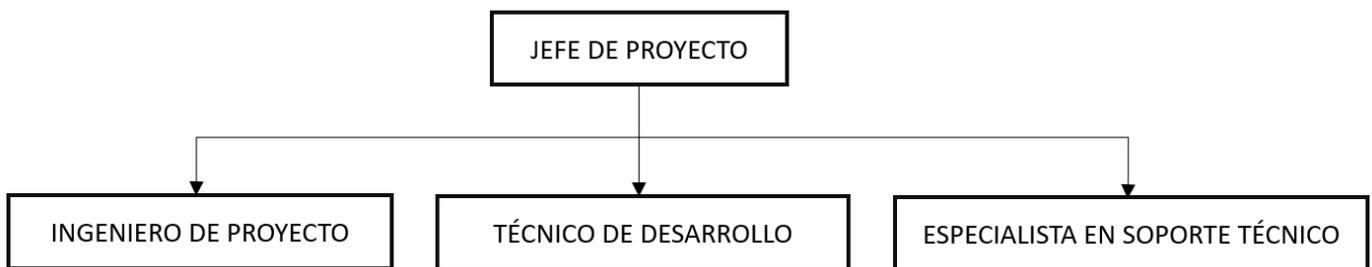


Figura 59: Esquema jerárquico del proyecto. Elaboración propia.

6.3 FASES DEL PROYECTO

Para calcular el coste financiero del proyecto de manera precisa, es necesario aclarar gradualmente el estudio que hemos realizado. En consecuencia, distinguiremos las siguientes etapas:

6.3.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CRÍTICAS

Esta etapa consiste en identificar y evaluar meticulosamente los factores clave que impactan significativamente en la calidad y estabilidad de los procesos de la empresa para posteriormente desarrollar el SPC en base a estas variables críticas.

6.3.2 DISEÑO DEL SISTEMA SPC

En esta etapa se trata de planificar cómo se va a estructurar y funcionar el sistema de Control Estadístico de Procesos (SPC), considerando aspectos como qué herramientas se usarán para analizar los datos, cómo se mostrarán los resultados a los usuarios y qué tipo de equipo técnico se necesitará para cumplir los objetivos.

6.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SPC

Implica poner en práctica todo lo diseñado en la etapa anterior: instalar el software, configurar los equipos necesarios, y asegurarse de que nuestra herramienta pueda empezar a analizar y mejorar la calidad de los procesos de la empresa.

6.3.4 PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y PUESTA EN MARCHA

- Realización de pruebas exhaustivas para verificar el funcionamiento del sistema SPC bajo diferentes escenarios y condiciones.
- Validación del sistema utilizando datos de prueba y comparación con estándares predefinidos y requisitos establecidos.
- Evaluación de la precisión y eficacia de las herramientas estadísticas utilizadas en el sistema SPC.
- Puesta en marcha del proyecto en la línea de producción de nuestro cliente.

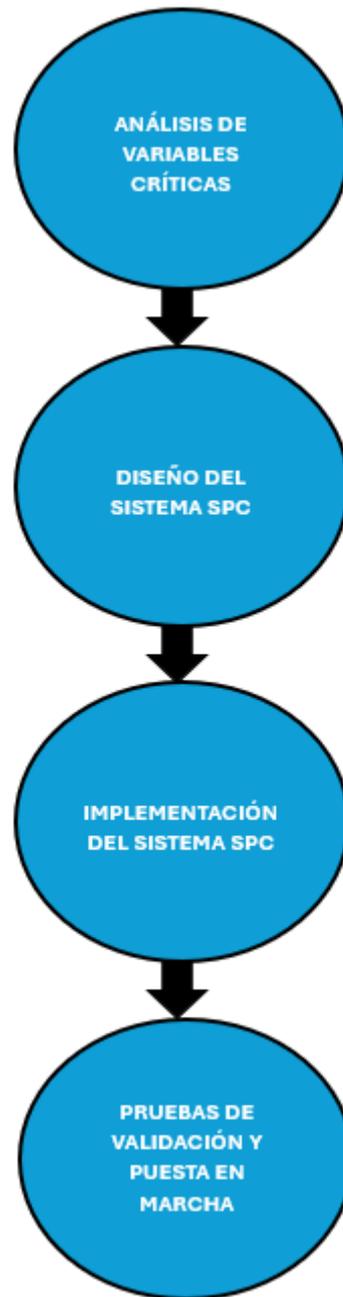


Figura 60: Fases del proyecto. Elaboración propia.

6.4 ESTUDIO ECONÓMICO

En el siguiente apartado vamos a realizar el estudio económico nuestro proyecto, para ello iremos detallando fase a fase del proyecto, las cuales hemos comentado anteriormente.

6.4.1 MARCO TEÓRICO

Vamos a dividir los costes asociados a este estudio en 2 grandes grupos, costes directos y costes indirectos:

- **Costes directos:** los costes directos como su propio nombre indica, se pueden atribuir directamente a las actividades relacionadas con el desarrollo del estudio, además estos son esenciales para su ejecución. En nuestro trabajo se estimarán los gastos más altos, los cuales podemos dividir de la siguiente manera:
 - **Coste de mano de obra:** se refiere a los gastos asociados al uso de la mano de obra de la empresa en el proyecto. El propósito es calcular el tiempo que cada miembro del equipo dedica a completar el estudio, con el fin de determinar el costo total incurrido en el desarrollo adecuado del mismo.
 - **Amortizaciones:** el proyecto tendrá costes por amortización ya que se van a emplear diversos equipos para recopilar datos. En este apartado, se intentará calcular la depreciación de estos equipos electrónicos y útiles.
 - **Materiales:** para el desarrollo del proyecto se han utilizado varias materias primas. En este apartado realizaremos el cálculo de los costos relacionados con estos materiales para la ejecución del proyecto.
- **Costes indirectos:** estos costes suelen ser más difíciles de calcular o estimar en un estudio económico. La principal razón es que estos costos, aunque se pueden imputar al proceso productivo, no forman parte directa de él. Sin embargo, son imprescindibles para llevar a cabo el desarrollo adecuado del proyecto.

