



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN DE
TÉCNICAS SPC EN PROCESOS DE FABRICACIÓN**

Autor:

Martín Sánchez, Sergio

Tutor:

Santos Martín, Francisco Javier

Dpto. CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF

Área de Ingeniería de los
Procesos de Fabricación

Valladolid, Junio 2021

RESUMEN

Hoy en día, la evaluación continua de la calidad en los procesos de fabricación es totalmente necesaria para poder obtener productos competitivos.

Para realizar este tipo de evaluaciones existen técnicas de control estadístico de procesos (SPC) capaces de aportar información acerca de la capacidad del proceso que se está realizando. Esto es de gran utilidad para mantener el proceso bajo control y con la calidad deseada.

Este Trabajo de Fin de Grado, se encarga de desarrollar un software informático capaz de realizar estudios de capacidad mediante la implementación de técnicas de control estadístico de procesos, permitiendo obtener una importante información sobre lo que está ocurriendo en el proceso de producción, para así intervenir en él de una forma correcta si fuera necesario. Además, con el objetivo de simplificar la adquisición de datos se ha trabajado con conexiones inalámbricas en los instrumentos de medida.

Palabras clave: calidad, control estadístico de procesos, software, prevención de defectos, Bluetooth.

ABSTRACT

Nowadays, continuous quality assessment in manufacturing processes is necessary in order to obtain competitive products.

Statistical process control techniques (SPC) have been developed to accomplish this kind of evaluation, as they are able to provide information about the capacity of the process, which is very useful to keep it under control and with the required quality.

The purpose of this Bachelor's Degree Thesis is to develop a computer software that can perform capacity studies by implementing statistical process control techniques. The main goal is to obtain important information about what is happening in the production process in order to intervene in case it were necessary. Furthermore, with the objective of simplifying data acquisition, measuring instruments equipped with wireless connection have been used to carry out this task.

Keywords: quality, statistical process control, software, defects prevention, Bluetooth.



ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 ESTRUCTURA.....	5
CAPÍTULO II.....	7
ESTADO DEL ARTE	7
2.1 METROLOGÍA.....	8
2.1.1 <i>Introducción</i>	8
2.1.2 <i>Clasificación</i>	8
2.1.3 <i>La metrología en la sociedad</i>	9
2.1.4 <i>Organización de la metrología</i>	10
2.1.5 <i>La metrología en la industria</i>	13
2.2 COMUNICACIÓN BLUETOOTH	16
2.2.1 <i>Introducción</i>	16
2.2.2 <i>Funcionamiento</i>	16
2.2.3 <i>Núcleo, modulación y protocolos</i>	17
2.2.4 <i>Versiones y alcance</i>	18
2.2.5 <i>Aplicación</i>	19
2.3 ESTUDIO DE CAPACIDAD Y TÉCNICAS SPC	21
2.3.1 <i>Introducción</i>	21
2.3.2 <i>Lean Manufacturing</i>	21
2.3.3 <i>Six Sigma (6σ)</i>	24
2.3.4 <i>Técnicas SPC (Statistical Process Control)</i>	27
2.4 SOFTWARE INDUSTRIAL.....	34
2.4.1 <i>Mitutoyo MeasurLink</i>	34
2.4.2 <i>InfinityQS</i>	36
2.4.3 <i>Hexagon Q-DAS Statistics</i>	38
CAPÍTULO III.....	40
DESARROLLO DEL SOFTWARE	40
3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	41
3.1.1 <i>Instrumentos de medición</i>	41
3.1.2 <i>Comunicación inalámbrica</i>	42
3.1.3 <i>Muestreos</i>	42
3.1.4 <i>Seguridad</i>	46
3.2 ESPECIFICACIONES DEL ESTUDIO	48
3.2.1 <i>Plano de la pieza</i>	48
3.2.2 <i>Nominal</i>	48
3.2.3 <i>Tolerancias</i>	49



3.2.4 Índices de capacidad requeridos.....	49
3.2.5 Incertidumbre del dispositivo de medida (U).....	49
3.3 ÍNDICES DE CAPACIDAD: CAM Y CAP	51
3.3.1 CAM: Desviación estándar intrínseca	51
3.3.2 CAP: Desviación estándar de producción.....	52
3.4 ÍNDICE DE CAPACIDAD: CpK.....	54
3.5 TASA DE NO CONFORMIDAD	55
3.6 NORMA UNE-EN ISO 14253.....	57
3.7 GRÁFICOS.....	60
3.7.1 Gráfico del estudio intrínseco	60
3.7.2 Gráfico del estudio de producción	62
3.7.3 Histograma	63
CAPÍTULO IV.....	66
CASOS PRÁCTICOS.....	66
4.1 DISPERSIÓN.....	67
4.1.1 Dispersión inválida.....	68
4.1.2 Dispersión válida.....	73
4.2 DESCENTRAMIENTO	79
4.2.1 Descentramiento inválido.....	80
4.2.2 Descentramiento válido.....	86
CAPÍTULO V.....	93
ESTUDIO ECONÓMICO	93
5.1 ESTUDIO ECONÓMICO	94
5.1.1 Recursos utilizados.....	94
5.1.2 Costes directos del proyecto	95
5.1.3 Costes indirectos del proyecto	97
5.1.4 Coste total del proyecto.....	98
CAPÍTULO VI.....	99
CONCLUSIONES	99
6.1 CONCLUSIONES.....	100
6.2 LÍNEAS FUTURAS	101
CAPÍTULO VII.....	102
BIBLIOGRAFÍA	102
7.1 BIBLIOGRAFÍA	103



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ÓRGANOS DE LA CONVENCION DEL METRO. FUENTE (4).....	11
FIGURA 2. ÓRGANOS DEL CONSEJO SUPERIOR DE METROLOGÍA. FUENTE (6).....	12
FIGURA 3. ESTRUCTURA METROLÓGICA ESPAÑOLA. FUENTE (7).....	13
FIGURA 4. CÁMARA DE LA MARCA COGNEX COMBINADA CON EL SOFTWARE IN-SIGHT PARA LA VISIÓN ARTIFICIAL. FUENTE (8)	14
FIGURA 5. EL MÉTODO SMED DISMINUYE EL TIEMPO MUERTO. FUENTE (16).	23
FIGURA 6. EL MÉTODO SMED APORTA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN. FUENTE (16).	23
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN DE LOS NIVELES DE MEJORA EN SIX SIGMA. FUENTE (17).	26
FIGURA 8. GRÁFICO DE CONTROL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	28
FIGURA 9. OBSERVACIÓN DEL DESCENTRAMIENTO CON EL CPK. FUENTE (22).....	32
FIGURA 10. INTERFAZ DEL MÓDULO REAL-TIME STANDARD DE MEASURLINK. FUENTE (24).	35
FIGURA 11. INTERFAZ DEL MÓDULO PROCESS ANALYZER PROFESSIONAL DE MEASURLINK. FUENTE (24).	36
FIGURA 12. INTERFAZ GRÁFICA DE INFINITYQS. FUENTE (25).	37
FIGURA 13. INTERFAZ DE INFINITYQS. FUENTE (25).	38
FIGURA 14. DIFERENTES INTERFACES DEL SOFTWARE Q-DAS DE HEXAGON. FUENTE (27).	39
FIGURA 15. A LA IZQUIERDA, CALIBRE TESA TWIN-CAL IP67. FUENTE (28) Y A LA DERECHA, CALIBRE MAHR MARCAL 16 EWRI. FUENTE (29).....	41
FIGURA 16. INSTRUCCIONES DE LA INTERFAZ DE OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ...	43
FIGURA 17. ESPECIFICACIONES PARA RELLENAR POR EL OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 18. TABLA DE MUESTREO DE LA INTERFAZ DE OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	43
FIGURA 19. INSERCIÓN FECHA Y HORA EN INTERFAZ DE OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	44
FIGURA 20. INTERFAZ PARA OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	45
FIGURA 21. TABLA DE MUESTREO DE LA INTERFAZ DE INGENIERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	46
FIGURA 22. MENSAJE DE PROTECCIÓN DE LAS CELDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	47
FIGURA 23. EJEMPLO DE PLANO INTRODUCIDO EN LA INTERFAZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	48
FIGURA 24. TABLA DE ESPECIFICACIONES DE LA INTERFAZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50



FIGURA 25. OBTENCIÓN DEL CAM EN DIFERENTES SERIES DE DATOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
FIGURA 26. OBTENCIÓN DEL CAP EN LA INTERFAZ DE OPERARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
FIGURA 27. ÍNDICE CPK EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
FIGURA 28. TASA DE NO CONFORMIDAD EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	56
FIGURA 29. CONFORMIDAD DE LOS LÍMITES DE TOLERANCIA AÑADIENDO LA INCERTIDUMBRE. FUENTE (30).	57
FIGURA 30. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE MÍNIMA, ASÍ COMO DE LOS LÍMITES DE TOLERANCIAS AÑADIENDO LAS INCERTIDUMBRES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
FIGURA 31. GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO DONDE SE PUEDE APRECIAR LOS LÍMITES DE TOLERANCIAS CON LA INCERTIDUMBRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
FIGURA 32. GRÁFICO DE ESTUDIO INTRÍNSECO CON LA NORMA UNE-EN ISO 14253. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 33. BARRAS DE ERROR EN EL GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 34. GRÁFICO COMPLETO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 35. GRÁFICO DEL ESTUDIO DE PRODUCCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
FIGURA 36. HISTOGRAMA DE LA POBLACIÓN TOTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
FIGURA 37. ESPECIFICACIONES DEL ESTUDIO DE DISPERSIÓN EXTRAÍDAS DEL SOFTWARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
FIGURA 38. PLANO DE LA PIEZA SOBRE LA QUE SE VA A REALIZAR EL ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
FIGURA 39. DATOS PARA EL CASO 1 EXTRAÍDOS DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA 40. TABLA DE DATOS DE LA PRODUCCIÓN DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA 41. TABLA DE ÍNDICES DE CAPACIDAD EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA 42. GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO DEL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ...	70
FIGURA 43. GRÁFICO DEL ESTUDIO DE PRODUCCIÓN PARA EL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71
FIGURA 44. HISTOGRAMA DEL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
FIGURA 45. TASA DE NO CONFORMIDAD DEL CASO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 46. DATOS PARA EL CASO 2 EXTRAÍDOS DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74



FIGURA 47. TABLA DE DATOS DE LA PRODUCCIÓN DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 48. TABLA DE ÍNDICES DE CAPACIDAD EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 49. GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO DEL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	75
FIGURA 50. GRÁFICO DEL ESTUDIO DE PRODUCCIÓN PARA EL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 51. HISTOGRAMA DEL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 52. TASA DE NO CONFORMIDAD DEL CASO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	78
FIGURA 53. PLANO DE LA PIEZA SOBRE LA QUE SE VA A REALIZAR EL ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 54. ESPECIFICACIONES ESTABLECIDAS PARA LA PIEZA DEL ESTUDIO DE DESCENTRAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
FIGURA 55. DATOS PARA EL CASO 3 EXTRAÍDOS DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
FIGURA 56. TABLA DE DATOS DE LA PRODUCCIÓN DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 57. TABLA DE ÍNDICES DE CAPACIDAD EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 58. GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO DEL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	83
FIGURA 59. GRÁFICO DEL ESTUDIO DE PRODUCCIÓN PARA EL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 60. HISTOGRAMA DEL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 61. TASA DE NO CONFORMIDAD DEL CASO 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	86
FIGURA 62. DATOS PARA EL CASO 4 EXTRAÍDOS DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	87
FIGURA 63. TABLA DE DATOS DE LA PRODUCCIÓN DE LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	88
FIGURA 64. TABLA DE ÍNDICES DE CAPACIDAD EN LA INTERFAZ DE INGENIEROS PARA EL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	88
FIGURA 65. GRÁFICO DEL ESTUDIO INTRÍNSECO DEL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ..	89
FIGURA 66. GRÁFICO DEL ESTUDIO DE PRODUCCIÓN PARA EL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	90
FIGURA 67. HISTOGRAMA DEL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	91
FIGURA 68. TASA DE NO CONFORMIDAD DEL CASO 4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	92



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VERSIONES DE LA TECNOLOGÍA BLUETOOTH. FUENTE (10).	18
TABLA 2. NORMA AFNOR HF E60-181 (TNC). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	55
TABLA 3. TABLA DE DATOS DEL CASO 1 EXTRAÍDA DE LA INTERFAZ DE OPERARIO DEL SOFTWARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
TABLA 4. TABLA DE DATOS DEL CASO 2 EXTRAÍDA DE LA INTERFAZ DE OPERARIO DEL SOFTWARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
TABLA 5. TABLA DE DATOS DEL CASO 3 EXTRAÍDA DE LA INTERFAZ DE OPERARIO DEL SOFTWARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
TABLA 6. TABLA DE DATOS DEL CASO 4 EXTRAÍDA DE LA INTERFAZ DE OPERARIO DEL SOFTWARE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	87
TABLA 7. DÍAS HÁBILES POR AÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	95
TABLA 8. HORAS EMPLEADAS PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	95
TABLA 9. TABLA DE COSTES AMORTIZABLES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	96
TABLA 10. TABLA DE COSTES NO AMORTIZABLES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	97
TABLA 11. TABLA DE COSTES INDIRECTOS TOTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	97
TABLA 12. TABLA DE COSTE TOTAL DEL PROYECTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	98



CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN.



1.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de este proyecto, primeramente, debemos plantearnos conceptos como la calidad a nivel industrial.

Según la Real Academia Española (RAE) (1), llamamos calidad a la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor. Desde un punto de vista más industrial, juzgamos la calidad como el grado de cumplimiento de las especificaciones fijadas para un producto concreto.

En la actualidad, las tendencias relacionadas con la gestión de la calidad están regidas por la metodología 6σ , así como el Lean Manufacturing, de las cuales hablaremos más adelante.

Durante este Trabajo de Fin de Grado, se desarrollará una herramienta capaz de aplicar técnicas de control estadístico de procesos (SPC), mediante estudios de capacidad. Esto unido con una adquisición de datos realizada con un dispositivo capaz de comunicarse con nuestra herramienta mediante la conexión inalámbrica bluetooth, nos permitirá descubrir en qué situación se encuentra un proceso de fabricación concreto, siendo esto de gran ayuda en la monitorización de los mismos. Esto también lo encuadraremos dentro de la llamada, Industria 4.0, en la que nos encontramos embarcados en la actualidad.



1.2 ANTECEDENTES.

Hoy en día, la producción realizada por máquinas que repiten procesos de forma repetitiva es la que ocupa la mayor parte de la industria. Mediante estos métodos conseguimos obtener productos que podemos considerar semejantes entre los que formen parte de un mismo lote, pero nunca idénticos. Las diferencias posibles entre estos productos pueden llegar a ser más o menos importantes, pero es ahí donde reside el concepto de calidad y donde vamos a incidir durante el transcurso de este proyecto.

A estas diferencias con respecto a las especificaciones fijadas, las podemos considerar como defectos, por lo cual trataremos de realizar una prevención para que estos defectos no se vean amplificadas con el transcurso del proceso. Para esto será necesario recurrir a métodos estadísticos capaces de monitorizar los procesos mediante muestreos concretos, ya que sería inviable realizar un estudio del total de los productos debido al aspecto económico, el cual es de suma importancia en industria.

El Control Estadístico de Procesos (SPC) es la herramienta capaz de guiarnos en la búsqueda de la máxima calidad dentro de las producciones repetitivas.



1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es el desarrollo de un software informático capaz de implementar las técnicas “Statistical Process Control” (SPC), mediante Microsoft Excel, para de esta forma monitorear cualquier proceso de producción industrial repetitiva y obteniendo como resultado los datos necesarios para poder realizar modificaciones en el proceso que ajusten la calidad hasta el nivel requerido.

Además, se ha trabajado sobre la toma de datos realizada por el operario en la línea de producción buscando un método cómodo y fiable. Para ello, la toma de datos se realiza mediante un calibre capaz de comunicarse con nuestro ordenador mediante la tecnología bluetooth, por lo tanto, de forma inalámbrica. Esto facilita mucho la tarea, ya que también se ha implementado dentro del software informático una interfaz simplificada dedicada para el operario en el momento de esta adquisición de datos. La interfaz cuenta con diferentes hojas, dedicadas cada una de ellas a una parte concreta del estudio. Esto ayuda, tanto a operarios como ingenieros, a realizar el estudio de una forma más visual y sencilla.

También hay que destacar la implementación de un método de seguridad mediante el bloqueo de todas las celdas que no deban ser modificadas para mantener el software inalterado mediante su utilización. Así mismo, este bloqueo puede ser retirado mediante una clave de seguridad, siempre y cuando se requiera hacer una modificación por personal cualificado para ello.

Para poder llegar al cumplimiento de estos objetivos, se ha de ahondar en el estudio de los diferentes métodos que forman parte del Control Estadístico de Procesos (SPC). Por ello, se han analizado los llamados “estudios de capacidad”, prestando especial atención a los diferentes coeficientes y a la forma de graficar lo que está ocurriendo en nuestro proceso, así como, normas que nos permiten tomar decisiones para mejorar el mismo.



1.4 ESTRUCTURA

El presente proyecto se ha organizado siguiendo una estructura basada en siete capítulos, los cuales se detallan a continuación:

- **Capítulo I:** Es el capítulo introductorio. En este se definen los objetivos que se van a cumplir durante el proyecto, así como los antecedentes que nos llevan hasta estos objetivos. También se define la estructura que va a seguir toda la redacción del proyecto.
- **Capítulo II:** Este capítulo es el llamado, estado del arte. En él quedan reflejados los estudios más relevantes ya existentes sobre los aspectos claves de este proyecto. También se presentan a modo de marco teórico los contenidos fundamentales para la comprensión del mismo.
- **Capítulo III:** Tratará sobre el desarrollo de los diferentes requerimientos que se han planteado como objetivos para el software informático del que consta el proyecto. Así como del hardware con el que contamos.
- **Capítulo IV:** Este capítulo contiene los casos prácticos. Aquí se encuentran ejemplificados los diferentes resultados que nos podemos encontrar tras introducir, de forma experimental, diferentes tomas de datos en el software desarrollado.
- **Capítulo V:** Se desarrolla un estudio económico del proyecto realizado teniendo en cuenta costes directos e indirectos, y dando un razonamiento del posible coste de adquisición, por un cliente externo, del software desarrollado.
- **Capítulo VI:** Este capítulo agrupa las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto, además de las posibles líneas futuras para aplicar el software desarrollado dentro de la industria de los procesos de fabricación.



- **Capítulo VII:** Este capítulo contiene la bibliografía consultada y citada a lo largo del estudio del proyecto y del desarrollo de la memoria.



CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE



2.1 METROLOGÍA

2.1.1 Introducción

La metrología se define como la “ciencia de las mediciones y sus aplicaciones”, incluyendo también todos los aspectos tanto teóricos como prácticos utilizados para la realización de mediciones, sin importar cual sea su incertidumbre de medida y su campo de aplicación (2). Carlos Enrique Granados también la define como “la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades, los métodos y técnicas de medición, así como su evolución, la valoración de la calidad de las medidas y su mejora constante facilitando el progreso científico, el desarrollo tecnológico, el bienestar social y la calidad de vida” (3). Es una ciencia básica, de gran importancia en campos como la investigación y desarrollo, la fabricación industrial, medicina, telecomunicaciones, comercio, etc.

El acto de confrontar con algo que tomemos como base, se puede definir como medir. Existen registros capaces de demostrar que la necesidad de medir y crear unidades de medida se remonta a los primeros periodos de la historia. Estas primeras unidades de medida fueron empíricas, autocráticas, sin una relación matemática que las defina y en su mayoría de características antropométricas. Sin embargo, con el paso del tiempo, se han llegado a generar bases comúnmente aceptadas, hasta llegar a lo que hoy en día definimos como Sistema Internacional de Unidades, SI.

Es después de la Revolución Francesa, con el decreto de la Asamblea Nacional Francesa, cuando se da el inicio de la metrología que conocemos hoy en día. En 1791, la Asamblea Nacional Francesa legalizó un sistema métrico decimal de medida, utilizando el metro como unidad de medida referida a longitud, y la masa correspondiente a un decímetro cúbico de agua a temperatura de 4 °C, ya que a esta temperatura su densidad es máxima, como unidad de masa. Estas unidades fueron representadas mediante una barra de platino a cantos (entre extremos) y un cilindro de platino, los cuales fueron depositados en los Archivos del Imperio en 1799. Este sistema sirvió como predecesor al Sistema Internacional de Unidades, SI, que utilizamos actualmente (4).

2.1.2 Clasificación

Anteriormente se ha definido el concepto de metrología, más allá de su definición, podemos hablar de los objetivos que plantea.



- Estudio de las propiedades medibles.
- Sistemas de unidades de medida.
- Patrones, métodos y técnicas de medición.
- Trazabilidad metrológica.
- Incertidumbre de medida.
- Valoración de la exactitud en las mediciones, así como de la mejora y desarrollo constante.

Teniendo en cuenta el campo de aplicación al que se refiera, la metrología se puede clasificar en tres categorías (4):

- **Metrología Científica:** Es la encargada del establecimiento y mantenimiento de los patrones de medida que sirven de representación física para las unidades de medición.
- **Metrología Aplicada:** Trata de asegurar la exactitud en los instrumentos utilizados en los procesos productivos y de control industrial.
- **Metrología Legal:** Busca el aseguramiento de la exactitud en los instrumentos de medida cuya influencia intervenga en transacciones comerciales, salud, seguridad o medio ambiente.

2.1.3 La metrología en la sociedad

La metrología produce un enorme impacto en la sociedad y en cada uno de los individuos que la conforman.

El profesor Carlos Enrique Granados, en su libro, *Introducción a la Historia de la Metrología* (3), nos indica:

“El papel de la metrología en el progreso humano es invasivo, pero discreto hasta el punto de que puede pasar tan desapercibido como la necesidad de un ambiente respirable para la inmensa mayoría de las especies vivientes”.

En favor de la sociedad, es necesaria una base legal coordinada por los gobiernos con el objetivo de garantizar la corrección de las mediciones con interés público. Las legislaciones metrológicas deben garantizar los resultados de medida y evitar conflictos de intereses entre partes que puedan resultar adversos para individuos o sociedades. Es la metrología la encargada de verificar los instrumentos de medida y los procesos de medición utilizados, así como las características propias de los productos para validar los requisitos establecidos.



La metrología es necesaria para el desarrollo tecnológico de un país, la mejora de las capacidades en las mediciones potencia la innovación tecnológica e industrial siendo esto algo diferencial en economías emergentes (4).

Moviéndonos a un entorno industrial, el cual resulta más cercano al ingeniero, la metrología resulta imprescindible para la verificación de las tolerancias de fabricación y la operatividad funcional de los productos, por esto, las mediciones son un componente crucial del aseguramiento de la calidad. Gracias a la metrología, se disminuyen las pérdidas por defectos, se aumenta la competitividad y la calidad de los productos. La medición sistemática, conociendo la incertidumbre, se establece como una de las bases de control en las industrias modernas, siendo el coste de medición alrededor del 15% de los costes de producción (4).

2.1.4 Organización de la metrología

- Internacional:

Para poder formar parte de un mercado y un comercio global, resulta necesario que las medidas y ensayos que se realicen a los productos fabricados sean aceptadas internacionalmente. Para facilitar esto, es necesaria una estructura metrológica internacional capaz de coordinar a las organizaciones metrológicas de los países. Esta estructura metrológica internacional se inició a finales del siglo XIX, con la llamada Convención del Metro. Actualmente la componen la Convención del Metro, la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y el conjunto de Institutos Nacionales de Metrología (INM) del mundo, que se agrupan en Organizaciones Regionales de Metrología (EURAMET, COOMET, APMP, SIM, AFRIMETS, GULFMET...) (4).

Convención del Metro: Es un tratado diplomático en el que firman 60 países, los cuales dan autoridad a la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), al CIPM y al BIPM como reguladores en cuanto a metrología. Apareció en el año 1875 (4).

Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM): Creado también a finales del siglo XIX, estuvo conformado por 18 países firmantes de la Convención del Metro. Su función es afianzar la unión y homogeneidad de las unidades de medida. El CIPM también se encarga de ser el consejo directivo del BIPM.

Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM): Establecida por la Convención del Metro en 1875, se ubica en Sèvres, junto a Paris, Francia. Su función es afianzar la homogeneidad de las medidas y su trazabilidad al Sistema

Internacional de Unidades (SI). Para conseguir esto se utilizan técnicas como la diseminación directa de las unidades, o la coordinación de comparaciones internacionales de patrones nacionales de medida. Es de gran importancia que el BIPM, a través de los Institutos Nacionales de Metrología (INM), coordine internacionalmente la metrología. Además de coordinar las investigaciones científicas que se encarguen de mantener el SI actualizado.

La siguiente figura resume los órganos de la Convención del Metro (4):

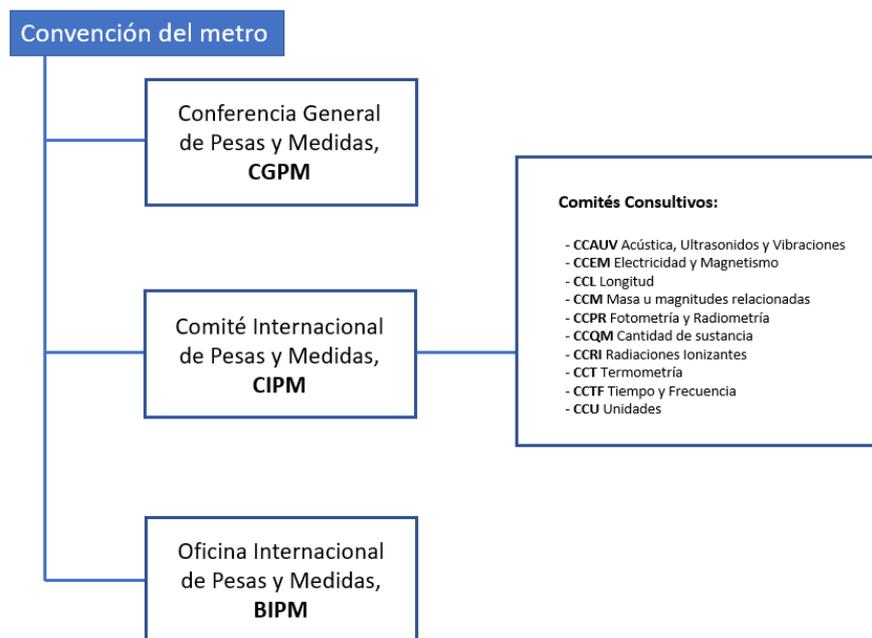


Figura 1. Órganos de la Convención del Metro. Fuente (4).

Organizaciones Regionales de Metrología: Los Institutos Nacionales de Metrología (INM) del mundo, se agrupan en Organizaciones Regionales de Metrología (RMO) debido a los siguientes factores:

- Mejorar los intercambios de información entre los INM de los diferentes países.
- Mejorar la cooperación científica en metrología.
- Simplificar el uso de instalaciones singulares y proporcionar servicios en la región.
- Apoyar el acuerdo CIPM-ARM mediante comparaciones y apoyo a los países menos desarrollados.

- Nacional:

Adentrándonos en el entorno nacional de España, la metrología se ve coordinada por el Consejo Superior de Metrología (CSM), que actúa de órgano superior de asesoramiento y coordinación en Metrología Científica, Técnica, Histórica y Legal. El CSM fue creado por el artículo 11 de la Ley 3/1985, y actualmente es el Ministerio de Industria, Energía y Turismo quien, a través de la Secretaría General de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa, se encarga de él (5). Posee carácter interministerial y sus órganos son los siguientes:

- El pleno, presidido por el Secretario General de Industria.
- La Comisión de Laboratorios Asociados al Centro Español de Metrología (CEM).
- La Comisión de Metrología Legal.
- La Secretaría Técnica, asignada al Centro Español de Metrología (CEM).



Figura 2. Órganos del Consejo Superior de Metrología. Fuente (6).

El Consejo Superior de Metrología, refiriéndonos al ámbito científico, es el encargado de consolidar, coordinar y potenciar el conjunto de instituciones y laboratorios españoles con responsabilidades metrológicas, generando políticas de cooperación en común.

En España, la creación de los patrones nacionales de las unidades de medida se realiza por el Centro Español de Metrología y sus Laboratorios Asociados como podemos observar en la siguiente figura:

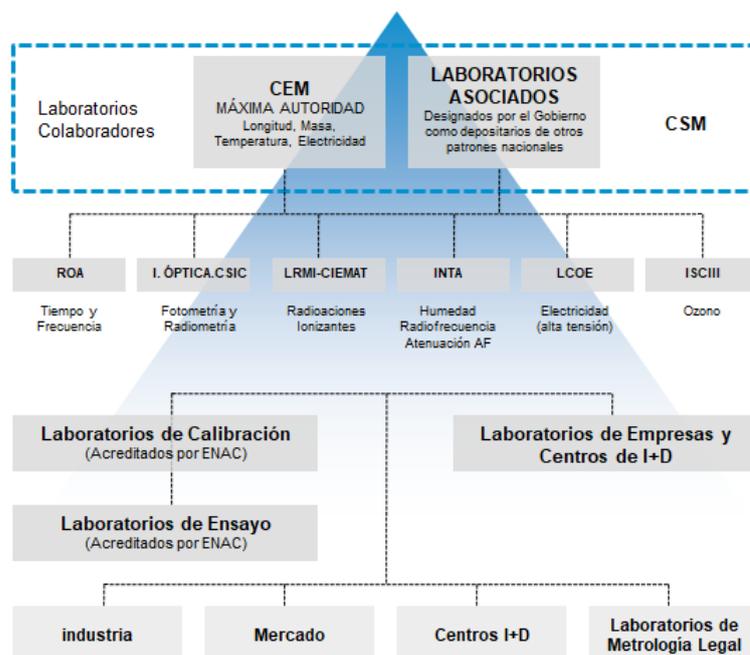


Figura 3. Estructura Metrológica española. Fuente (7).

Como podemos ver en la Figura 3, los Laboratorios Asociados conforman la parte superior de la pirámide metrológica española y son los encargados de establecer y mantener los patrones primarios de las unidades de medida en el SI, el cual fue instaurado legalmente en España por la ley 88/1967, del 8 de noviembre, y del que su última actualización se realizó mediante la ley 32/2014, del 22 de diciembre, estableciéndolo como Sistema Legal de Unidades de Medida (4).

Refiriéndonos a la Metrología Legal, debemos separar en competencias legislativas y competencias ejecutivas. Las legislativas son las correspondientes al estado y es el CEM el encargado de su preparación. Y en el caso de las ejecutivas, estas competencias son atendidas por las comunidades autónomas.

2.1.5 La metrología en la industria

Uno de los campos de mayor aplicación para la metrología es el de la industria, en ella es la encargada de confirmar el buen funcionamiento de los instrumentos utilizados para realizar mediciones, de que los procesos de producción sean válidos y cumplan con las especificaciones, tratando así de buscar la máxima calidad posible en cada uno de los productos que se fabriquen.

La metrología es una ciencia que está en constante innovación, y lo hace a una gran velocidad para poder adaptarse a los requerimientos que las industrias actuales piden. La industria 4.0 en la que nos encontramos en la actualidad, busca la digitalización de los procesos productivos, añadiendo software que, combinado con un hardware mejorado con gran variedad de sensores, sea capaz de realizar procesos de una forma automatizada y con una alta calidad constante. Como ejemplo de esto se puede destacar el uso de cámaras de visión artificial para la realización de procesos de control de calidad.

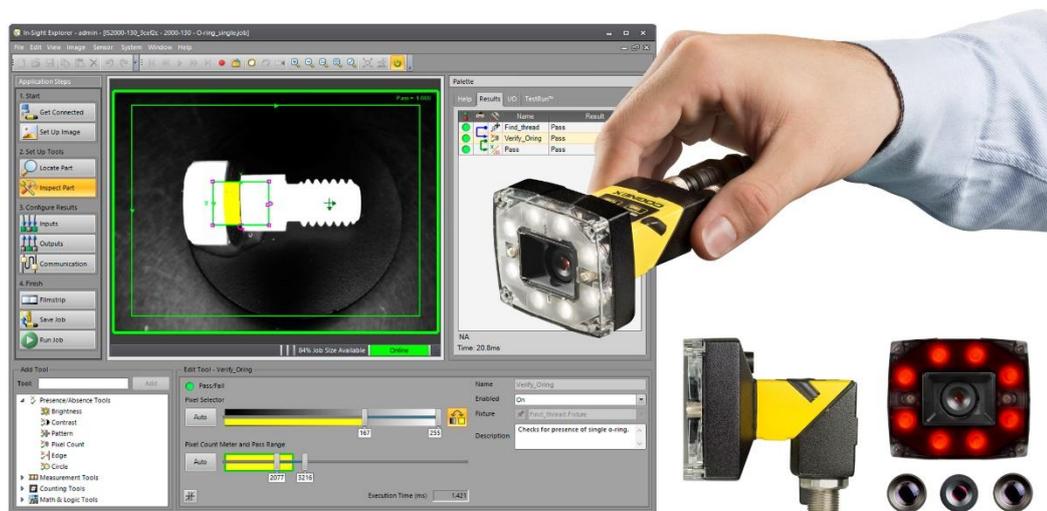


Figura 4. Cámara de la marca Cognex combinada con el software In-Sight para la visión artificial. Fuente (8)

Este tipo de cámaras, acompañadas de robots que las posicionen en el lugar exacto, son capaces de tomar fotos que posteriormente son analizadas por el software que ha sido entrenado para reconocer si el estado de la pieza es correcto o no, dando por resultado un estudio de calidad automatizado.

Es indispensable para cualquier empresa del ámbito industrial tener una alta inversión en metrología, ya que, aunque sea necesario un desembolso inicial para optar a la adquisición de todo el instrumental necesario, así como la contratación de personal cualificado para ello, a la larga supone grandes ahorros debido a la detección temprana de defectos. Si durante la fabricación de un producto, no se realizan diversos controles de calidad que aseguren que ese producto es apto para continuar en la fabricación, la tasa de productos no conformes al final de la misma puede llegar a ser altísima, con lo que eso repercutiría en unos costes altos de desperdicios.



Además, gracias a la metrología y a este tipo de detecciones tempranas de defectos se puede evitar que productos en un estado no deseable pasen a ser comercializados, consiguiendo generar en los clientes insatisfacción con el producto, repercutiendo esto en las futuras ventas de la empresa.