En el siguiente apartado, vamos a realizar el cálculo numérico de los costes que hemos estado explicando para realizar su desarrollo de manera adecuada.

6.4.2 CÁLCULO DE COSTES

6.4.2.1 COSTES DE MANO DE OBRA

Basándonos en la jerarquía del proyecto que hemos explicado antes, el equipo para realizar el trabajo está formado por el jefe del proyecto, un ingeniero de proyecto, un técnico de desarrollo especializado en SPC y un especialista en soporte técnico y mantenimiento.

Antes de empezar este estudio, lo primero que debemos hacer es determinar los días laborables ficticios que se ha tardado en completar el proyecto. El trabajo comenzó el día 5 de febrero de 2024 y finalizó el día 17 de julio de 2024. A la suma total de días se tienen que restar las vacaciones, festivos, fines de semana y días de asuntos propios.

Días totales del proyecto	163 días
Sábados y Domingos	46 días
Días de vacaciones	5 días
Días festivos	5 días
Días de asuntos propios	3 días
Días laborables totales	104 días laborables

Tabla 2: Total de días laborables del proyecto. Elaboración propia.

Como podemos analizar en nuestra tabla, nuestro trabajo se ha ejecutado en 104 días laborables. En nuestro supuesto ficticio, la empresa ha trabajado 8 horas diarias, lo que se traduce en que se ha trabajado 832 horas.

Sabiendo esto, vamos a calcular el coste/hora de cada trabajador, se desarrolla en la siguiente tabla:

	Sueldo bruto (€/año)	Seguridad social	Coste total al año	hora/año	Coste total/hora
Jefe de proyecto	45.000	15.750	60.750	1.752	34,67
Ingeniero	35.000	12.250	47.250	1.752	26,97
Técnico de desarrollo	28.000	8.400	36.400	1.752	20,78
Personal de mantenimiento	25.000	7.500	32.500	1.752	18,55

Tabla 3: Sueldos de cada trabajador del proyecto. Elaboración propia.

Vamos a analizar en detalle la anterior tabla:

- En la primera columna hemos calculado el sueldo bruto al año antes de impuestos de nuestros trabajadores.
- Después hemos calculado en la segunda columna la seguridad social a cargo de la empresa, 35% en el caso del jefe de proyecto y el ingeniero y 30% en el caso del técnico de desarrollo y el personal de mantenimiento.
- La suma del sueldo bruto al año y la seguridad social a cargo de la empresa nos permite calcular el coste total para la empresa del trabajador.
- Para calcular las horas al año tenemos que analizar los días laborables en un año en nuestra empresa.

Total días anuales	366 días
Días de asuntos propios	6 días
Días de vacaciones	23 días
Total sábados	52 días
Total domingos	52 días
Total días festivos	14 días
Días laborables en año bisiesto	219 días

Tabla 4: Total días laborables en un año bisiesto. Elaboración propia.

Restando del total de días anuales los días de asuntos propios, días de vacaciones, días festivos y fin de semanas, obtenemos los días laborables que se trabajan en nuestra empresa en un año bisiesto, 219 días.

Y como hemos dicho antes, en nuestro supuesto ficticio, nuestra empresa ha trabajado 8 horas cada día.

$$219 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 1752 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

Con esta ecuación hemos calculado las horas que se podría trabajar en un año en nuestra empresa.

- Ahora simplemente dividiendo el coste total que le cuesta a la empresa cada trabajador en un año y las horas que podría hacer en un año, calculamos el coste total de lo que cuesta una hora para cada trabajador.

Calculado esto y sabiendo que en nuestro proyecto se han trabajado 832 horas ya podemos saber cuanto ha invertido la empresa en mano de obra:

	Coste total/hora	Horas totales	Coste total por empleado
Jefe de proyecto	34,67	832	28.845,44
Ingeniero	26,97	832	22.439,04
Técnico de desarrollo	20,78	832	17.288,96
Personal de mantenimiento	18,55	832	15.433,6
COSTE TOTAL DEL PERSONAL			84.007,04

Tabla 5: Coste total mano de obra. Elaboración propia.

La suma total de lo que ha invertido la empresa en mano de obra ha sido un total de 84.0007, 04 €.

6.4.2.2 COSTES DE AMORTIZACIONES

Al igual que hemos calculado el coste de la mano de obra, vamos a calcular las amortizaciones y con ello lo que le cuesta a nuestra empresa el uso del equipo instalado cada hora.

Antes de empezar vamos a detallar el equipo utilizado durante el transcurso del estudio, los cuales son:

- Ordenador portátil.
- Periféricos, ratón y monitor.
- Sensores IOT.

Vamos a tener en cuenta que en el precio del ordenador viene incluido todas las licencias del paquete Microsoft Office.

Activo	Desembolso Inicial	Horas en uso en vida útil	Coste por hora
Ordenador	1750	8000	0,22 €
Periféricos	200	5000	0,04 €
Sensores IOT	1500	12500	0,12 €

Tabla 6: Coste por hora de cada componente. Elaboración propia.

En nuestra Tabla 6, podemos ver lo que nos ha costado cada adquisición en la primera columna, en la segunda columna hemos estimado un cálculo aproximado de las horas de vida útil que tiene cada componente, para en la última columna el coste por cada hora utilizada para la empresa.

Una vez calculado el coste por hora, procedemos a calcular el coste total de los equipos utilizados en el estudio, vamos a realizar una estimación ficticia del número de horas totales empleadas para el desarrollo total del proyecto, para así poder calcular el coste final de los equipos:

Activo	Coste por hora	Horas de uso	Coste total
Ordenador	0,22 €	832	182,00 €
Periféricos	0,04 €	700	28,00 €
Sensores IOT	0,12 €	500	60,00 €
COSTE TOTAL DEL PERSONAL			270,00 €

Tabla 7: Coste total del equipo utilizado. Elaboración propia.

6.4.2.3 COSTES MATERIALES

Para completar los costes directos, vamos por último a determinar los costes en materiales utilizado durante el desarrollo del proyecto. En la siguiente tabla se mostrará el material ficticio empleado y una estimación de lo que sería el coste:

Material	Coste en euros
Ordenador	1.750,00 €
Periféricos	200,00 €
Sensores IOT	1.500,00 €
Software	125,00 €
Almacenamiento en la nube	1.100,00 €
Coste total	4.675,00 €

Tabla 8: Coste total del material empleado. Elaboración propia.