2.2 COMUNICACIÓN BLUETOOTH

2.2.1 Introducción

El término Bluetooth se refiere a una tecnología de red establecida como estándar industrial para la realización de conexiones inalámbricas y que se desarrolló por el grupo de trabajo IEEE 802.15.1 del Institute of Electrical and Electronic Engineers de Estados Unidos.

La comunicación bluetooth, por medio tanto de hardware como software, es capaz de, mediante la utilización de señales de radio en la banda de frecuencias ISM (Industrial, Científica, Médica) de alrededor de 2,4 GHz, transmitir, tanto voz como datos entre diferentes equipos gracias a enlaces de radiofrecuencias en distancias cortas. El objetivo de esta tecnología de comunicación es prescindir de los cables como elementos de conexión entre dispositivos, consiguiendo de esta forma comunicaciones inalámbricas que aporten mayor libertad de movimientos.

El origen de lo que conocemos como bluetooth se remonta al año 1994, en Suecia, a cargo de la empresa Ericsson Mobile Communications, la cual se unió junto con Nokia, IBM, Toshiba e Intel, formando el SIG (Special Interest Group). Actualmente el SIG está compuesto por nueve compañías, 3Com/Palm, Ericsson, IBM, Intel, Lucent Technologies, Microsoft, Motorola, Nokia y Toshiba, siendo estas apoyadas por más de 2000 empresas tecnológicas (9).

2.2.2 Funcionamiento

Para conseguir una comunicación mediante la tecnología bluetooth entre dos dispositivos es necesario que estos cuenten con un software adecuado para controlar la transferencia de datos, así como con un chip bluetooth, integrado en el hardware del dispositivo, que cuente con una unidad transmisora y otra receptora. Las frecuencias dedicadas para la comunicación bluetooth son las que se encuentran entre 2,402 GHz y 2,480 GHz. Los dispositivos de corto alcance (SRD) que sean compatibles con los estándares del bluetooth SIG podrán enviar datos y voz a través de estas frecuencias por todo el mundo y sin necesidad de licencia. Para esto, cada dispositivo cuenta con una dirección MAC de 48 bits (10).

Para establecerse una conexión entre dispositivos uno de ellos se debe establecer como “master” (maestro) siendo los demás dispositivos con los que



se va a conectar “slaves” (esclavos). El conjunto de estos dispositivos establece una red que se llama “piconet”.

Los usuarios de una misma piconet deben encontrarse a una proximidad dentro del alcance de la versión bluetooth que se esté utilizando. Esta puede contar como máximo con 8 dispositivos activos, pero se pueden mantener hasta 200 dispositivos en espera. Un conjunto de hasta 10 piconets forman una scatternet, pudiendo comunicarse todos los dispositivos que formen parte de esta última, aunque con una velocidad de transmisión de datos inferior (10).

2.2.3 Núcleo, modulación y protocolos

El núcleo de la comunicación bluetooth está formado por un transmisor de radio, una banda base y una pila de protocolos. Para que el funcionamiento de este sea correcto es necesario tener en cuenta las interferencias a las que está expuesto, para ello se utiliza un esquema de reconocimiento rápido y saltos de frecuencia, que garantizan el mejor enlace posible.

Con la idea de mejorar la seguridad y confiabilidad de la conexión, existen técnicas como la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) con la que se dividen los datos en diferentes paquetes de información enviados en diferentes frecuencias, esto se conoce como “Hopping Pattern” (11).

La tecnología bluetooth utiliza la modulación GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying, o, modulación por desplazamiento de frecuencia con filtrado gaussiano) con un ancho de banda BT = 0,5. Esta modulación es capaz de conseguir una velocidad de transmisión de 1 Mbps con un coste bajo.

La banda base es la capa física del diseño bluetooth, la cual define canales físicos y enlaces, además de otros servicios como información sobre la conexión, errores de la misma, selección de los canales y la seguridad.

En cuanto a los protocolos, tenemos los siguiente:

- El LMP (Link Manager Protocol) controla activamente el establecimiento de la comunicación, la autenticación y la configuración del enlace.
- El L2CAP (Logical link control and adaptation layer protocol) realiza la segmentación y unificación de los datos de las aplicaciones y la multiplexación y demultiplexación de varios canales a través de un enlace lógico compartido. Este protocolo se sitúa en el nivel de la capa de datos, y permite a las capas superiores enviar y recibir paquetes de hasta 64 Kb.
- El SDP (Protocolo de descubrimiento de servicio) contiene un conjunto de aplicaciones con el objetivo de descubrir los servicios disponibles y



que características tienen. Este tipo de protocolo es necesario ya que los servicios disponibles van cambiando constantemente dependiendo de la cercanía radioeléctrica de los dispositivos.

- El protocolo RFCOMM emula los puertos serie sobre el protocolo L2CAP y está basado en el estándar ETSI TS 07.10 (9).

2.2.4 Versiones y alcance

La primera versión de la tecnología bluetooth fue lanzada en 1999, y se llamó Bluetooth 1.0a. Esta versión comenzó ofreciendo una velocidad de transmisión de 732,2 kbps. Algunas actualizaciones de seguridad dieron lugar a la versión 1.0b.

La versión Bluetooth 1.1 fue la primera capaz de ser una tecnología comercializable y fue a partir de esta que se siguió desarrollando y mejorando en aspectos como seguridad, resistencia a las interferencias y velocidad de conexión.

La siguiente tabla muestra las diferentes versiones de la tecnología Bluetooth lanzadas hasta la actualidad:

Tabla 1. Versiones de la tecnología Bluetooth. Fuente (10).

Versión de Bluetooth	Lanzamiento	Máx. Velocidad de transmisión de datos	Aspectos diferenciales
Bluetooth 1.0a	Julio 1999	732,2 kb/s	Primera versión oficial
Bluetooth 1.0b	Diciembre 1999	732,2 kb/s	Mejoras generales
Bluetooth 1.1	Febrero 2001	732,2 kb/s	Primera versión comercializable; cifrado mejorado; hasta siete conexiones simultaneas
Bluetooth 1.2	Noviembre 2003	1 Mb/s	Compatibilidad descendente con 1.1; menos susceptible a interferencias gracias al AFH
Bluetooth 2.0+EDR	Noviembre 2004	2,1 Mb/s	Triplica la tasa de transmisión de datos; métodos de ahorro de energía
Bluetooth 2.1+EDR	Agosto 2007	2,1 Mb/s	Conexión automática sin PIN
Bluetooth 3.0+HS	Abril 2009	24 Mb/s	Canal adicional de alta velocidad (HS) basado en Wi-Fi y UWB
Bluetooth 4.0 LE	Diciembre 2009	24 Mb/s	Pila de protocolos Low Energy (LE); cifrado de 128 bits
Bluetooth 4.1	Diciembre 2013	25 Mb/s	Los dispositivos más pequeños ya no necesitan intermediarios; IPv6
Bluetooth 4.2	Diciembre 2014	25 Mb/s	Mejoras generales
Bluetooth 5.0	Diciembre 2016	50 Mb/s	Aumento del alcance y de las tasas de transmisión de datos



La versión 4.0 LE, gracias a los protocolos Low Energy consiguió un bajo consumo, lo que permitió el uso de Bluetooth en dispositivos de muy pequeño tamaño. Este estándar inalámbrico fue uno de los mayores impulsores del internet de las cosas (Internet of Things, IoT).

La versión 4.1 introduce la compatibilidad con IPv6, con lo que se consigue que todos los dispositivos del internet de las cosas compatibles con bluetooth tengan una dirección IP propia para poder ser controlados por los usuarios a través de internet.

Es en diciembre de 2016 cuando se lanza la última versión disponible, la versión Bluetooth 5.0, la cual sigue trabajando en la especialización de los dispositivos del internet de las cosas y consigue un muy bajo consumo de energía con el cual se ha aumentado la capacidad de transmisión en un 800 por ciento y el alcance hasta 200 metros.

En cuanto al alcance, podemos diferenciar tres tipos que dependen de las necesidades del dispositivo. El tipo 1, tiene un alcance máximo en interiores de 100 metros y en exteriores de 200 metros, es el empleado, por ejemplo, en ordenadores. El tipo 2, consigue un alcance máximo en interiores de 10 metros y en exteriores de 50 metros, se utiliza, por ejemplo, en adaptadores bluetooth y ordenadores portátiles. Por último, el tipo 3, tiene un alcance máximo en interiores de 1 metro y en exteriores de 10 metros, y lo podemos encontrar en dispositivos móviles. Es importante diferenciar entre uso en interiores y exteriores debido a los obstáculos que se pueden encontrar en interiores, ya sean paredes, muebles, estructuras metálicas... (10)

2.2.5 Aplicación

La conexión Bluetooth se ha convertido en una tecnología indispensable en muchos ámbitos, pero atendiendo al ámbito industrial que es el que nos incumbe, esta tecnología cada vez es más utilizada al igual que se ha mencionado con respecto al Internet de las cosas (IoT). Esta tecnología es una de las bases que sustenta la Industria 4.0.

La tecnología de la comunicación inalámbrica en la industria es capaz de mantener máquinas y plantas de fabricación interconectadas consiguiendo con esto automatizar aún más los procesos de producción. La Industria 4.0 surgida como una nueva revolución industrial trata de la incorporación de nuevas tecnologías en busca de una transformación digital de la industria. Con esta revolución se busca la automatización, informatización y digitalización de los medios de producción y fabricación mediante el intercambio de datos, los cuales son tratados por algoritmos que conducen al control y organización de



esta producción. La tecnología bluetooth aporta facilidades para realizar estos intercambios de datos sin la necesidad de multitud de cables y pudiendo comunicarse con multitud de dispositivos (12).

En este proyecto, la comunicación bluetooth va a ser una parte crucial ya que va a permitirnos registrar datos en nuestro software de una forma cómoda y sencilla. Para ello contamos con dos dispositivos con el hardware necesario para hacer funcionar esta tecnología, como son, un ordenador, y un calibre, o pie de rey, digital con un módulo de conexión bluetooth. Este hardware, unido con nuestro software permitirá al operario introducir datos dentro del programa sin necesidad de cables y con una mayor libertad de movimiento que le ayudará a mejorar su productividad.



2.3 ESTUDIO DE CAPACIDAD Y TÉCNICAS SPC

2.3.1 Introducción

En la actualidad, son muchas las técnicas y herramientas utilizadas en la industria en busca de mejorar la calidad de los productos que son fabricados. Una de estas técnicas es el control estadístico de procesos o SPC (Statistical Process Control), con la cual se lleva trabajando alrededor de 100 años.

El éxito de este tipo de técnicas reside en el hecho de que la búsqueda de la competitividad por parte de las empresas ha ido creciendo de una forma acelerada por todo el planeta. Las empresas cada vez son capaces de adaptarse a las necesidades del mercado de una mejor forma y esto es gracias a los métodos de trabajo que han ido evolucionando con los años.

Conseguir una producción de una alta calidad no solo mejora el posicionamiento de los productos en el mercado, sino que consigue una gran reducción de desperdicios, así como de tiempo de trabajo que ayuda a la empresa a ser más productiva (13).

2.3.2 Lean Manufacturing

El término Lean Manufacturing es, en inglés, el termino aplicado para hablar de tipo de producción flexible o ágil, capaz de adaptarse a las necesidades del mercado. Esta filosofía de producción busca, mediante una óptima gestión, reducir al máximo los recursos desaprovechados, ya sean materias primas, empleados, costes de oportunidad, etc.

Las bases de esta filosofía de trabajo se localizan en Japón, de manos de los estudios de William Edwards Deming. Pero para llegar hasta el origen de esta metodología debemos remontarnos hasta la primera mitad del siglo XX, cuando la industria automovilística comenzó a utilizarla, y a partir de esta, se extendió a otro tipo de industrias (14).

Los estudios que existían hasta la primera mitad del siglo XX iban en contra de los que se requiere hoy en día. Fue con el Fordismo cuando algunos de los problemas que existían hasta entonces fueron corrigiéndose, consiguiendo, por ejemplo, una mejor estandarización de los puestos de la fabricación.

Los posteriormente creadores de Toyota Motor Company, en Japón, implementaron unas técnicas que conseguían a través de señales visuales en las máquinas, unir a la maquina con el trabajador de forma que este último



aportara una supervisión humana a la máquina. Con esto además conseguían controlar varias máquinas al mismo tiempo mejorando así su productividad.

Los japoneses se vieron obligados a investigar y mejorar sus técnicas debido al reducido tamaño del mercado japonés y la gran demanda que debían cubrir. Esto sumado al mal momento económico por el que pasaban las empresas del país tras un largo periodo de guerras, que les colocaba en una situación de inferioridad con respecto a países como Estados Unidos. Por ello, la industria japonesa optó por ajustar sus precios de venta al público lo más bajo posible, e incluir una gran gama de producto, aunque con pocas unidades de cada uno. Esto iba totalmente en contra de los que Estados Unidos estaba realizando en esos momentos.

Las medidas adoptadas por Toyota dieron lugar al método “Just in time” el cual se asocia directamente con esta empresa, y trata de intentar reducir los gastos de almacenaje y logística de las materias primas necesarias para la producción, haciendo que estas lleguen a la fábrica justo a tiempo para ser utilizadas. Además, este método no solo se aplicaba a las materias primas, sino también a los productos finales que iban a ser entregados, produciendo así solo lo demandado en cada momento. Otros métodos que implementaron fue la búsqueda de la reducción de desperdicios, la mejora de acuerdos con proveedores, y, de gran importancia, la pronta detección de defectos tanto ya existentes, como defectos con gran posibilidad de aparecer a posteriori. Para ello, la herramienta utilizada fue el control estadístico de procesos (SPC) (15).

Uno de los métodos más relevantes en el campo del Lean Manufacturing, es el llamado SMED (Single-Minute Exchange of Die), o también conocido como “Cambio rápido de herramienta/molde”. Este método es capaz de reducir de los tiempos necesarios para realizar un cambio de herramienta o de molde entre los diferentes lotes de una producción, consiguiendo así reducir el tiempo de inactividad del proceso. Durante el tiempo de preparación necesario para los cambios de lote, se distinguen dos tipos de ajustes o tiempo:

- Ajustes/tiempos internos: El que transcurre con la máquina parada.
- Ajustes/tiempos externos: El que transcurre con la máquina en marcha mientras se realizan diferentes cambios.

El método SMED consta de las siguientes etapas: (16)

- Etapa preliminar, en la que se crea un equipo multidisciplinar de mejora.
- 1ª Etapa, no se diferencia entre tiempos de preparación internos y externos.
- 2ª Etapa, se realiza la separación de los tiempos de preparación internos y externos.

- 3ª Etapa, se convierten todos los tiempos de preparaciones internas posibles en externas.
- 4ª Etapa, se busca perfeccionar las operaciones de preparación en todos los aspectos.

Al conseguir disminuir el tiempo que se necesita para realizar un cambio de molde o herramienta, obtenemos una capacidad superior de realizar más cambios de modelo en nuestra fabricación, pudiendo también fabricar lotes más pequeños y controlados, así como pudiendo planificar mejor sus plazos de entrega y ahorrando en almacenaje y logística.

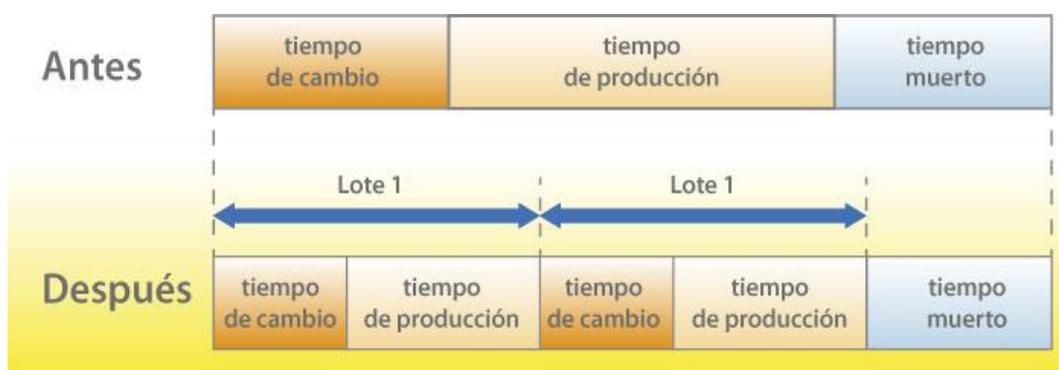


Figura 5. El método SMED disminuye el tiempo muerto. Fuente (16).

A su vez, este método nos puede aportar la ventaja de ver más productivo mediante el hecho de tener durante más tiempo la máquina en funcionamiento.



Figura 6. El método SMED aporta capacidad de producción. Fuente (16).



2.3.3 Six Sigma (6σ)

Otra de las metodologías existentes que tienen como objetivo la prevención de errores en los procesos industriales es la llamada Six Sigma (6σ). Esta metodología fue implementada por Motorola en 1986, y con ella buscaban conseguir mejorar sus productos, con un servicio más rápido y a un coste inferior.

En procesos industriales, trabajar con una baja calidad da lugar a los siguientes costes:

- Fallos internos: Ocasionados por productos defectuosos, retrabajo y problemas con el control de los materiales utilizados.
- Fallos externos: Ocasionados por los productos que han sido devueltos por el cliente y garantías.
- Evaluaciones de los productos: Se deben a las inspecciones que se realizan durante los procesos, la calibración de las máquinas, mantenimientos, etc.
- Prevención de fallos: Costes de diseño, pruebas de capacitación de los trabajadores y mejoras de calidad.

Por ello, es de gran utilidad la aplicación de la metodología 6σ ya que se consigue disminuir los costes por baja calidad y se obtienen productos mejores y servicios más eficientes.

La mayoría de los países con una alta industrialización utilizan esta metodología ya que con ella detectan posibles problemas de cuello de botella, defectos, pérdidas de tiempo en la producción, etc.

Se elaboró un estudio en 1997 que demostró que una compañía que no utilizaba la metodología 6σ gastaba un promedio del 10% de sus ganancias en reparaciones externas e internas, mientras que una empresa que si la utilizaba gastaba un promedio del 1% de sus ganancias en el mismo tipo de reparaciones. Con esta metodología también es posible realizar comparaciones entre empresas, productos, servicios, etc. Esto se consigue gracias a herramientas propias del Six Sigma (17).

El Six Sigma es un programa que se define en dos niveles, el operacional y el gerencial. En el primero de estos, se utilizan herramientas estadísticas para detectar los defectos mediante las mediciones de las variables de los procesos industriales. El segundo, analiza los procesos con el fin de aumentar la calidad de los productos, los procesos y los servicios.



Para implementar el proceso de mejora con la metodología Six Sigma, se siguen los siguientes pasos:

- Definir el producto.
- Identificar los requisitos que exige el cliente.
- Comparar estos requisitos con las especificaciones de los productos.
- Describir el proceso.
- Implementar el proceso.
- Medir la calidad.

Para ello es necesario contar con diferentes herramientas estadísticas, las cuales se utilizan para conocer los problemas en la producción y obtener las causas de los defectos. Las herramientas más utilizadas son el Diagrama de Flujo de Procesos, el Diagrama Causa-Efecto, el Diagrama de Pareto, Histograma, Gráfica de Corrida, Gráfica de Control, Diagrama de Dispersión y Modelo de Regresión.

También existe la llamada Gráfica de Six Sigma. Esta se utiliza para demostrar el nivel de defectos encontrado durante el proceso de variación y la media que se obtiene. Como ya se ha dicho anteriormente, el objetivo del 6σ es conseguir la menor cantidad de defectos posible, en concreto 3,4 partes por millón, que es lo que podemos aproximar a cero defectos.

La media sirve para localizar el centro del proceso de variación, siendo este centro el punto en el que no se produce ninguna alteración. Con esta gráfica, se pueden evaluar los procesos en base a diferentes niveles, que van desde 1σ hasta 6σ . La mayor parte de los criterios necesarios para los diferentes niveles están estandarizados internacionalmente. Los porcentajes de confiabilidad van desde el 68,27% del nivel 1σ , al 99,999943% del nivel 6σ , y es el área bajo la curva el que comprende el valor de la media y las desviaciones hacia la izquierda y hacia la derecha (17).

En la siguiente figura se muestra la representación gráfica de la distribución normal de los datos junto con los niveles de mejora de la metodología Six Sigma.

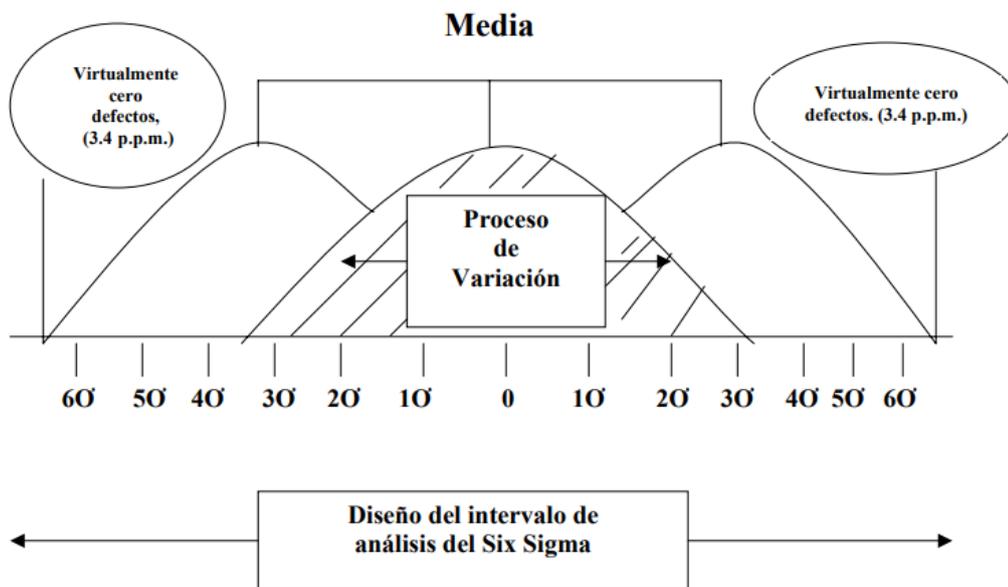


Figura 7. Representación de los niveles de mejora en Six Sigma. Fuente (17).

En la elaboración de productos a nivel industrial, es muy importante el proceso de mejora continua realizada sobre estos productos, este proceso podemos segmentarlo en 4 etapas:

- **Medición:** Trata de seleccionar una o varias características del producto, tomar medidas de estas y registrar los datos por ejemplo con un software como el que ocupa este proyecto.
- **Análisis:** Los datos tomados se someten a estudio mediante herramientas estadísticas.
- **Mejora:** Se identifican las características del proceso a mejorar, y se implementan mejoras en ellas.
- **Control:** Se asegura que todas las condiciones del proceso que se ha sometido a la mejora están documentadas y monitoreadas con el método de control de procesos.

La metodología Six Sigma también trata de formar al personal con la idea de mejorar sus capacidades en el proceso y así aumentar la calidad del producto final. Para ello es necesario que el personal sea entrenado para aplicar correctamente cada uno de los procesos relacionados con esta metodología (17).



2.3.4 Técnicas SPC (Statistical Process Control)

El comienzo del control estadístico de procesos (SPC) data del año 1920 de manos de la compañía Western Electric, siendo Walter Shewhart quien comenzó el estudio que aseguraba que, en los procesos del mundo real, era bastante inusual que los datos estuvieran distribuidos normalmente. Por ello, llegó a la conclusión de que se pueden distinguir las variaciones generadas en los procesos en dos tipos, variaciones innatas al proceso, generalmente llamadas variaciones comunes, y variaciones extra, llamadas también variaciones especiales. Estas últimas son de gran importancia ya que su ausencia determinaría que el proceso está bajo control, y en el caso de que existieran variaciones especiales, el proceso estaría fuera de control (18).

El control estadístico de procesos trata de conocer las características de calidad de los productos, compararlas con respecto a las especificaciones establecidas para ellos por el fabricante o el cliente, y en el caso de que estas características de calidad no cumplan las especificaciones, buscar la forma de que sean corregidos para que no vuelva a suceder.

Los procesos de producción de la actualidad involucran máquinas, materias primas, métodos, mano de obra y medio ambiente, por lo que en cualquier proceso existe un grado de variabilidad entre los diferentes productos producidos de la misma manera, siendo esta variabilidad imposible de eliminar por completo debido a que los factores mencionados no son constantes. Estas variaciones pueden ser producto de la variación de los suministros, del desgaste de la herramienta, de cambios de turno en los operarios, etc.

También debemos distinguir entre dos tipos de variación. La variación natural, es producida por grandes cantidades de causas, insignificantes por sí mismas, pero importantes en conjunto. Estas causas son aleatorias, y por ello su estudio es realizado por métodos estadísticos. La variación accidental, en cambio, la producen causas asignables, especiales o atribuibles, es decir, causas de las que podemos llegar a concretar cual es la razón que las ha producido, y que generalmente producen desviaciones de mayor importancia (19).

Lo que se pretende con el control estadístico de procesos, es conseguir identificar las causas asignables y tomar medidas para corregirlas, de esta forma obtendríamos un proceso afectado únicamente por causas comunes, el cual es previsible y se puede cuantificar su variación.

Tipos de gráficos de control:

Un gráfico de control es una representación gráfica de una característica de calidad, ya sea medida o calculada mediante muestras de productos, en función del número de muestras o en función del tiempo. El valor medio de la

característica a representar se indica mediante una línea central. También se representan en los gráficos de control tanto el límite superior de control (LSC) como el límite inferior de control (LIC). Siempre que los puntos permanezcan entre los límites de control, se considera que el proceso está bajo control por lo que no es necesario intervenir en este. Por el contrario, cuando uno de los puntos se encuentre fuera de estos límites, se considera que existen evidencias de que el proceso está fuera de control, por ello, se introducirán correcciones en el proceso con el objetivo de eliminar las causas asignables que den como resultado puntos fuera de los límites.



Figura 8. Gráfico de control. Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos de control pueden ser tanto de control por variables, como de control por atributos. El primero de ellos es capaz de medir la característica de calidad sometida a estudio expresándose mediante un número. En estos casos lo más correcto es expresar la característica de calidad mediante una medida de tendencia central y una medida de la variabilidad que le afecta. En el segundo caso, los gráficos de control por atributos, los productos se clasifican como conforme o disconforme, dependiendo esto de si posee o no unos atributos que forman parte de las especificaciones, o también es posible contar cuantas disconformidades existen en un mismo producto.

Volviendo a los gráficos de control por variables, los más usados son el gráfico de medias y el gráfico de rangos. Sus objetivos son mejorar la calidad, definir la capacidad del proceso, tomar decisiones con respecto al cumplimiento de sus especificaciones de producto, con respecto a los procesos de fabricación, y con respecto a los productos ya elaborados.

En cambio, con respecto a los gráficos de control por atributos, los más usados son el gráfico de proporción de unidades defectuosas, el gráfico del número de unidades defectuosas, el gráfico de número de defectos y el gráfico del número de defectos por unidad (13).



Beneficios de la aplicación del control estadístico de procesos (SPC):

Las empresas que tienen implementado el control estadístico de procesos poseen los siguientes beneficios:

- Mejora del seguimiento de los procesos con escasos defectos mediante el gráfico de proporción de unidades defectuosas, de gran ayuda para la monitorización de procesos de muy alta calidad.
- Obtención de los valores en tiempo real ayudando a una detección temprana de los defectos y consiguiendo así proceder a la introducción de mejoras. Además, el SPC simplifica mucho la interpretación de los gráficos para los trabajadores.
- Da la posibilidad de evaluar la capacidad de un proceso que se encuentra entre los límites de tolerancia y especificaciones.
- Mejora la estandarización de los procesos y la reducción de los costes ya que su principal foco es la variabilidad debida a causas asignables.
- Mejora las tomas de decisiones necesarias para lograr una calidad deseada en la producción gracias a los mejores sistemas de medición y a la fabricación integrada (13).

Muestreo en el control estadístico de procesos (SPC):

En los gráficos de control, se representan los valores observados de la característica de calidad que se estudia, todos ellos evaluados en una muestra de tamaño n en cierto instante. Debido a esto, es necesario tener en cuenta el tamaño muestral y la frecuencia del muestreo.

El tamaño muestral con el que se va a trabajar depende de factores tanto económicos como estadísticos. Si se realiza un muestreo con un número de muestras mayor, la varianza será menor y resultará más sencillo observar cuales son las desviaciones del estado de control, pero a cambio, el estudio resultará más costoso a nivel económico. Las mediciones de las características de calidad pueden tener un alto coste debido a la cantidad de tiempo que puede costar llevarlas a cabo, y es por ello que en muchas ocasiones no será posible realizar grandes muestreos. Tomando p como probabilidad de que un punto se encuentre fuera de los límites de control del gráfico, resulta sencillo calcular el valor de la probabilidad, y esta dependerá del tamaño muestral con el que se esté trabajando. Según la distribución geométrica:

$$\text{Número medio de muestras hasta la detección (ARL)} = \frac{1}{p}$$



Esto se utiliza para tomar la decisión del tamaño muestral necesario, así como la frecuencia de muestreo que se necesita, aunque dependerá de más factores (20).

Capacidad de un proceso:

En estadística, la varianza de una variable cuantitativa x se define como $\text{Var}(x) = \sigma^2$, siendo σ la desviación típica. Con estos estadísticos podemos definir el término de la capacidad de un proceso, siendo este igual a seis veces la desviación típica del proceso.

$$\text{Capacidad} = 6\sigma$$

La medida de la calidad de un proceso mediante la capacidad es muy usada en la industria. La igualdad anterior deja ver que, a mayor desviación típica, mayor es el índice de capacidad, por lo que la capacidad es una cualidad negativa de un proceso. Para obtener una estimación de la capacidad se procede de la siguiente forma:

- Selección de n muestras de tamaño k obtenidas en un periodo de tiempo lo suficientemente grande.
- Realización del gráfico de control de la media y del gráfico de control de dispersiones típicas para evaluar la dispersión.
- Eliminación de muestras fuera de límites en el caso de existir, y realización de los gráficos de control anteriores con las muestras actuales. Realizar las iteraciones suficientes para conseguir que todas las muestras estén dentro de los límites de control.
- Verificación de la hipótesis de normalidad de los datos mediante algún proceso estadístico.

Bajo la hipótesis de normalidad, el intervalo de $\mu \pm 3\sigma$, es decir, longitud 6σ , es capaz de recoger el 99,7% de la población, por lo que la capacidad del proceso representa el intervalo de la producción total de una forma bastante eficaz. En el caso de no cumplirse la hipótesis de normalidad, es probable que el intervalo 6σ contenga un porcentaje muy inferior al 99,7% de la población. Debido a esto, es necesario el uso de los índices de capacidad como indicativo de la calidad del proceso en conjunto con las demás herramientas estadísticas (20).

Índices de capacidad:

- CAM y CAP: Es necesario diferenciar la capacidad del proceso con las tolerancias propias del producto. Estas últimas son requerimientos técnicos que se crean con el objetivo de dar un producto por admisible o no admisible para su uso, en cambio, la capacidad es una característica estadística del proceso en el que se produce ese



producto. Para poder comparar ambas, existen los índices de capacidad.

Dependiendo del que rango de muestras utilizado para la obtención de la desviación típica, se distinguirá entre CAM y CAP

$$CAM = \frac{LTS - LTI}{6\sigma_i} \qquad CAP = \frac{LTS - LTI}{6\sigma_p}$$

Siendo:

- LTS = Límite de Tolerancia Superior.
- LTI = Límite de Tolerancia Inferior.
- σ_i = Desviación estándar intrínseca.
- σ_p = Desviación estándar de producción.

La desviación estándar intrínseca evalúa una muestra dentro de una población, en cambio, la desviación estándar de producción evalúa la población al completo. Es decir, se utiliza el CAM para obtener el índice de capacidad de un conjunto de muestras, y el CAP para obtener el índice de capacidad de la población completa.

Si $CAM < 1$, o de la misma manera $CAP < 1$, el proceso no es capaz de cumplir las especificaciones. La afirmación contraria indicaría que $CAM > 1$, o $CAP > 1$ indican que el proceso es capaz. Sin embargo, en la actualidad, eso se considera insuficiente, por lo que se toma el valor de $CAM > 4/3 \approx 1,33$, o $CAP > 4/3 \approx 1,33$, como valor necesario para asegurar el proceso como capaz.

En resumen:

- $CAM/CAP < 1$, proceso no capaz.
- $1 \leq CAM/CAP \leq 1,33$, el proceso necesita monitorización.
- $CAM/CAP > 1,33$, proceso capaz.

Hay que añadir que estos parámetros no son un estándar que se aplique en la totalidad de los procesos y de las empresas. Es posible que cada proceso o empresa requiera un valor del índice de capacidad específico.

- Índices de capacidad unilaterales CpK_i y CpK_s : Existen ocasiones en las que los límites de tolerancia que se exigen son unilaterales, cuando esto sucede, la tolerancia es la diferencia entre el valor nominal central y el valor extremo indicado en las especificaciones del producto. Mediante

estos índices de capacidad, comparamos esta diferencia con el valor obtenido al multiplicar por tres el valor de sigma (3σ). Esto da lugar al índice de capacidad inferior y al índice de capacidad superior, que se definen de la siguiente manera:

$$CpK_i = \frac{\mu - LTI}{3\sigma}$$

$$CpK_s = \frac{LTS - \mu}{3\sigma}$$

Para que el proceso cumpla las especificaciones, cualquiera de los dos índices anteriores debe ser mayor que 1.

- Índice de capacidad unilateral mínimo CpK: El valor que caracteriza la relación que existe entre la media de un proceso con la distancia de esta con respecto al límite de tolerancia establecido por las especificaciones es el llamado índice de capacidad CpK (21). Su principal ventaja es la capacidad de mostrar el descentramiento con respecto al valor nominal que tiene el proceso.