6.4.2.4 COSTES INDIRECTOS

Para el cálculo total de los costes indirectos es un proceso un poco más complejo. Ya que algunos de estos costes son: la electricidad, el agua, internet, asuntos de administración limpieza, tiempo invertido...

Hacer un cálculo exacto de esto es bastante complejo, por lo que vamos a optar por hacer una aproximación. Teniendo en cuenta el tiempo en desarrollar este TFG, el internet y los Terabit que se emplearían, la luz, mantenimiento y otros asuntos, una cantidad razonable que podríamos fijar es de **2500 euros** de costes indirectos.

6.4.2.5 COSTES TOTALES DEL PROYECTO

Tras la compleja elaboración de costes y el cálculo de todos los costes mencionados, solo tenemos que realizar la suma de las cantidades totales para finalizar nuestro estudio económico. A continuación, se muestra en la siguiente tabla.

	Coste Total
Coste de mano de obra	84.007,04 €
Coste de amortización de equipos	270,00 €
Coste de materiales	4.675,00 €
Costes indirectos	2.500,00 €
Coste total	91.452,04 €

Tabla 9: Coste total del estudio. Elaboración propia.

6.5 ESTUDIO DE LAS IMPLICACIONES SOCIALES

Una vez realizado el estudio económico de nuestro proyecto, es importante analizar las implicaciones sociales ficticias que tendría la implementación de nuestro SPC en nuestros clientes. Con nuestro proyecto no solo buscamos mejorar la eficiencia y la calidad en la producción, sino que también buscamos contribuir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. A continuación, vamos a ver detalladamente los ODS más relevantes que se ven impactados positivamente por la implementación de nuestro proyecto.

6.5.1 ODS 4: EDUCACIÓN DE CALIDAD

La implementación de nuestro sistema SPC requiere de trabajadores capacitados en el manejo y análisis de datos, lo que fomenta y contribuye a mejorar el acceso a una educación de calidad y al desarrollo de habilidades técnicas especializadas, cumpliendo con el objetivo de desarrollo sostenible n°4, figura 60.



Figura 61: ODS n°4. Obtenido en la web de Naciones Unidas.

6.5.2 ODS 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

Con la implementación del SPC tratamos de promover laborales más seguras y eficaces al reducir errores y optimizar procesos, lo que puede mejorar las condiciones de trabajo. Además, al mejorar la eficiencia de la producción, se pueden generar nuevas oportunidades de empleo en la industria, particularmente en sectores tecnológicos.

Y como hemos visto antes, contribuye al crecimiento económico sostenible al aumentar la productividad sin necesidad de aumentar el consumo de recursos.



Figura 62: ODS nº8. Obtenido en la web de Naciones Unidas.

6.5.3 ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

El desarrollo de nuestro proyecto es un claro ejemplo de innovación tecnológica en la industria al incorporar tecnología avanzada, con ello se promueve una modernización de la infraestructura industrial. Además, como hemos dicho antes, permite a las industrias operar de manera más eficiente, utilizando menos recursos y generando menos residuos, lo que contribuye a una infraestructura más sostenible y resistente.



Figura 63: ODS nº9. Obtenido en la web de Naciones Unidas.

6.5.4 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

La creación de un SPC busca principalmente reducir la variabilidad en los procesos de producción, lo que lleva a una menor generación de residuos. Esto es esencial para cumplir con las metas de producción y consumo responsables. Esto se traduce, en que al maximizar la eficiencia y minimizar el uso innecesario de materiales y energía, se promueve la meta de lograr un uso sostenible de los recursos naturales.



Figura 64: ODS n°12. Obtenido en la web de Naciones Unidas.

6.5.5 ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA

Relacionado con el apartado anterior, al optimizar los procesos y mejorar la eficiencia energética, nuestro proyecto puede ayudar a contribuir con la reducción de la huella de carbono de las operaciones industriales. Esto es clave para la lucha contra el cambio climático.



Figura 65: ODS n°13. Obtenido en la web de Naciones Unidas.

CAPÍTULO VII:

CONCLUSIONES

Durante el presente proyecto se ha tratado de recalcar la importancia de adoptar un enfoque sistemático y proactivo para la mejora continua dentro de las empresas, con el objetivo de mejorar tanto la calidad como la eficiencia en entornos de producción. La aplicación desarrollada y los métodos empleados a lo largo de este trabajo han proporcionado una base sólida para alcanzar este objetivo, centrándose en la supervisión constante de los procesos productivos, su regulación efectiva y, en última instancia, en su optimización progresiva para satisfacer las demandas del mercado de manera más eficaz.

En este contexto, la capacidad para prever y anticiparse a los fallos se vuelve esencial. No se trata únicamente de reaccionar a problemas una vez que han ocurrido, sino de implementar estrategias que permitan detectar y mitigar las causas de variación antes de que impacten la calidad del producto. La prevención es clave para evitar defectos que puedan ser detectados por el cliente, lo que subraya la importancia de un control y monitoreo constante en todas las etapas del proceso productivo. Aquí es donde la IA aparece, al integrar tecnologías avanzadas en el SPC, es posible implementar sistemas predictivos que analicen grandes volúmenes de datos en tiempo real, detecten patrones y anticipen posibles fallos antes de que ocurran.

Los objetivos se han alcanzado mediante la combinación de técnicas tradicionales del SPC con innovaciones tecnológicas. La herramienta desarrollada en Excel ha facilitado un aprendizaje efectivo de estos métodos. Así, se ha logrado no solo establecer una base sólida para la mejora continua, sino también preparar el terreno para futuras innovaciones en el ámbito del control de procesos.

Este proyecto ha abierto múltiples oportunidades para futuras investigaciones y mejoras que podrían contribuir al desarrollo continuo de herramientas de control de calidad en entornos de producción industrial.

En plena aparición de la Industria 4.0 y la constante evolución de la IA, sería interesante realizar un estudio exhaustivo para explorar su verdadero alcance en el ámbito del SPC, ya que aún no conocemos plenamente hasta dónde pueden llegar estas tecnologías ni todas las innovaciones que están por surgir, lo que abre un campo de oportunidades y desafíos.