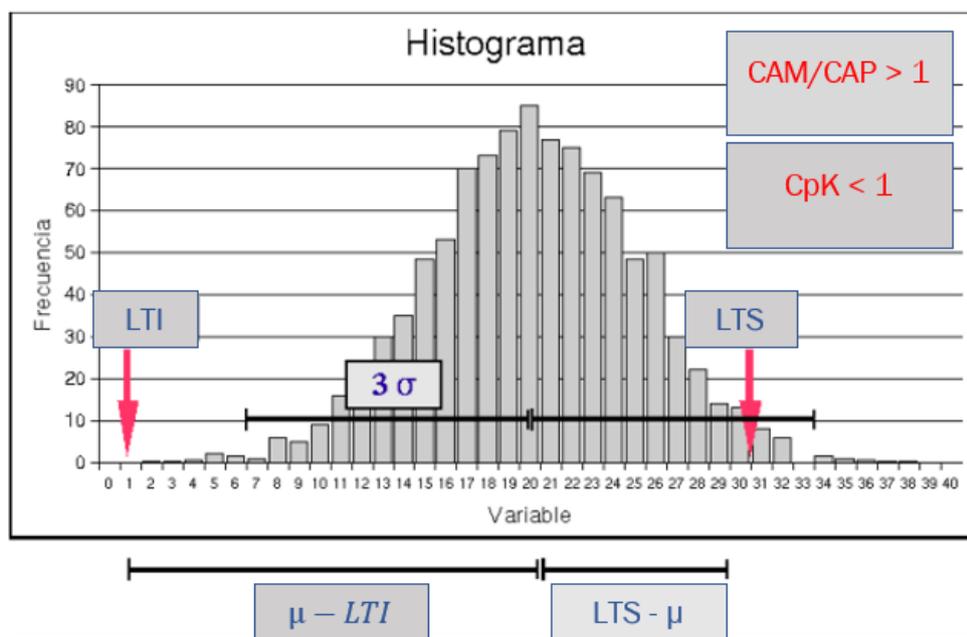


Figura 9. Observación del descentramiento con el CpK. Fuente (22).



Como se puede observar en el histograma anterior, el índice de capacidad CAM o CAP (dependerá del tipo de desviación típica que se aplique) es mayor que uno, por lo que estaríamos dando el proceso por capaz, pero es el valor del CpK el que nos indica que al ser menor que 1, el proceso realmente no es capaz ya que está descentrado.

El valor de este índice de capacidad viene definido por el mínimo valor de los índices de capacidad unilaterales. Por lo que:

$$CpK = \text{mín} (CpK i, CpK s)$$

En este caso, al igual que los anteriores, cada producto o cada empresa puede establecer un valor de CpK que dependerá de sus propios requerimientos, pero por lo general, se suele establecer un valor mínimo de Cpk de 1,33, considerando que, si el proceso obtiene un valor superior a este, está dentro de las especificaciones.



2.4 SOFTWARE INDUSTRIAL

2.4.1 Mitutoyo MeasurLink

Mitutoyo es una empresa de origen japonés especializada en los instrumentos de medida y todo lo relacionado con la tecnología en el ámbito de la metrología.

Su apuesta en cuanto a los estudios de control estadístico de procesos se basa en el software MeasurLink. Este software es capaz de recoger y centralizar los datos de un estudio de calidad acompañado del hardware propio de la empresa como son sus propios calibres, micrómetros, etc. MeasurLink es capaz de ofrecer datos en tiempo real, así como informes completos de los estudios de calidad realizados, proporcionando de esta forma la información necesaria para tener el proceso controlado en todo momento, mejorarlo y prevenir defectos.

Los instrumentos de medición de Mitutoyo son capaces de enviar datos a través de cables, así como en alguno de los casos de forma inalámbrica, hasta el ordenador en el cual se encuentre instalado el software para poder tratar esos datos. Por lo tanto, la marca ofrece un ecosistema de productos muy completo para las empresas que buscan mejorar la calidad de sus productos (23).

El software MeasurLink se encuentra actualmente en su versión número 9, por lo que se ha ido depurando durante bastante tiempo, versión tras versión. En esta última se encuentran a disposición diferentes módulos:

- Real-Time Standard.
- Real-Time Professional.
- Real-Time Professional 3D.
- Process Analyzer Professional.
- Process Manager.
- Gage R&R.
- Gage Management.
- Report Schedule.
- Collection Schedule.

De entre todos estos módulos, los más interesantes en cuando a las técnicas SPC tratadas en este trabajo son los siguientes (24):

Real-Time Standard: Este módulo está diseñado para la adquisición y el análisis de datos en tiempo real, la verificación de las variables y atributos de los productos, y la minimización de defectos en la producción. Con él es posible hacer estudios de valores nominales, tolerancias y trazabilidad. Su principal

característica es la recopilación de los datos en el mismo punto de fabricación, alertando además a los operarios de las tendencias, ciclos y disconformidades que se van ocasionando.

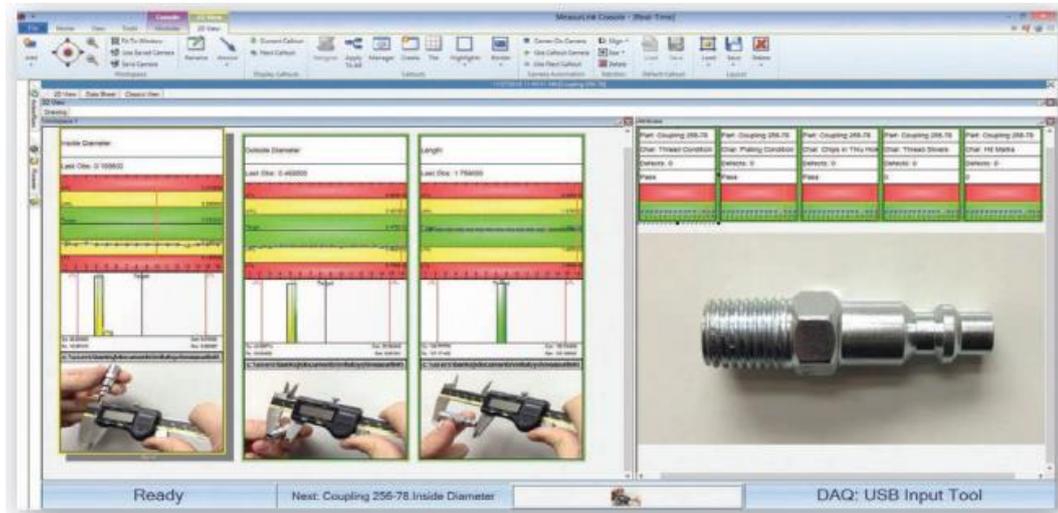


Figura 10. Interfaz del módulo Real-Time Standard de MeasurLink. Fuente (24).

Real-Time Professional: Este módulo es una pequeña ampliación del anterior añadiendo la posibilidad de adquirir datos con máquinas de medición robotizada y máquinas de control de calidad por visión. Además, este módulo también añade la posibilidad de trabajar con filtros de datos pudiendo gracias a esto seleccionar subconjuntos de datos dentro de toda la población para someterlos a estudio.

Process Analyzer Professional: Este módulo es capaz de realizar análisis de datos que han sido recopilados en una red de estaciones de medición. Con él pueden combinarse los datos de las diferentes estaciones, filtrarse e incluso exportar esos análisis para poder identificar tendencias de la producción a largo plazo pudiendo así mejorar la calidad del proceso. A su vez, está diseñado para la visualización y manipulación de los datos en tiempo real dentro de un entorno de redes de estaciones. Es capaz de manejar bases de datos para grandes industrias pudiendo filtrarlos por zonas, años, meses, turnos, días, etc.

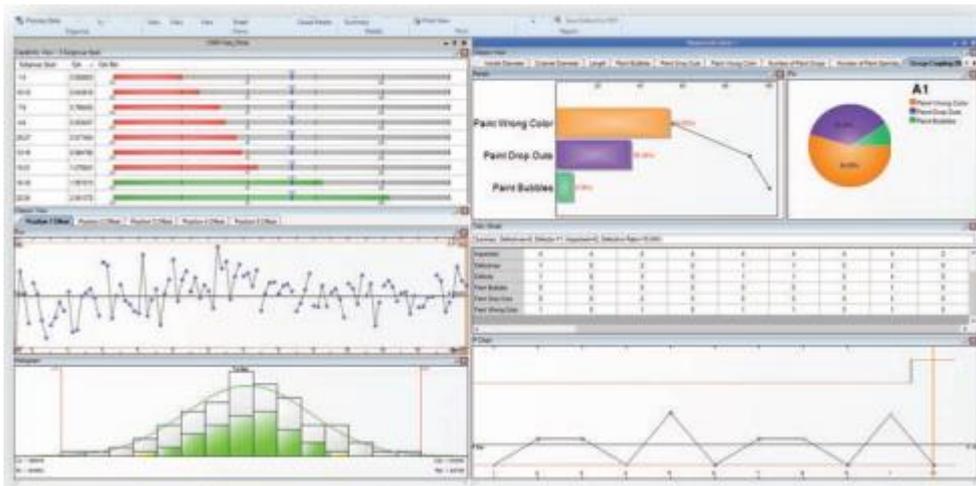


Figura 11. Interfaz del módulo Process Analyzer Professional de MeasurLink. Fuente (24).

2.4.2 InfinityQS

Esta empresa norteamericana lleva desde 1989 trabajando con empresas de todo el mundo en la búsqueda de la excelencia en la calidad. Para ello ofertan un software de control estadístico de procesos (SPC) respaldado por un gran número de expertos dentro de su empresa, todos ellos con certificaciones Certified Quality Engineers (CQE), cinturón verde y negro Six Sigma.

El software de InfinityQS ofrece la posibilidad de ver los datos a lo largo de códigos de productos, líneas o plantas, en un solo informe y con independencia de que el proceso de fabricación sea de alto volumen o de bajo volumen.

Flexibilidad: Este software ofrece la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades de la empresa y del proceso. Ofrece la posibilidad de trabajar en forma local o en una plataforma basada en la nube. También, es capaz de recopilar, estandarizar, agregar y almacenar datos en un único repositorio de datos unificados para poder dar mayores opciones en cuanto al análisis de los mismos. Añade la capacidad de activar alertas automáticas pudiendo alarmar al personal adecuado en sus plantas. Así mismo, la interfaz es adaptable al tipo de usuario aportando diferente información dependiendo de su puesto.

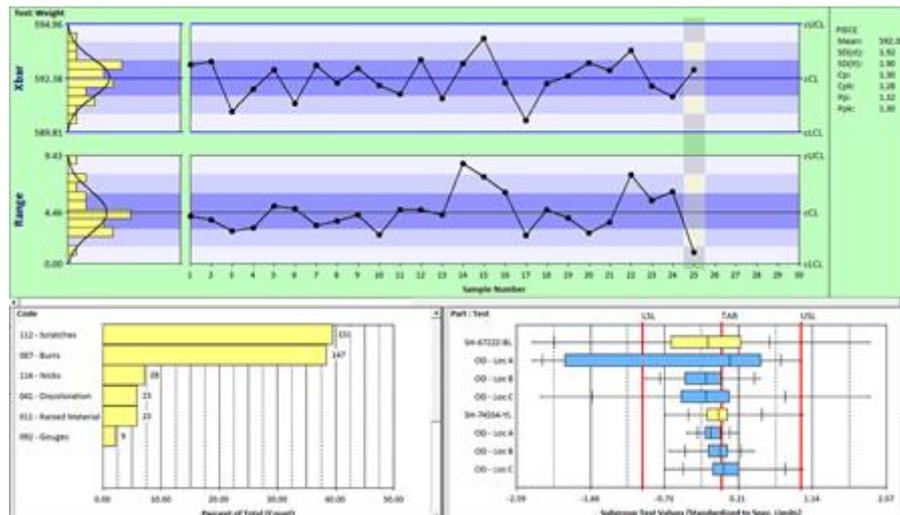


Figura 12. Interfaz gráfica de InfinityQS. Fuente (25).

Exhaustividad: El software de InfinityQS está desarrollado teniendo en cuenta los esfuerzos de control estadístico de procesos tan desafiantes a los que se enfrentan industrias como la automotriz, la aeroespacial, la alimentaria, etc. Estas industrias, en muchas ocasiones requieren de cortos plazos de producción y cambios constantes de producto. Proporciona una amplia trazabilidad y un acceso sencillo a los datos para reducir los tiempos de preparación de los estudios de capacidad. Se cuenta con certificaciones ISO 9001 e ISO 27001 (25).

El software se puede utilizar en todas las etapas del proceso de fabricación, desde la inspección de la recepción de las materias primas y la puesta en marcha de las máquinas, hasta los productos finales. Y para ello cuenta con herramientas que respaldan comparaciones entre códigos de productos, líneas de producción e incluso diferentes ubicaciones geográficas.

Velocidad: La rápida recopilación de datos, así como su rápido análisis es uno de los puntos fuertes de este software. Permite una rápida configuración por lo que se ahorra tiempo en la realización de este tipo de tareas. Además, facilita la ejecución de comparaciones entre productos, turnos o líneas, todo en un gráfico o informe.

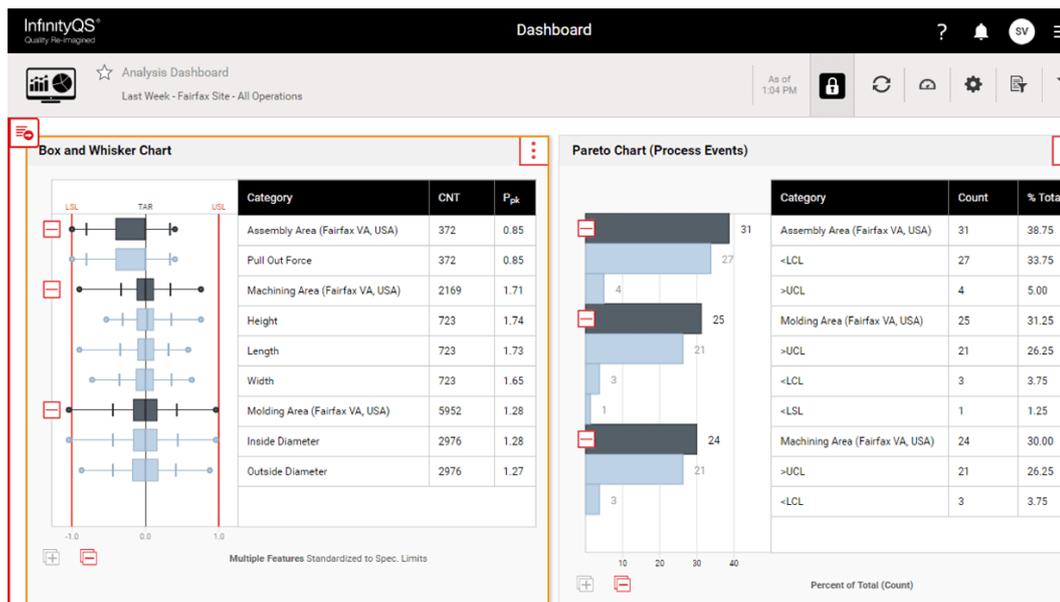


Figura 13. Interfaz de InfinityQS. Fuente (25).

Simplicidad: InfinityQS ofrece soluciones como la asistencia técnica de personal capacitado, para facilitar ayuda a sus clientes y maximizar su rendimiento en el SPC. Además, ofrece interfaces adaptables a los usuarios con el fin de simplificar el modo de trabajo con el software (25).

2.4.3 Hexagon Q-DAS Statistics

Esta empresa, de origen sueco, se centra en las tecnologías de medición de precisión diferenciando tres áreas, medición geoespacial, metrología industrial y tecnologías. En este caso el área que nos ocupa es el de metrología industrial donde cuenta con un software específico para la aplicación de control estadístico de procesos (SPC), este es el llamado Q-DAS Statistics.

Este software ofrece además una serie completa de herramientas para la gestión de datos y metodologías de evaluación estadística, pudiendo adaptarse de esta manera a fabricantes muy diversos. Además, Q-DAS Statistics cuenta con 30 años de experiencia, por lo que existe un gran desarrollo a lo largo de esos años, añadiéndole calidad, confiabilidad y experiencia al propio software (26).

Hexagon, al igual que Mitutoyo, cuenta con hardware propio muy útil para generar un ecosistema con sus productos. Aunque en este caso utilizan una submarca específica para su hardware, Tesa. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado un calibre con conexión bluetooth del fabricante Tesa-

Hexagon que se ha conseguido sincronizar con el software desarrollado para mejorar la experiencia de toma de datos.

El software Q-DAS Statistics, cuenta con diferentes módulos, siendo uno de ellos el más interesante desde el punto de vista del control estadístico de procesos, Q-DAS O-QIS.

El módulo O-QIS proporciona las herramientas necesarias para la evaluación de la calidad en un proceso industrial. Además de las técnicas SPC, es capaz de realizar monitoreo de alarmas mediante internet, función de alertas y visualización online.

Permite diferentes métodos para la inserción de los datos, es posible hacerlo de forma manual, o directamente mediante equipos de medición portables, instrumentos de medida con comunicación inalámbrica, multiplexores a través de RS232 o incluso USB. Los gráficos mostrados una vez realizados los análisis son de gran ayuda para la comprensión del mismo, siendo estos plenamente configurables para los diferentes usuarios del software.

Mediante el monitoreo del proceso online, es sencillo identificar problemas que puedan acarrear defectos en la producción, pudiendo intervenir a tiempo, por ello además añade la visualización en tiempo real, y las alarmas, capaces de alertar cuando el proceso se desvía de las especificaciones que se le introducen como objetivo (27).



Figura 14. Diferentes interfaces del software Q-DAS de Hexagon. Fuente (27).



CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL SOFTWARE

3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

3.1.1 Instrumentos de medición

El software que se ha desarrollado es capaz de aplicar técnicas de control estadístico de procesos a procesos de fabricación, y esto comenzará por la toma de los datos necesarios para evaluar la calidad de los mismos. El planteamiento que se ha hecho es el de realizar mediciones de la cota que se va a cometer a estudio e introducir los datos dentro del programa. Para realizar estas mediciones se puede contar con múltiples dispositivos como pueden ser calibres y micrómetros, entre otros.