Otra línea que queda abierta para otra investigación es analizar cómo mejorar la visualización de datos y cómo desarrollar herramientas más intuitivas y dinámicas que faciliten la interpretación de la información en tiempo real, permitiendo a los equipos de trabajo tomar decisiones más rápidas y efectivas. Por último, se propone realizar estudios comparativos con otros métodos emergentes de control de calidad para identificar mejoras y aprovechar nuevas oportunidades tecnológicas.

ANEXOS

ANEXO 1

Sub CargarTXT()

Dim filePath As String

Dim fileContent As String

Dim fileNum As Integer

Dim line As String

Dim cell As Range

Dim i As Integer, j As Integer

Dim lines As Variant

Dim columns As Variant

Dim ws As Worksheet

Dim numRows As Integer

Dim numColumns As Integer

' Establecer la hoja de trabajo en la que se insertarán los datos

Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Datos de Entrada")

' Mostrar el cuadro de diálogo para seleccionar el archivo .txt

filePath = Application.GetOpenFilename("Archivos de texto (*.txt), *.txt")

If filePath = "Falso" Then Exit Sub ' Si el Usuario cancela, salir de la macro

' Leer el archivo .txt

fileNum = FreeFile

Open filePath For Input As fileNum

fileContent = Input\$(LOF(fileNum), fileNum)

Close fileNum

' Reemplazar las comas por puntos

```
fileContent = Replace(fileContent, ",", ".")

' Dividir el contenido del archivo en líneas
lines = Split(fileContent, vbCrLf)
numRows = UBound(lines) - LBound(lines) + 1

' Verificar que el tamaño de las muestras es correcto
If numRows < 1 Or numRows > 10 Then
    MsgBox "ERROR: Datos no válidos. El tamaño de las muestras es incorrecto.",
vbCritical
    Exit Sub
End If

' Verificar que el número de muestras se ajusta a lo ofrecido
For i = LBound(lines) To UBound(lines)
    If lines(i) <> "" Then
        columns = Split(lines(i), vbTab)
        numColumns = UBound(columns) - LBound(columns) + 1

        If numColumns < 1 Or numColumns > 27 Then
            MsgBox "ERROR: Datos no válidos. Número de muestras incorrecto.",
vbCritical
            Exit Sub
        End If
    End If
Next i

' Limpiar el rango B3:Z12 y AC3:AC12, donde insertaremos los datos
ws.Range("B3:Z12").ClearContents
ws.Range("AB3:AC12").ClearContents
```

' Insertar datos en celdas, comenzando desde la celda B3

Set cell = ws.Range("B3")

For i = LBound(lines) To UBound(lines)

 If lines(i) <> "" Then

 ' Dividir cada línea en columnas, suponiendo que están separadas por espacios

 columns = Split(lines(i), vbTab)

 For j = LBound(columns) To UBound(columns)

 ' Insertar dato en la celda correspondiente

 If j = 25 Then

 cell.Offset(i, 26).Value = columns(j)

 Elseif j = 26 Then

 cell.Offset(i, 27).Value = columns(j)

 Else

 cell.Offset(i, j).Value = columns(j)

 End If

 Next j

 End If

 Next i

Call Hojas

Call AdjustAxisLimits

Call Grafico

End Sub

ANEXO 2

Sub ControlMuestra(hoja As Worksheet)

Dim rango As Range

Dim celda As Range

Static lastValues(1 To 27) As Variant

Dim i As Integer

' Establecer el rango que queremos revisar

Set rango = hoja.Range("C28:AA28")

' Verificar cada celda en el rango

For i = 1 To rango.Cells.Count

Set celda = rango.Cells(i)

' Verificar si el valor ha cambiado y si es un número

If celda.Value <> lastValues(i) Then

If IsNumeric(celda.Value) And Not IsEmpty(celda.Value) Then

If hoja.Name = "Informe Recorrido" Then

MsgBox "Alert: La muestra nº " & celda.Value & " fuera de los límites de control del Gráfico de Recorridos", vbExclamation

Elseif hoja.Name = "Informe Medias" Then

MsgBox "Alert: La muestra nº " & celda.Value & " fuera de los límites de control del Gráfico de Medias", vbExclamation

End If

End If

' Actualizar el valor anterior

```
        lastValues(i) = celda.Value  
    End If  
Next i  
End Sub
```

```
Sub Hojas()  
    ' Llamar al procedimiento ControlMuestra para Hoja2 y Hoja3  
    Call ControlMuestra(ThisWorkbook.Sheets("Informe Recorrido"))  
    Call ControlMuestra(ThisWorkbook.Sheets("Informe Medias"))  
End Sub
```

ANEXO 3

Sub Grafico()