En este proyecto se han utilizado dos calibres digitales diferentes para la adquisición de los datos que se han sometido a estudio. Ambos calibres cuentan con conexión bluetooth, por lo que la conectividad ha sido inalámbrica. En concreto los calibres han sido:

- TESA TWIN-CAL IP67 junto con el emisor TLC-BLE que le permite establecer la conexión bluetooth. El error máximo admisible es de 0,03 mm (28).
- Mahr MARCAL 16 EWRI el cual incluye la conexión bluetooth integrada. El error máximo admisible es de 0,04 mm (29).

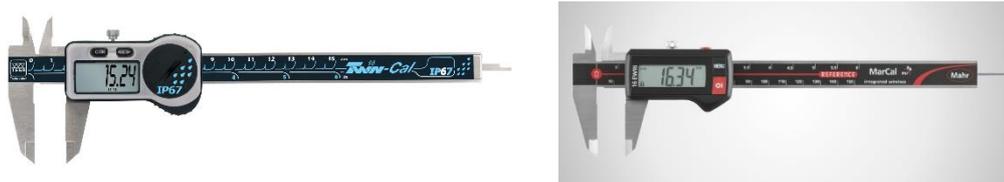


Figura 15. A la izquierda, Calibre TESA TWIN-CAL IP67. Fuente (28) y a la derecha, Calibre Mahr MARCAL 16 EWRI. Fuente (29).

El objetivo era conseguir que cualquier dispositivo de medición digital con posibilidad de conexión con un ordenador, ya fuera inalámbrica o no, fuera compatible con el software desarrollado de una manera sencilla, sin necesidad de la instalación de ningún programa propio de cada instrumento, drivers o similares. Para conseguir esto, solo es necesario configurar los instrumentos de medida para que la señal que emitan con el valor a registrar, el ordenador la entienda como una entrada de teclado, de tal forma que indicando una sola



vez la casilla del software por la que se quiere comenzar a introducir datos, estos se vayan registrando de forma automática medición tras medición.

3.1.2 Comunicación inalámbrica

Como se ha indicado anteriormente, para la realización de este proyecto se ha optado por utilizar dos calibres digitales con conexión bluetooth.

La conexión bluetooth nos permite realizar las mediciones de la cota a estudio en las piezas producidas sin la necesidad de cables que puedan ocasionar molestias y con la comodidad de registrar la medición obtenida con tan solo apretar un botón en el propio calibre.

En el caso del calibre de la marca TESA es necesario contar con el accesorio emisor de señal bluetooth TLC-BLE, de la misma marca que el calibre; y en el caso del calibre Mahr, la conexión bluetooth se encuentra directamente integrada. En el capítulo anterior ya se trató la tecnología bluetooth desde un marco teórico y reflejando el interés de esta tecnología para el llamado Internet of Things, IoT, así como la Industria 4.0 en la que la industria actual se encuentra.

3.1.3 Muestreos

Durante la realización de este software, se ha pensado que sería de gran utilidad adaptar la interfaz del mismo al usuario que vaya a utilizarlo. Principalmente, este software será manipulado por dos tipos de usuarios, operarios de una cadena de producción, e ingenieros.

Los operarios serán los encargados de, calibre en mano, hacer las mediciones pertinentes de la característica a estudio en las diferentes piezas que se hayan seleccionado para ello. La interfaz del software propia para los operarios se ha planteado de una forma clara y sencilla. El operario solo deberá completar las casillas amarillas, lo cual se indica mediante las siguientes instrucciones:



Contamos con 10 series con 10 medidas cada una:	
Se deben rellenar las casillas amarillas	
Colocamos el cursor en la primera casilla a rellenar	

Añadimos fecha y hora al finalizar la serie (=AHORA())	
CAM indica valores de repetibilidad intrínseca (acotada a cada Serie)	

CAP indica valores de repetibilidad de producción (total de las muestras)	
CpK indica valores de centrado de la producción (total de las muestras)	

Serie 1	
1	60,000
2	60,000
3	60,005
4	59,995
5	60,000
6	60,000
7	59,995
8	60,000
9	60,005
10	60,005
Fecha y hora	15/06/2021 11:29
CAM	11,294
CAP	
CpK	

Figura 16. Instrucciones de la interfaz de operario. Fuente: Elaboración propia.

Las casillas amarillas se agrupan en tres bloques, las especificaciones, de las que se hablará más adelante, las muestras, y la fecha de cada serie de muestras.

Especificación	
Nominal	60
Tolerancia superior	0,15
Tolerancia inferior (poner signo menos)	-0,1
Límite de Tolerancia superior (LTS)	60,15
Límite de Tolerancia inferior (LTI)	59,9
CpK requerido	1,6
CAM requerido	5
CAP requerido	1,68
Incertidumbre dispositivo medida	0,05

Figura 17. Especificaciones para rellenar por el operario. Fuente: Elaboración propia.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	60,000	60,005	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,060	60,065
2	60,000	60,007	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,065	60,065
3	60,005	60,010	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,065	60,070
4	59,995	60,005	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,070	60,06	60,07
5	60,000	60,005	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,070	60,070
6	60,000	60,008	60,015	60,025	60,030	60,050	60,050	60,060	60,065	60,07
7	59,995	60,005	60,010	60,020	60,040	60,045	60,055	60,060	60,070	60,065
8	60,000	60,010	60,010	60,030	60,040	60,045	60,060	60,065	60,07	60,07
9	60,005	60,010	60,020	60,025	60,035	60,050	60,055	60,060	60,07	60,07
10	60,005	60,008	60,015	60,030	60,040	60,050	60,060	60,060	60,065	60,070
Fecha y hora	15/06/2021 17:55	29/03/2021 10:10	30/03/2021 10:10	31/03/2021 10:10	01/04/2021 10:10	02/04/2021 10:10	03/04/2021 10:10	04/04/2021 10:10	05/04/2021 10:10	06/04/2021 10:10
CAM	11,294	18,823	9,882	9,068	8,380	8,839	9,068	12,347	10,564	17,252
CAP	1,71									
CpK	1,54									

Figura 18. Tabla de muestreo de la interfaz de operario. Fuente: Elaboración propia.



9	60,005
10	60,005
Fecha y hora	15/06/2021 17:55
CAM	11,294

CAP	
CpK	

Figura 19. Inserción fecha y hora en interfaz de operario. Fuente: Elaboración propia.

La metodología que el operario llevará a cabo para realizar la toma de datos, tras establecer unas especificaciones que serán referidas a las piezas a estudio, será la siguiente:

Como se puede ver en la tabla de muestreo existen diez columnas nombradas como series desde el número 1 hasta el número 10. A su vez, estas columnas cuentan con 10 casillas cada una, obteniendo un total de 100 muestras, suficientes para poder aplicar las técnicas de control estadístico de procesos.

Por esto, el operario comenzará colocando el cursor con el ratón del ordenador en la primera casilla de la “Serie 1”. A continuación, ayudado del calibre, (o instrumento de medida con conexión bluetooth deseado) que previamente habrá sido conectado con el ordenador, comenzará a tomar datos. Cada vez que tenga el calibre en la posición que se ajusta a la cota que se desea registrar, apretará el botón del calibre para registrar el dato. Repetirá esto hasta con 10 piezas diferentes completando así una serie.

Para registrar cuando se han tomado esa serie de datos, tan solo tendrá que introducir la función “=AHORA()” en la casilla inmediatamente inferior al último dato de la serie. Esto viene definido en las instrucciones junto a la tabla. Con ello, se introducirá automáticamente la fecha y hora a la que se finalizó esa primera toma de datos.

Dependiendo del tipo de estudio que se quiera realizar, el operario seguirá introduciendo datos en las demás series en un corto espacio de tiempo, diariamente, semanalmente, mensualmente, etc.

Como se puede ver en las imágenes, la interfaz de operario también incluye datos de los índices de capacidad, CAM, CAP y CpK. Esto será una guía para que el operario tenga una primera impresión de si el proceso se está desarrollando correctamente o no. Para ello se cuenta con una guía de colores que se basará en los datos introducidos en las especificaciones como CAM

requerido, CAP requerido y CpK requerido para, a modo de semáforo, indicando verde si está en un valor óptimo, y rojo si no es así, de una manera visual dar unos primeros datos. El CAM como ya se comentó anteriormente, se calcula a partir de la desviación estándar intrínseca, por lo que se calculará solamente con los datos de la serie que se encuentra en las casillas superiores. En cambio, tanto el CAP como el CpK se calcula utilizando la totalidad de las muestras independientemente de las series que estén completadas hasta el momento.

En la siguiente figura se puede ver la totalidad de la interfaz diseñada para el operario:

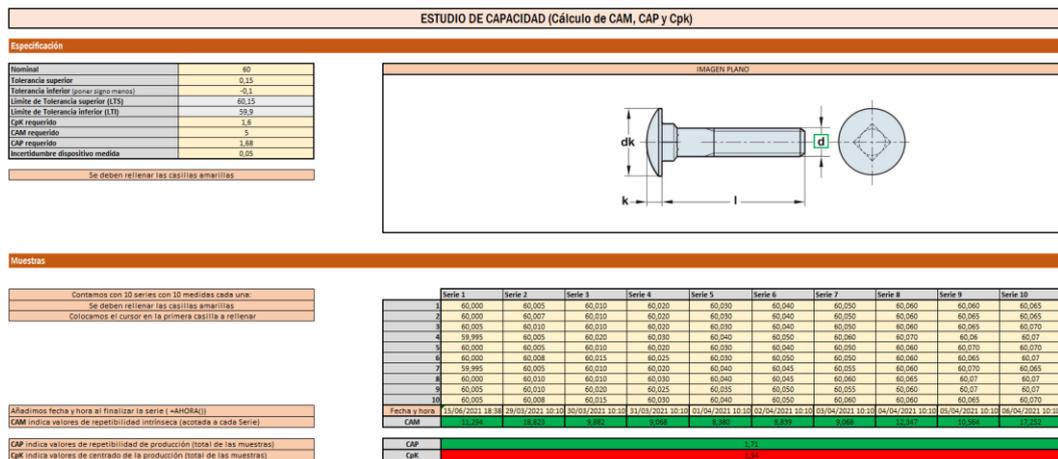


Figura 20. Interfaz para operario. Fuente: Elaboración propia.

El otro tipo de usuario que utilizará este software será el ingeniero. En este caso, en la interfaz desarrollada para ingenieros se volcarán automáticamente los datos introducidos en la interfaz de operario pudiendo el ingeniero adentrarse en el estudio de estos a posteriori.

Sin embargo, por si existiera la posibilidad de que el propio ingeniero quisiera realizar la toma de datos, también se ha introducido una tabla para que se puedan tomar de la misma forma a la detallada anteriormente para el caso del operario. En este caso, la interfaz tiene el siguiente aspecto:

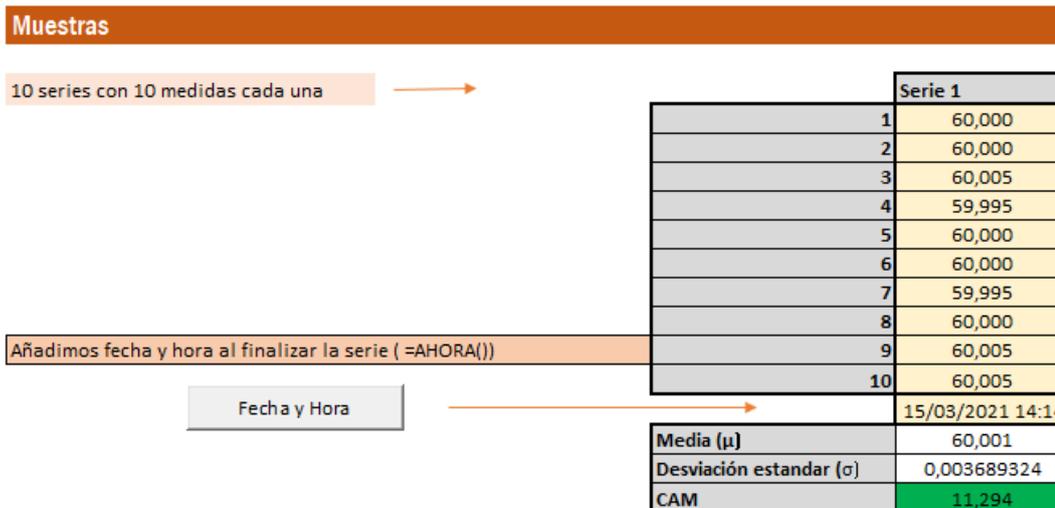


Figura 21. Tabla de muestreo de la interfaz de ingeniero. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso del operario, se cuentan con 10 series de 10 muestras cada una, completando una población total de 100 muestras.

En este caso, como se puede observar en la anterior figura, se muestran dos valores de los que antes se prescindían, como son la media y la desviación estándar. Posteriormente se detallarán todos los demás parámetros que se han integrado en la interfaz de ingeniero.

3.1.4 Seguridad

Con la idea de proteger el software de pequeñas alteraciones que pueda ir teniendo con el paso de tiempo, así como de intervenciones de personal no cualificado para ello, se ha protegido mediante el bloqueo de todas y cada una de las casillas que no son necesarias para cada tipo de usuario.

En el caso del operario, este no podrá modificar ninguna casilla excepto las de color amarillo, es decir, las dedicadas a la introducción de las especificaciones del estudio, las de entradas de datos en las diferentes series, y las de la fecha para cada serie. Todas las demás casillas, así como la programación que existe tras ellas se encontrará bloqueada para ellos.

Si el operario intentase modificar una celda para la que no tiene permiso obtendría el siguiente mensaje por pantalla:

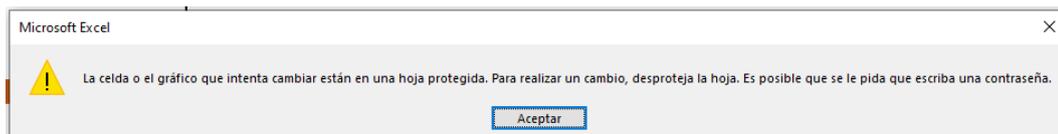


Figura 22. Mensaje de protección de las celdas. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de que realmente se requiera hacer una modificación, solo los usuarios autorizados para ellos podrán hacerlo, y para esto deberán de conocer la contraseña que protege esta interfaz.

3.2 ESPECIFICACIONES DEL ESTUDIO

Para comenzar el estudio se necesitan establecer una serie de parámetros. Comenzando por la pieza que vamos a someter a estudio, y siguiendo por la cota que se va a medir, los valores de los índices de capacidad que se requieren para que el resultado sea favorable, y las características el propio dispositivo de medida.

3.2.1 Plano de la pieza

En la interfaz del software desarrollado se ha incluido una zona en la sección de especificaciones en la que poder introducir un pequeño plano de la pieza que va a ser sometida a estudio. Además, para mejorar la facilidad de comprensión del estudio a posteriori, es recomendable señalar la cota que va a ser medida.

Esta zona para añadir el plano se encuentra tanto en la interfaz de operario, como en la interfaz de ingeniero, y es una zona libre de bloqueo en ambas interfaces por lo que cualquier usuario puede introducir el plano dentro del software.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de cómo se visualizaría un plano:

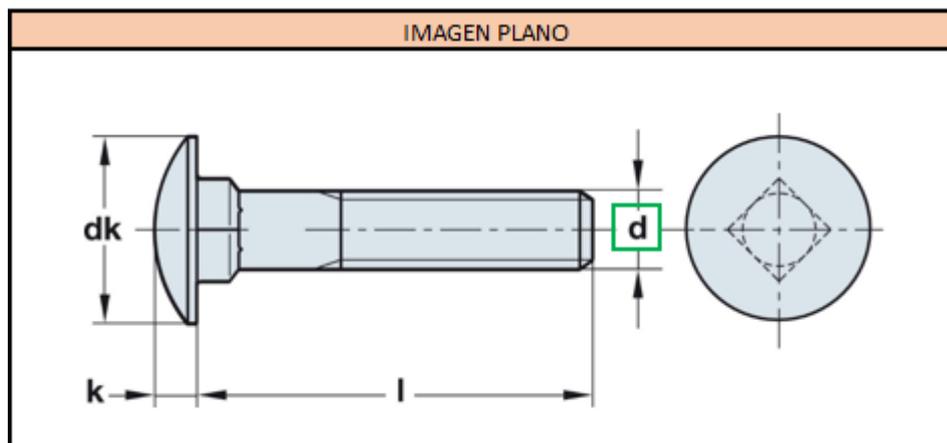


Figura 23. Ejemplo de plano introducido en la interfaz. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Nominal

Dentro de la tabla de especificaciones, se comienza con el valor nominal de la cota que se va a estudiar. El valor nominal es el valor con el que se ha diseñado,



es decir, el valor que se ha tomado como referencia para esa cota en la producción de la pieza.

3.2.3 Tolerancias

En referencia al valor que se ha tomado como nominal, existirán dos valores de tolerancias que servirán como márgenes, estableciendo un intervalo en el que se deberán encontrar las medidas que se tomen. Estos valores estarán preestablecidos y pertenecerán a las especificaciones de la pieza.