Dim wsOrigen1 As Worksheet

Dim wsOrigen2 As Worksheet

Dim wsDestino As Worksheet

Dim Grafico1 As ChartObject

Dim Grafico2 As ChartObject

Dim nuevoGrafico1 As ChartObject

Dim nuevoGrafico2 As ChartObject

Dim Grafico As Worksheet

Dim valores2() As String

Dim valores3() As String

Dim i As Integer

Dim coincidenciaEncontrada As Boolean

Dim resultado As String

Dim resultado1 As String

Dim resultado2 As String

Dim resultado3 As String

```
resultado = ObtenerValores(ThisWorkbook.Sheets("Informe Recorrido"),  
Array("C7:AA7", "C10:AA10", "C14:AA14", "C18:AA18", "C22:AA22", "C26:AA26"))
```

```
resultado1 = ObtenerValores(ThisWorkbook.Sheets("Informe Recorrido"),  
Array("C11:AA11", "C15:AA15", "C19:AA19", "C23:AA23", "C27:AA27"))
```

```
resultado2 = ObtenerValores(ThisWorkbook.Sheets("Informe Medias"),  
Array("C7:AA7", "C10:AA10", "C14:AA14", "C18:AA18", "C22:AA22", "C26:AA26"))
```

```
resultado3 = ObtenerValores(ThisWorkbook.Sheets("Informe Medias"),  
Array("C11:AA11", "C15:AA15", "C19:AA19", "C23:AA23", "C27:AA27"))
```

```
valores2 = Split(resultado2, " ")
```

```
valores3 = Split(resultado3, " ")
```

```
coincidenciaEncontrada = False
```

```
For i = LBound(valores2) To UBound(valores2)
```

```
  If InStr(resultado3, valores2(i)) > 0 Then
```

```
    coincidenciaEncontrada = True
```

```
  Exit For
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
If coincidenciaEncontrada Then
```

```
  resultado2 = ObtenerValores(ThisWorkbook.Sheets("Informe Medias"),  
Array("C10:AA10", "C14:AA14", "C18:AA18", "C22:AA22", "C26:AA26"))
```

```
End If
```

```
' Verificar si la hoja de informe ya existe y eliminarla si es necesario
```

```
On Error Resume Next
```

```
Application.DisplayAlerts = False
```

```
Set Grafico = ThisWorkbook.Sheets("SPC")
```

```
If Not Grafico Is Nothing Then
```

```
  Grafico.Delete
```

```
End If
```

```
Application.DisplayAlerts = True
```

```
On Error GoTo 0
```

```
' Crear una nueva hoja de informe
```

```
Set Grafico = ThisWorkbook.Sheets.Add
```

```
Grafico.Name = "SPC"
```

' Establecer el nivel de ampliación

ThisWorkbook.Sheets("SPC").Activate

ActiveWindow.Zoom = 53

' Quitar las líneas de cuadrícula

ActiveWindow.DisplayGridlines = False

' Establecer las hojas de origen y destino

Set wsOrigen1 = ThisWorkbook.Sheets("Informe Medias") ' Hoja de origen 1

Set wsOrigen2 = ThisWorkbook.Sheets("Informe Recorrido") ' Hoja de origen 2

Set wsDestino = ThisWorkbook.Sheets("SPC") ' Hoja de destino

Set Grafico1 = wsOrigen1.ChartObjects(1)

Grafico1.Copy

wsDestino.Paste Destination:=wsDestino.Range("D4")

Set nuevoGrafico1 = wsDestino.ChartObjects(wsDestino.ChartObjects.Count)

With nuevoGrafico1

.Top = wsDestino.Range("D4").Top

.left = wsDestino.Range("D4").left

.Height = 350

.Width = 500

End With

Set Grafico2 = wsOrigen2.ChartObjects(1)

Grafico2.Copy

```
wsDestino.Paste Destination:=wsDestino.Range("D29")
```

```
Set nuevoGrafico2 = wsDestino.ChartObjects(wsDestino.ChartObjects.Count)
```

```
With nuevoGrafico2
```

```
    .Height = 350
```

```
    .Width = 500
```

```
End With
```

```
Dim totalHeight As Double
```

```
totalHeight = nuevoGrafico1.Height + nuevoGrafico2.Height + 70
```

```
With wsDestino.Shapes.AddShape(msoShapeRectangle, nuevoGrafico1.left -  
10, nuevoGrafico1.Top - 40, nuevoGrafico1.Width + 20, totalHeight)
```

```
    .Fill.ForeColor.RGB = RGB(200, 200, 200)
```

```
    .line.Visible = msoFalse
```

```
    .ZOrder msoSendToBack
```

```
End With
```

```
With wsDestino.Shapes.AddTextbox(msoTextOrientationHorizontal,  
nuevoGrafico1.left, nuevoGrafico1.Top - 40, nuevoGrafico1.Width, 30)
```

```
    .TextFrame.Characters.Text = "SPC"
```

```
    .TextFrame.HorizontalAlignment = xlHAlignCenter
```

```
    .line.Visible = msoFalse
```

```
    .Fill.ForeColor.RGB = RGB(200, 200, 200)
```

```
End With
```

```
With wsDestino.Range("N5:Y24")
```

```
    .Interior.Color = RGB(200, 200, 200)
```

```
End With
```

' Insertar texto en O6

wsDestino.Range("O7").Value = "Puntos Fuera del Límite de Control del Gráfico de Medias"

With wsDestino.Range("O7:X21")

.Interior.Color = RGB(255, 255, 255)

.Font.Size = 18

.Font.Bold = True

End With

wsDestino.Range("P9").Resize(1, wsOrigen1.Range("P6:AP6").columns.Count).Value = wsOrigen1.Range("C28:AC28").Value

wsDestino.Rows("7:21").RowHeight = 18

' Insertar texto en O12

wsDestino.Range("O12").Value = "Pautas/Rachas"

With wsDestino.Range("N30:Y50")

.Interior.Color = RGB(200, 200, 200)

End With

' Insertar texto en O6

wsDestino.Range("O32").Value = "Puntos Fuera del Límite de Control del Gráfico de Recorridos"

With wsDestino.Range("O32:X47")

.Interior.Color = RGB(255, 255, 255)

.Font.Size = 18

```
.Font.Bold = True
```

```
End With
```

```
wsDestino.Range("P34").Resize(1,  
wsOrigen2.Range("P6:AP6").columns.Count).Value =  
wsOrigen2.Range("C28:AC28").Value
```

```
wsDestino.Rows("32:47").RowHeight = 18
```

```
' Insertar texto en O12
```

```
wsDestino.Range("O37").Value = "Pautas/Rachas"
```

```
With wsDestino.Range("P39:X39") ' Ajustar el rango
```

```
.Merge ' Combinar celdas
```

```
.Value = resultado
```

```
End With
```

```
If wsDestino.Range("P39").Value <> "" Then
```

```
wsDestino.Range("P40").Value = "Perjudicial, por lo que debe estudiarse la  
causa y eliminarla"
```

```
End If
```

```
With wsDestino.Range("P43:X43") ' Ajustar el rango
```

```
.Merge ' Combinar celdas
```

```
.Value = resultado1
```

```
End With
```

```
If wsDestino.Range("P43").Value <> "" Then
```

```
wsDestino.Range("P44").Value = "Beneficiosa, analizar causa que la origina e  
incorporarla al proceso"
```

```
End If
```

```
With wsDestino.Range("P14:X14") ' Ajustar el rango
```

```
    .Merge ' Combinar celdas
```

```
    .Value = resultado2
```

```
End With
```

```
If wsDestino.Range("P14").Value <> "" Then
```

```
    wsDestino.Range("P15").Value = "Perjudicial, por lo que debe estudiarse la  
causa y eliminarla"
```

```
End If
```

```
With wsDestino.Range("P18:X18") ' Ajustar el rango
```

```
    .Merge ' Combinar celdas
```

```
    .Value = resultado3
```

```
End With
```

```
If wsDestino.Range("P18").Value <> "" Then
```

```
    wsDestino.Range("P19").Value = "Perjudicial, por lo que debe estudiarse la  
causa y eliminarla"
```

```
End If
```

```
Call TablaControl("Recorrido Paso", wsDestino.Range("D58"))
```

```
Call TablaControl("Medias Paso", wsDestino.Range("D72"))
```

```
End Sub
```

ANEXO 4

```
Sub AdjustAxisLimits()
```

```
Dim chart As ChartObject
```

```
Dim series As series
```

```
Dim minY As Double
```

```
Dim maxY As Double
```

```
Dim i As Integer
```

```
'hoja de cálculo
```

```
With Worksheets("Informe Medias")
```

```
Set chart = .ChartObjects("Gráfico 2")
```

```
' Inicializa los valores minY y maxY con los valores de la primera serie
```

```
Set series = chart.chart.SeriesCollection(1)
```

```
minY = Application.WorksheetFunction.Min(series.Values)
```

```
maxY = Application.WorksheetFunction.Max(series.Values)
```

```
' Recorre todas las series para encontrar los valores mínimos y máximos
```

```
For i = 1 To chart.chart.SeriesCollection.Count
```

```
Set series = chart.chart.SeriesCollection(i)
```

```
If Application.WorksheetFunction.Min(series.Values) < minY Then
```

```
minY = Application.WorksheetFunction.Min(series.Values)
```

```
End If
```

```
If Application.WorksheetFunction.Max(series.Values) > maxY Then
```

```
maxY = Application.WorksheetFunction.Max(series.Values)
```

```
End If
```

```
Next i
```

' Suma 2 a minY y maxY y redondea a enteros

minY = Application.WorksheetFunction.Floor(minY - 2, 1)

maxY = Application.WorksheetFunction.Ceiling(maxY + 2, 1)

' Ajusta los límites del eje Y

With chart.chart.Axes(xlValue)

.MinimumScale = minY

.MaximumScale = maxY

End With

End With

End Sub

ANEXO 5

```
Function ObtenerValores(ws As Worksheet, ranges As Variant) As String
    Dim dict As Object
    Set dict = CreateObject("Scripting.Dictionary")

    Dim cell As Range
    Dim rng As Variant
    Dim val As Variant

    ' Recorrer cada rango en el array
    For Each rng In ranges
        For Each cell In ws.Range(rng)
            val = cell.Value
            If val <> "" And Not dict.exists(val) Then
                dict.Add val, val
            End If
        Next cell
    Next rng

    Dim valores As Variant
    valores = dict.keys

    ' Ordenar los valores
    Call QuickSort(valores, LBound(valores), UBound(valores))

    ' Generar la cadena de resultado
    ObtenerValores = GenerarCadena(valores)
End Function
```

```
Function GenerarCadena(valores As Variant) As String
```

```
    Dim resultado As String
```

```
    resultado = ""
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    For i = LBound(valores) To UBound(valores)
```

```
        If i > LBound(valores) Then
```

```
            If valores(i) - valores(i - 1) = 1 Then
```

```
                resultado = resultado & "-"
```

```
            Else
```

```
                resultado = resultado & " "
```

```
            End If
```

```
        End If
```

```
        resultado = resultado & valores(i)
```

```
    Next i
```

```
    GenerarCadena = resultado
```

```
End Function
```

```
Sub QuickSort(arr As Variant, left As Long, right As Long)
```

```
    Dim i As Long, j As Long
```

```
    Dim pivot As Variant, temp As Variant
```

```
    i = left
```

```
    j = right
```

```
    pivot = arr((left + right) \ 2)
```

```
    While (i <= j)
```

```
While (arr(i) < pivot And i < right)
    i = i + 1
Wend
While (pivot < arr(j) And j > left)
    j = j - 1
Wend
If (i <= j) Then
    temp = arr(i)
    arr(i) = arr(j)
    arr(j) = temp
    i = i + 1
    j = j - 1
End If
Wend

If (left < j) Then QuickSort arr, left, j
If (i < right) Then QuickSort arr, i, right
End Sub
```

ANEXO 6

Sub TablaControl(nombre, ByRef destino As Range)

Dim wsOrigen As Worksheet

Dim wsDestino As Worksheet

Dim valoresUnicos As Collection

Dim celda As Range

Dim filaDestino As Integer

Dim columnaDestino As Integer

Dim valor As Variant

Dim col As Range

Dim i As Integer

Dim nombreHoja As String

Dim inicioColumna As Integer

Dim numerosOut As String

' Usa la hoja de destino especificada en el parámetro

Set wsDestino = destino.Worksheet

' Inicializa la fila y columna de destino para comenzar en la celda de destino

filaDestino = destino.Row

columnaDestino = destino.Column

' Coloca los índices de la tabla

wsDestino.Cells(filaDestino + 1, columnaDestino - 1).Value = "n"

wsDestino.Cells(filaDestino + 2, columnaDestino - 1).Value = "LCS"

wsDestino.Cells(filaDestino + 3, columnaDestino - 1).Value = "L2"

wsDestino.Cells(filaDestino + 4, columnaDestino - 1).Value = "L1"

wsDestino.Cells(filaDestino + 5, columnaDestino - 1).Value = "R"

```
wsDestino.Cells(filaDestino + 6, columnaDestino - 1).Value = "L-1"  
wsDestino.Cells(filaDestino + 7, columnaDestino - 1).Value = "L-2"  
wsDestino.Cells(filaDestino + 8, columnaDestino - 1).Value = "LCI"  
wsDestino.Cells(filaDestino + 9, columnaDestino - 1).Value = "n OUT"
```

```
' Recorre las hojas.
```

```
For i = 1 To 3
```

```
    nombreHoja = nombre & " " & i
```

```
    ' Verifica si la hoja existe
```

```
    On Error Resume Next
```

```
    Set wsOrigen = ThisWorkbook.Sheets(nombreHoja)
```

```
    If wsOrigen Is Nothing Then
```

```
        MsgBox "La hoja " & nombreHoja & " no existe.", vbExclamation
```

```
        Exit Sub
```

```
    End If
```

```
    On Error GoTo 0
```

```
    Set valoresUnicos = New Collection
```

```
    On Error Resume Next
```

```
    For Each celda In wsOrigen.Range("B7:Z7")
```

```
        If celda.Value <> "" Then
```

```
            valoresUnicos.Add celda.Value, CStr(celda.Value)
```

```
        End If
```

```
    Next celda
```

```
    On Error GoTo 0
```

```
    inicioColumna = columnaDestino
```