A partir de los valores introducidos como tolerancia superior, y tolerancia inferior, el software, automáticamente, calculará los valores de límite de tolerancia superior (LTS) y límite de tolerancia inferior (LTI) que serán útiles más adelante en el desarrollo de los gráficos.

3.2.4 Índices de capacidad requeridos

En la sección de especificaciones también se introducirán los valores del CpK requerido, CAM requerido y CAP requerido. Estos serán de gran importancia para las señales visuales, a modo semáforo, que se le aportan tanto a operarios como ingenieros tras introducir los datos.

Los valores tanto de CpK, CAM y CAP que se obtengan tras el análisis de los datos recopilados, se compararán con los valores requeridos de los mismos para así tomar la decisión de si existe o no existe un problema en el proceso.

3.2.5 Incertidumbre del dispositivo de medida (U)

Llamaremos incertidumbre al intervalo de valores que, debido al uso de un instrumento de medida para adquirir datos sobre una cota, podemos estimar como adecuado debido al margen de error que pueda cometer el propio instrumento.

En metrología, la incertidumbre también puede ser nombrada como “U”, y es un valor asociado a cada instrumento de medición. Estos valores se extraerán de las especificaciones técnicas de los instrumentos utilizados.



Por último, las tablas de especificaciones, tanto en el caso de la interfaz de operarios como en la interfaz de ingenieros tienen el siguiente aspecto:

Especificación

Nominal	60
Tolerancia superior	0,15
Tolerancia inferior (poner signo menos)	-0,1
Límite de Tolerancia superior (LTS)	60,15
Límite de Tolerancia inferior (LTI)	59,9
CpK requerido	1,6
CAM requerido	5
CAP requerido	1,68
Incertidumbre dispositivo medida	0,05

Figura 24. Tabla de especificaciones de la interfaz. Fuente: Elaboración propia.



3.3 ÍNDICES DE CAPACIDAD: CAM Y CAP

Los índices de capacidad CAM y CAP con características del proceso de producción van a tener una dependencia de la desviación estándar de los datos obtenidos. Y va a ser la propia desviación estándar la que los diferencie. Para ello se han calculado dos tipos de desviaciones estándar dependiendo de los datos a los que hacen referencia.

3.3.1 CAM: Desviación estándar intrínseca

Como se ha comentado en el apartado de adquisición de datos, la tabla en la que estos se introducen está dividida en diferentes series. Esto se ha hecho con el objetivo de poder rastrear un proceso de producción a lo largo de diferentes periodos de tiempo, que pueden ser horas, días, semanas, etc. Para esto se han dispuesto diferentes series en la toma de datos. Se ha establecido que cada serie estará formada por hasta 10 datos. Estos datos van a tener sus estadísticos propios, y los que nos resultan interesantes serán, la media (μ) y la desviación estándar (σ).

Cuando la desviación estándar se toma de una las series de valores establecidas, se llamará desviación estándar intrínseca (σ_i).

Para el caso del CAM se aplicará lo siguiente:

$$CAM = \frac{LTS - LTI}{6\sigma_i}$$

Siendo σ_i la desviación estándar de cada serie concreta.

La siguiente figura muestra dos series dentro de la interfaz de ingeniero en la que se muestran los datos adquiridos mediante las mediciones de la misma cota en semanas diferentes. Se puede ver cómo tanto el valor de la media como el de la desviación estándar en cada uno de ellos es distinto, y es por este último que el valor del CAM es diferente, aunque en ambos válido, por ello el color verde.



	Serie 1	Serie 2
1	60,000	60,005
2	60,000	60,007
3	60,005	60,010
4	59,995	60,005
5	60,000	60,005
6	60,000	60,008
7	59,995	60,005
8	60,000	60,010
9	60,005	60,010
10	60,005	60,008
→	15/03/2021 14:14	21/03/2021 14:15
Media (μ)	60,001	60,007
Desviación estándar (σ)	0,003689324	0,002213594
CAP	11,294	18,823

Figura 25. Obtención del CAP en diferentes series de datos. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 CAP: Desviación estándar de producción

Para el cálculo de este índice se utiliza a totalidad de los datos registrados a lo largo de todo el estudio. Con ellos se obtienen los estadísticos de media y desviación estándar, que para este caso es llamada desviación estándar de producción (σ_p).

De nuevo, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$CAP = \frac{LTS - LTI}{6\sigma_p}$$

En este caso, con la desviación estándar de producción, es decir la obtenida con la totalidad de los datos adquiridos para el estudio.

La siguiente figura ejemplifica, mediante la interfaz de operario la obtención del índice de capacidad CAP referido a la totalidad de los valores, y el CAP referido a cada serie.

De nuevo, el valor del CAP se mantiene en verde por lo que se mantendría dentro de lo requerido.



	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	60,000	60,005	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,060	60,065
2	60,000	60,007	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,065	60,065
3	60,005	60,010	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,065	60,070
4	59,995	60,005	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,070	60,06	60,07
5	60,000	60,005	60,010	60,020	60,030	60,040	60,050	60,060	60,070	60,070
6	60,000	60,008	60,015	60,025	60,030	60,050	60,050	60,060	60,065	60,07
7	59,995	60,005	60,010	60,020	60,040	60,045	60,055	60,060	60,070	60,065
8	60,000	60,010	60,010	60,030	60,040	60,045	60,060	60,065	60,07	60,07
9	60,005	60,010	60,020	60,025	60,035	60,050	60,055	60,060	60,07	60,07
10	60,005	60,008	60,015	60,030	60,040	60,050	60,060	60,060	60,065	60,070
Fecha y hora	18/06/2021 21:22	29/03/2021 10:10	30/03/2021 10:10	31/03/2021 10:10	01/04/2021 10:10	02/04/2021 10:10	03/04/2021 10:10	04/04/2021 10:10	05/04/2021 10:10	06/04/2021 10:10
CAM	11,294	18,823	9,882	9,068	8,980	8,839	9,068	12,347	10,564	17,252
CAP	1,71									
CpK	1,54									

Figura 26. Obtención del CAP en la interfaz de operario. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha podido ver mediante las figuras anteriores, las dos interfaces mencionadas, la dirigida a los operarios y la dirigida a los ingenieros, es capaz de mostrar los valores de los índices de capacidad como el CAM y el CAP. Como diferencia destacable entre ellas es la visualización directa de los estadísticos (media y desviación estándar), tanto de cada serie, como totales, que se muestran solamente en la interfaz para ingenieros.

Por otro lado, hay que destacar de nuevo la integración de las señales visuales de la capacidad del proceso mediante los colores, a modo semáforo, que se puede observar tanto en la interfaz de operarios como en la de ingenieros y que resulta de gran utilidad para poder sacar una primera conclusión sin la necesidad de analizar todos los datos que se verán más adelante y que solo se muestran en la interfaz de ingenieros.



3.4 ÍNDICE DE CAPACIDAD: CpK

En la búsqueda del posible descentramiento del proceso con respecto a su valor nominal, se ha integrado el índice de capacidad CpK en el software.

Como ya se explicó en capítulos anteriores, para obtener el valor del CpK, hay que calcular tanto el CpK_i, como el CpK_s. Siendo el valor del CpK el mínimo de estos dos últimos.

$$CpK_i = \frac{\mu - LTI}{3\sigma} \quad CpK_s = \frac{LTS - \mu}{3\sigma}$$

$$CpK = \min(CpK_i, CpK_s)$$

El valor de la desviación estándar para estos índices es el referido a la totalidad de las muestras registradas, es decir, la desviación estándar del proceso.

Al igual que en los índices de capacidad CAM y CAP, el CpK ha sido integrado en la interfaz para operarios y en la interfaz para ingenieros, aportando además el sistema de semáforo como señal visual que aporte una primera idea de si el proceso está descentrado o no.

Tamaño muestra	100
CpK i	1,88
CpK s	1,54
CpK	1,54
CAP	1,71
k (Coeficiente de descentrado)	0,099

Figura 27. Índice CpK en la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se puede observar como el valor del índice de capacidad CpK se muestra en color rojo, por lo que se ha obtenido un valor inferior al que se ha requerido para este proceso, es decir, está más descentrado de lo que se ha requerido.



3.5 TASA DE NO CONFORMIDAD

La tasa de no conformidad se ha añadido al software con el objetivo de tener un análisis de las piezas que se han quedado fuera de las tolerancias permitidas siendo no conformes dentro del proceso y que por lo tanto no son de utilidad para la producción.

Para la obtención de esta herramienta de análisis se ha recurrido a la norma AFNOR HF E60-181. Para esta norma se calcula el coeficiente de descentrado, llamado “k”. En la figura 26, en el apartado anterior, se puede ver como en la interfaz de ingenieros se muestra el valor de este coeficiente de descentrado.

Gracias a este coeficiente y a la siguiente tabla, es posible obtener un valor de la tasa de no conformidad en tantos por mil.

Tabla 2. Norma AFNOR HF E60-181 (TNC). Fuente: Elaboración propia.

CpK												
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
k	0	134	72	36	16,4	7	2,7	0,32	0,027	0,0016	0,00007	0,000002
	0,05	115	59	28	12,2	4,9	1,83	0,19	0,015	0,0008	0,00003	0,000001
	0,1	100	50	23	9,9	4	1,47	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001
	0,15	88	43	20	8,8	3,6	1,37	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001
	0,2	79	39	19	8,4	3,5	1,35	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001
	0,3	70	36	18	9,1	3,5	1,35	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001
	0,4	67	36	18	8,2	3,5	1,35	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001
	0,5	67	36	18	8,2	3,5	1,35	0,16	0,013	0,0008	0,00003	0,000001

La otra variable necesaria para adentrarse en la tabla es el índice de capacidad CpK que anteriormente se ha calculado.

En el software desarrollado se ha establecido un algoritmo capaz de buscar dentro de la tabla a partir de unos valores de CpK y k obtenidos con anterioridad.

Hay que añadir que para obtener el valor del coeficiente de descentrado “k” se ha calculado mediante lo siguiente:

$$k = 1 - \frac{CpK}{CAP}$$



Por último, se ha procedido a convertir el resultado obtenido de buscar en la tabla, el cual está en tantos por mil, a un valor en unas unidades más apropiadas como son las partes por millón (ppm).

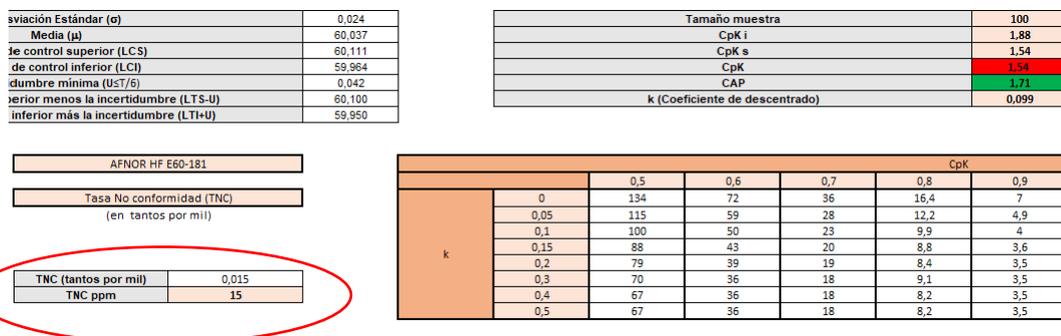


Figura 28. Tasa de no conformidad en la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

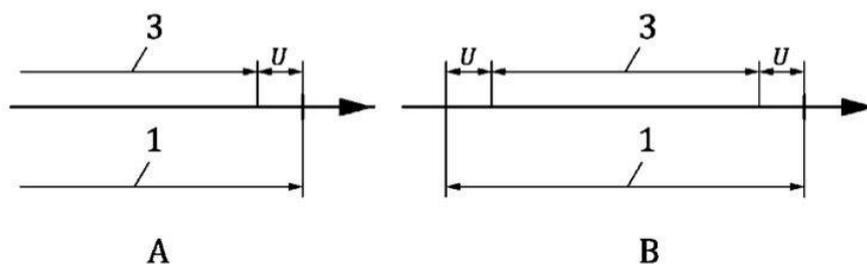
En la anterior figura se muestra el ejemplo de un análisis de la tasa de no conformidad.

Este análisis solo se puede obtener desde la interfaz de ingenieros ya que se ha tratado de simplificar al máximo la interfaz de operarios para que estos se limiten a realizar las funciones de tomas de datos y tengan una primera impresión del desarrollo del proceso mediante los índices de capacidad.

3.6 NORMA UNE-EN ISO 14253

Esta norma tiene el objetivo de establecer unas reglas que ayuden a la toma de decisiones de aceptación o rechazo de una pieza cometida a estudio teniendo en cuenta el uso de la incertidumbre de medición propia de los instrumentos utilizados para ello (30).

Para el desarrollo del software ha sido de utilidad esta norma debido a límites visuales que se han establecido dentro de los gráficos. Se han establecido unos límites de tolerancia añadiendo la incertidumbre de medida con la que se pueda contar, la cual es añadida en las especificaciones al inicio del proceso de toma de datos. Existen dos límites, uno superior que será obtenido restando el valor de la incertidumbre de medida al límite de tolerancia superior ($LTS - U$), y uno inferior que será obtenido sumándole al límite de tolerancia inferior el valor de la incertidumbre de medida ($LTI + U$).



Leyenda

- A Especificación con un solo límite
- B Especificación con dos límites
- 1 Zona de especificación
- 3 Zona de conformidad

Figura 29. Conformidad de los límites de tolerancia añadiendo la incertidumbre. Fuente (30).

Los límites de tolerancia superior e inferior ya se vio anteriormente que se calculaban sumándole, o restandole, al valor de la media los valores de tolerancia superior e inferior, respectivamente.

También se ha hecho un control de la incertidumbre mínima del proceso, que tendrá dependencia de los límites de tolerancia.

$$U \leq T/6$$



Desviación Estándar (σ)	0,024
Media (μ)	60,037
Límite de control superior (LCS)	60,111
Límite de control inferior (LCI)	59,964
Incertidumbre mínima ($U_{\leq T/6}$)	0,042
Límite tolerancia superior menos la incertidumbre (LTS-U)	60,100
Límite de tolerancia inferior más la incertidumbre (LTI+U)	59,950

Figura 30. Cálculo de la incertidumbre mínima, así como de los límites de tolerancias añadiendo las incertidumbres. Fuente: Elaboración propia.

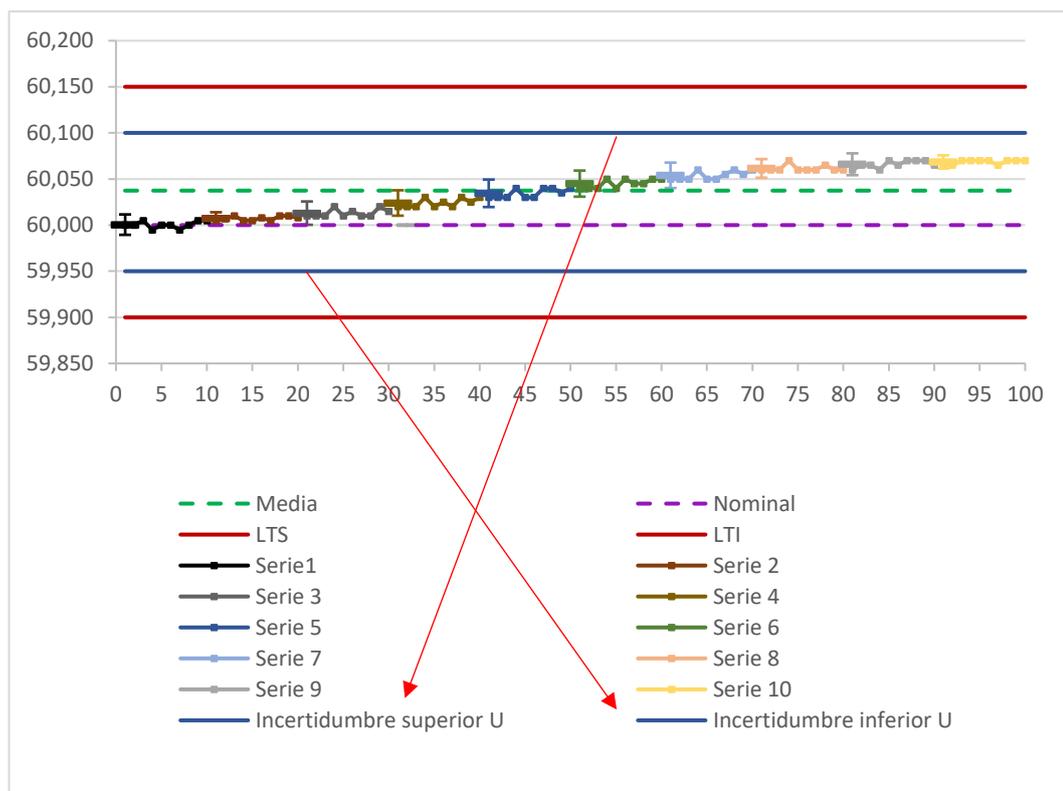


Figura 31. Gráfico del estudio intrínseco donde se puede apreciar los límites de tolerancias con la incertidumbre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo se ha añadido la aplicación de la norma UNE-EN ISO 14253 dentro del desarrollo del software y como se muestra en la interfaz de ingenieros.