' Recorre los valores únicos y crea la tabla en la hoja de destino

For Each valor In valoresUnicos

wsDestino.Cells(filaDestino + 1, columnaDestino).Value = valor

For Each col In wsOrigen.Range("B7:Z7").Cells

If col.Value = valor Then

wsDestino.Cells(filaDestino + 2, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(12, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 3, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(17, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 4, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(18, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 5, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(21, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 6, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(19, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 7, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(20, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 8, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(13, col.Column).Value

Exit For

End If

Next col

' Incrementa la columna de destino para el siguiente valor único

columnaDestino = columnaDestino + 1

Next valor

numerosOut = ""

For Each celda In wsOrigen.Range("B25:Z25")

```
If celda.Value = "OUT" Then
    numerosOut = numerosOut & wsOrigen.Cells(24, celda.Column).Value & "
"
    End If
Next celda

If numerosOut <> "" Then
    With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino + 9, inicioColumna),
wsDestino.Cells(filaDestino + 9, columnaDestino - 1))
        .Merge
        .Value = Trim(numerosOut) ' Quita cualquier espacio al final
        .HorizontalAlignment = xlCenter ' Centrar el texto
    End With
End If

' Combina las celdas para el nombre de la hoja
With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna),
wsDestino.Cells(filaDestino, columnaDestino - 1))
    .Merge
    .Value = nombreHoja
    .HorizontalAlignment = xlCenter ' Centrar el texto
End With

' Aplica bordes a la tabla creada
With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna - 1),
wsDestino.Cells(filaDestino + 9, columnaDestino - 1))
    .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
```

```
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous  
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
```

```
End With
```

```
' Avanza la columna de destino a la siguiente disponible para la siguiente hoja
```

```
columnaDestino = columnaDestino + 1
```

```
Next i
```

```
wsDestino.columns("M").ColumnWidth = 15
```

```
Call TablaSeguimientoRecorrido(wsDestino.Range("M58"))
```

```
Call TablaSeguimientoMedias(wsDestino.Range("M72"))
```

```
End Sub
```

```
Sub TablaSeguimientoRecorrido(ByRef destino As Range)
```

```
Dim wsOrigen As Worksheet
```

```
Dim wsDestino As Worksheet
```

```
Dim valoresUnicos As Collection
```

```
Dim celda As Range
```

```
Dim filaDestino As Integer
```

```
Dim columnaDestino As Integer
```

```
Dim valor As Variant
```

```
Dim col As Range
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim nombreHoja As String
```

```
Dim inicioColumna As Integer
```

```
' Usa la hoja de destino especificada en el parámetro
```

```
Set wsDestino = destino.Worksheet
```

```
' Inicializa la fila y columna de destino para comenzar en la celda de destino
```

```
filaDestino = destino.Row
```

```
columnaDestino = destino.Column
```

```
nombreHoja = "Operaciones Seguimiento"
```

```
' Verifica si la hoja existe
```

```
On Error Resume Next
```

```
Set wsOrigen = ThisWorkbook.Sheets(nombreHoja)
```

```
If wsOrigen Is Nothing Then
```

```
    MsgBox "La hoja '" & nombreHoja & "' no existe.", vbExclamation
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
On Error GoTo 0
```

```
Set valoresUnicos = New Collection
```

```
On Error Resume Next
```

```
For Each celda In wsOrigen.Range("AB7:AC7")
```

```
' Verifica si el valor de la celda no está vacío y está entre 2 y 10
```

```
If celda.Value <> "" And IsNumeric(celda.Value) And celda.Value >= 2 And  
celda.Value <= 10 Then
```

```
    valoresUnicos.Add celda.Value, CStr(celda.Value)
```

```
End If
```

```
Next celda
```

```
On Error GoTo 0
```

```
' Si no hay valores válidos, salir de la función
```

```
If valoresUnicos.Count = 0 Then
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

inicioColumna = columnaDestino

' Recorre los valores únicos y crea la tabla en la hoja de destino

For Each valor In valoresUnicos

wsDestino.Cells(filaDestino + 1, columnaDestino).Value = valor

For Each col In wsOrigen.Range("AB7:AC7").Cells

' Comprueba si el valor coincide con el valor único procesado

If col.Value = valor Then

wsDestino.Cells(filaDestino + 2, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(14, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 3, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(19, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 4, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(20, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 5, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(23, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 6, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(21, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 7, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(22, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 8, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(15, col.Column).Value

Exit For

End If

Next col

' Incrementa la columna de destino para el siguiente valor único

columnaDestino = columnaDestino + 1

Next valor

```
With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna),  
wsDestino.Cells(filaDestino, columnaDestino - 1))
```

```
.Merge
```

```
.Value = "Seguimiento"
```

```
.HorizontalAlignment = xlCenter ' Centrar el texto
```

```
End With
```

```
' Aplica bordes a la tabla creada
```

```
With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna - 1),  
wsDestino.Cells(filaDestino + 9, columnaDestino - 1))
```

```
.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
```

```
.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
```

```
.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
```

```
.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
```

```
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
```

```
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
```

```
End With
```

```
End Sub
```

```
Sub TablaSeguimientoMedias(ByRef destino As Range)
```

```
Dim wsOrigen As Worksheet
```

```
Dim wsDestino As Worksheet
```

```
Dim valoresUnicos As Collection
```

```
Dim celda As Range
```

```
Dim filaDestino As Integer
```

```
Dim columnaDestino As Integer
```

```
Dim valor As Variant
```

```
Dim col As Range
```

Dim i As Integer

Dim nombreHoja As String

Dim inicioColumna As Integer

' Usa la hoja de destino especificada en el parámetro

Set wsDestino = destino.Worksheet

' Inicializa la fila y columna de destino para comenzar en la celda de destino

filaDestino = destino.Row

columnaDestino = destino.Column

nombreHoja = "Operaciones Seguimiento"

' Verifica si la hoja existe

On Error Resume Next

Set wsOrigen = ThisWorkbook.Sheets(nombreHoja)

If wsOrigen Is Nothing Then

 MsgBox "La hoja '" & nombreHoja & "' no existe.", vbExclamation

 Exit Sub

End If

On Error GoTo 0

Set valoresUnicos = New Collection

On Error Resume Next

For Each celda In wsOrigen.Range("AB7:AC7")

' Verifica si el valor de la celda no está vacío y está entre 2 y 10

If celda.Value <> "" And IsNumeric(celda.Value) And celda.Value >= 2 And
celda.Value <= 10 Then

 valoresUnicos.Add celda.Value, CStr(celda.Value)

End If

Next celda

On Error GoTo 0

' Si no hay valores válidos, salir de la función

If valoresUnicos.Count = 0 Then

Exit Sub

End If

inicioColumna = columnaDestino

' Recorre los valores únicos y crea la tabla en la hoja de destino

For Each valor In valoresUnicos

wsDestino.Cells(filaDestino + 1, columnaDestino).Value = valor

For Each col In wsOrigen.Range("AB7:AC7").Cells

' Comprueba si el valor coincide con el valor único procesado

If col.Value = valor Then

wsDestino.Cells(filaDestino + 2, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(31, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 3, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(36, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 4, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(37, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 5, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(40, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 6, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(38, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 7, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(39, col.Column).Value

wsDestino.Cells(filaDestino + 8, columnaDestino).Value =
wsOrigen.Cells(32, col.Column).Value

```
        Exit For
    End If
Next col

' Incrementa la columna de destino para el siguiente valor único
columnaDestino = columnaDestino + 1
Next valor

With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna),
wsDestino.Cells(filaDestino, columnaDestino - 1))
    .Merge
    .Value = "Seguimiento"
    .HorizontalAlignment = xlCenter ' Centrar el texto
End With

' Aplica bordes a la tabla creada
With wsDestino.Range(wsDestino.Cells(filaDestino, inicioColumna - 1),
wsDestino.Cells(filaDestino + 9, columnaDestino - 1))
    .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With

End Sub
```


BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- Devore, J. L. (2009). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- George, M. (2003). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*. McGraw-Hill.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill Education.
- Joglekar, N. R., y D.N, F. (2005). Applying Lean Six Sigma in the Aerospace Industry. *The TQM Magazine*.
- Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill.
- Mahesh, B. (2020). Machine Learning Algorithms - A Review. *International Journal of Science and Research*.
- Merlo, F., Matos, A., y Teixeira, M. (2023). Industry 4.0 and Its Importance in Statistical Process Control. *Proceedings of the 6th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Lisbon: IEOM Society International.
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons.
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press.
- Rajadell, M., y Sánchez, J. L. (2010). *Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad*. Días de Santos.
- Ramos, J. L. (2020). Aplicaciones de las redes neuronales y el deep learning a la ingeniería biomédica. *Revista UIS Ingenierías*.
- Taguchi, G. (1986). *Taguchi, G. . "Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes"*. Tokyo : The Organization.
- Vaidya, S., Ambad, P., y Bhosle, S. (2021). *Industry 4.0: A Glimpse*. Wiley.
- Vilar, J. (2005). *Control estadístico de los procesos (SPC)*. FC Editorial.

- Wireman, T. (2004). *Total Productive Maintenance*. Industrial Press.
- Womack, J. P., y Jones, D. T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*.
- Womack, J. P., Jones, D. T., y Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World*. Rawson Associates.
- Xiao Han, W. L. (2023). Practising future-making: Anticipation and translocal politics of Tesla's Gigafactory in Shanghai as assemblage. *Transactions of the Institute of British Geographers* .

SITIOS WEB

- Ferraro, T. (2016). *Creative Safety Supply*. Retrieved from <https://blog.creativesafetysupply.com/heijunka-box/>
Última consulta: 13/03/2024
- Historia y Biografía*. (n.d.). Retrieved from <https://historia-biografia.com/taichi-ohno/>
Última consulta: 06/03/2024
- Ikeda, P. (2019). *parati*. Retrieved from <https://www.parati.com.ar/el-metodo-japones-de-las-5s-para-mejorar-los-negocios-y-la-calidad-vida/>
Última consulta: 13/03/2024
- Ingeniería de Calidad*. (n.d.). Retrieved from <https://www.ingenieriadecalidad.com/2020/07/que-es-jidoka.html>
Última consulta: 13/03/2024
- Intel. (2024). *Intel® Solutions for Industry 4.0*. Retrieved from <https://www.intel.la/content/www/xl/es/manufacturing/manufacturing-industrial-overview.html>
Última consulta: 20/05/2024
- Marly. (2020). *Marly Blog*. Retrieved from <https://marlyblog99.blogspot.com/2020/07/que-es-el-kaizen-y-sus-beneficios.html>
Última consulta: 12/03/2024
- Nielsen, R., y Chong, A. (2023). *Plexus International*. Retrieved from <https://plexusintl.com/mx/blog/que-es-spc/>

Referencias Bibliográficas

Última consulta: 04/04/2024

Semerena, Y. (2019, Enero 7). *TuDashboard*. Retrieved from <https://tudashboard.com/industria-4-0/>

Última consulta: 15/05/2024

Tesla. (2024). *Tesla*. Retrieved from https://www.tesla.com/es_es

Última consulta: 20/05/2024

TOTVS. (2022, Septiembre 26). Retrieved from <https://es.totvs.com/blog/gestion-industrial/industria-4-0-que-es-impactos-beneficios-y-tecnologias/>

Última consulta: 17/05/2024