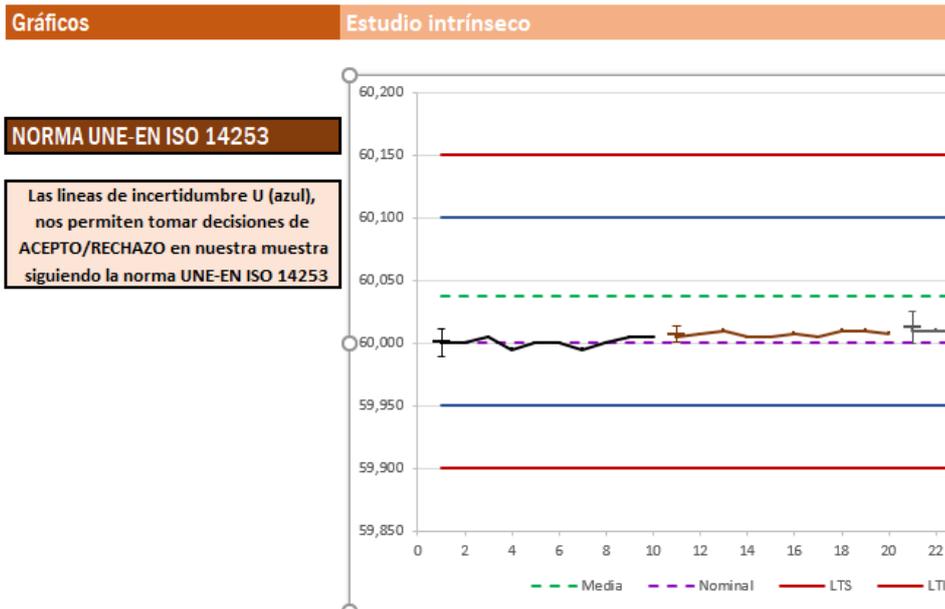


Figura 32. Gráfico de estudio intrínseco con la norma UNE-EN ISO 14253. Fuente: Elaboración propia.



3.7 GRÁFICOS

En los estudios de capacidad, el uso de los gráficos es de gran utilidad para poder analizar los datos obtenidos de una forma correcta, así como para darle validez al estudio comprobando hipótesis que se han ido suponiendo para la definición de los demás coeficientes.

Ser capaz de extraer toda esa información de los gráficos no es tarea fácil, y es por esto que dentro del software tan solo se van a mostrar estos gráficos dentro de la interfaz para ingenieros ya que estos son los realmente cualificados para dar validez al estudio e interpretar ciertas tendencias, o rachas que se pueden ir dando a lo largo de la producción y es importante detectar.

3.7.1 Gráfico del estudio intrínseco

La principal característica de este gráfico es que los datos se van a introducir serie por serie, es decir, va a existir una distinción entre los datos adquiridos en una primera toma con respecto a los datos adquiridos en una segunda toma realizada un tiempo después, ya sean horas, días, meses, etc.

Para cada una de las series de datos se le ha integrado visualmente una barra de error centrada en la media de los datos correspondientes a esa serie y con una amplitud igual a 3σ hacia cada lado de la media, es decir, un total de seis veces la desviación estándar intrínseca. Esto nos ayudará a, de una forma visual, ver la dispersión que tiene cada una de estas series de datos, así como a que distancia de la media de todo el proceso está la media de cada serie.

En la figura 33, a continuación, se puede observar un recorte de este gráfico del estudio intrínseco. Es fácilmente reconocible la diferenciación de las diferentes series, (se puede observar la serie 1 de la 2 y la 3), así como las barras de error correspondientes a cada una de estas.

Además, el gráfico se completa con el añadido de la media de toda la producción (línea discontinua de color verde), el valor nominal establecido dentro de las especificaciones y al que tratan de ceñirse las piezas (línea discontinua de color morado), los límites de tolerancia superior e inferior (líneas continuas en color rojo), y los límites de tolerancia superior e inferior con el añadido de la incertidumbre de medida en acuerdo con la norma UNE-EN ISO 14253 de la que anteriormente se ha hablado (líneas continuas en color azul).



Figura 33. Barras de error en el gráfico del estudio intrínseco. Fuente: Elaboración propia.

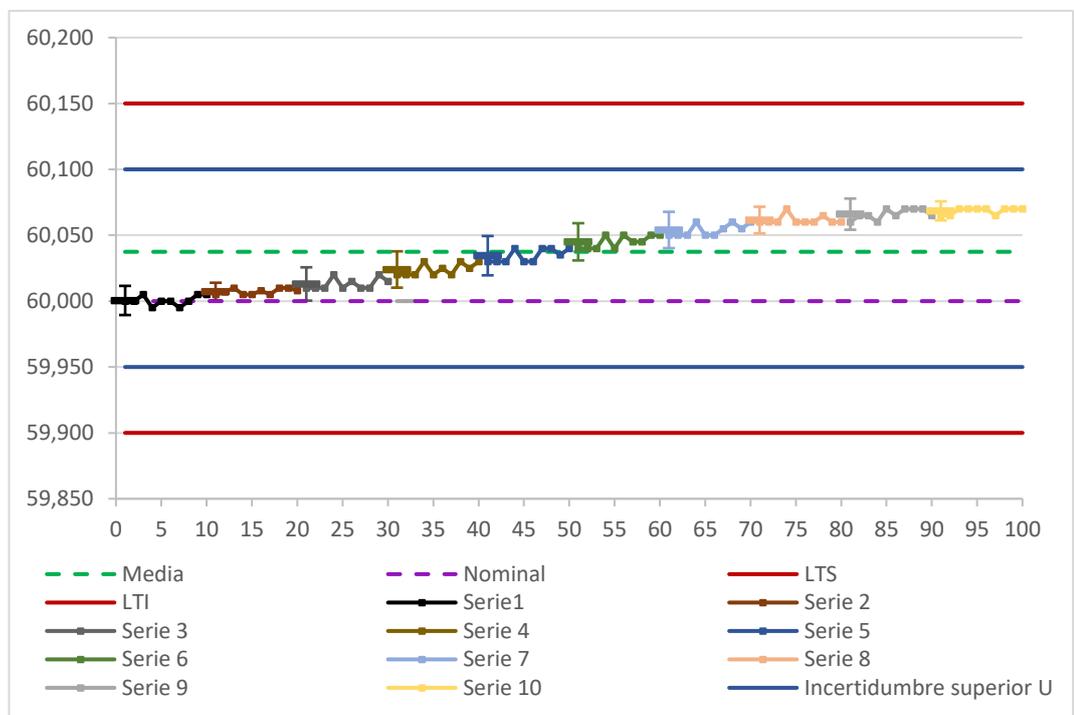


Figura 34. Gráfico completo del estudio intrínseco. Fuente: Elaboración propia.



En la figura 34 se ha introducido un gráfico al completo extraído directamente del software desarrollado. Para poder verlo correctamente en el formato en el que nos encontramos, ha sufrido diversas modificaciones con respecto a la versión visible dentro del software, la cual es más intuitiva y limpia.

Gracias a este gráfico podemos observar cómo, en este caso de ejemplo, existe una tendencia creciente de los valores acercándose cada vez más a los límites de tolerancias superiores, aunque en ningún momento se sobrepasan. Además, al ser un gráfico en el que se diferencian las series, es visible el buen escalonamiento que muestran las diferentes series siguiendo la tendencia creciente que sigue todo el proceso. Esto se analizará más profundamente en el siguiente capítulo.

3.7.2 Gráfico del estudio de producción

Este gráfico, en diferenciación con el anterior, muestra los datos de una forma general, es decir, como si la totalidad de ellos se hubieran tomado en la misma toma de datos.

El gráfico lo forman las muestras (puntos y líneas de color negro), la media de la totalidad de las muestra (línea discontinua de color verde), el valor nominal que se estableció en las especificaciones (línea discontinua de color morado), los límites de tolerancia superior e inferior (líneas continuas de color rojo), límites de tolerancias superior e inferior integrando la incertidumbre según la norma UNE-EN ISO 14253 (líneas continuas de color azul) y en incremento con respecto al anterior gráfico, los límites de control superior e inferior (líneas continuas de color naranja). Estos últimos límites se calculan añadiendo el valor de tres veces la desviación estándar de la producción (3σ) a cada lado de la media del total de las muestras, lo que de nuevo general los límites del famoso Six Sigma.

En la figura 35, mostrada a continuación, se ha introducido un gráfico al completo extraído directamente del software desarrollado. Para poder verlo correctamente en el formato en el que nos encontramos, ha sufrido diversas modificaciones con respecto a la versión visible dentro del software, la cual es más intuitiva y limpia.

Este gráfico será de gran relevancia en la búsqueda de tendencias de la producción, así como en la búsqueda de patrones no aleatorios debidos a inestabilidades en los ciclos de producción, periodicidades, etc. Además, su mayor característica será la de mostrar puntos que se encuentren fuera de los límites de control y situarlos con respecto a las demás muestras, así como situarlos con respecto al valor nominal y la media del mismo.

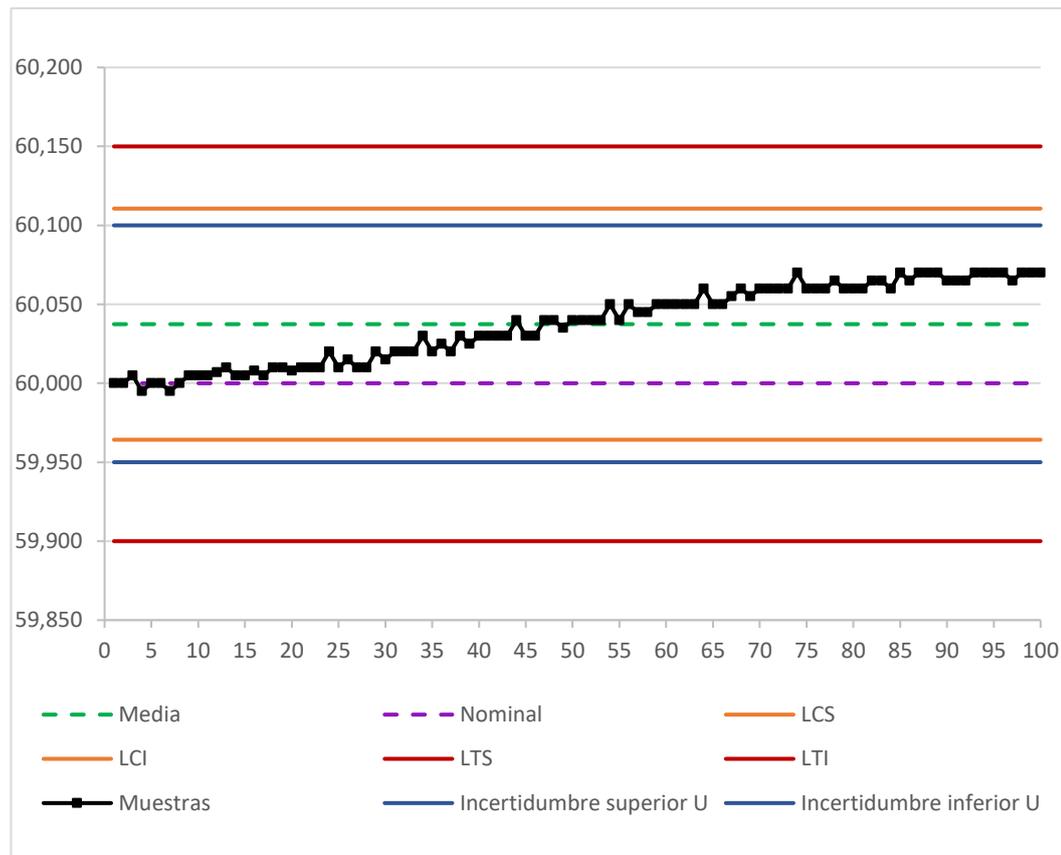


Figura 35. Gráfico del estudio de producción. Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Histograma

El otro gráfico que cobra gran importancia en la validez de un estudio de capacidad es el histograma. Un histograma representa gráficamente las muestras mediante barras, donde la superficie de cada barra hace referencia a la frecuencia de aparición de estos valores. Su principal característica es dar una visión general de cómo se reparten los valores alrededor de la media obteniendo así el tipo de distribución estadística que siguen estos.

En el control estadístico de procesos (SPC), se establece la hipótesis de que la muestra sigue una distribución estadística normal, siendo necesario esto para dar validez a los valores de los índices de capacidad que se calculan. Así mismo, es debido a la hipótesis de normalidad que asumimos que en un intervalo $\mu \pm 3\sigma$ se recoge el 99,7% de la población total.

Es por ello, que en el software se ha desarrollado el histograma como gráfico de validación del estudio, y se ha añadido la curva de la distribución normal

sobre él para ayudar a tomar la decisión de si el proceso sigue esta distribución o no.

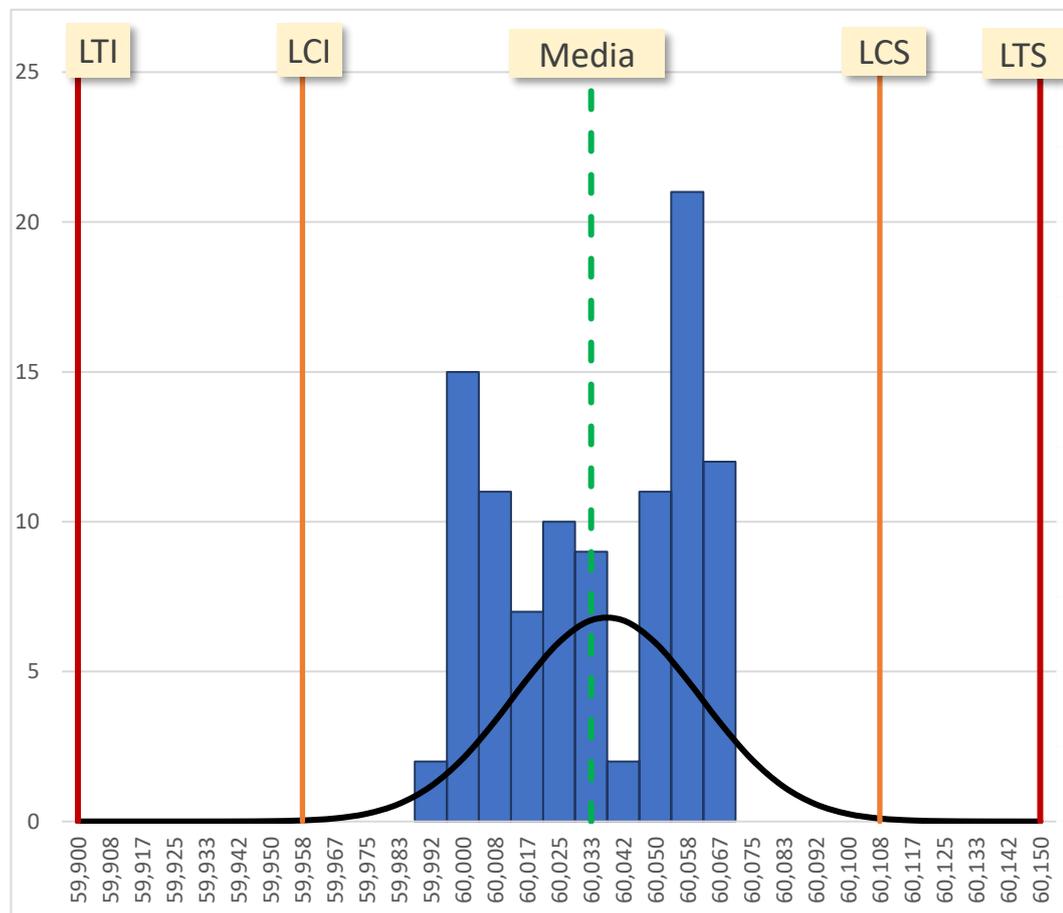


Figura 36. Histograma de la población total. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 36, mostrada anteriormente, se ha introducido un histograma extraído directamente del software desarrollado. Para poder verlo correctamente en el formato en el que nos encontramos ha sufrido diversas modificaciones con respecto a la versión visible dentro del software, la cual es más intuitiva y limpia.

Como se puede ver, el histograma desarrollado consta de las muestras que forman las barras de color azul, la curva correspondiente a la distribución normal (línea continua de color negro), la media de la totalidad de los datos (línea discontinua en color verde), los límites de tolerancia superior e inferior (líneas continuas de color rojo) y límites de control superior e inferior (líneas continuas de color naranja).



En cuanto a la interpretación de este ejemplo que se ha representado, se puede ver como la media coincide en gran medida con el centro de la campana de la distribución normal, y los valores más extremos de las muestras se quedan dentro de la campana, esto nos indica que contamos con una buena repetibilidad, o dispersión. En cambio, vemos como las barras centrales son de menos altura que las de los extremos, lo que significa que el centrado no es correcto. Esto se analizará más en profundidad en el próximo capítulo.



CAPÍTULO IV

CASOS PRÁCTICOS

4.1 DISPERSIÓN

En este capítulo se va a tratar de poner en práctica, mediante la introducción de diferentes casos dentro del software, el análisis que se realizará de un proceso buscando los problemas que se pueden llegar a encontrar y que opciones hay para solucionarlos.

Primeros comenzaremos tratando un caso de dispersión. Este consistirá en una pieza la cual se mecaniza y se le realiza un taladro que es importante someter a estudio ya que podría comprometer el montaje de esta pieza dentro de un conjunto. Las especificaciones del taladro que se va a someter a estudio, así como del dispositivo de medida que se ha utilizado para la toma de datos son las siguientes:

Especificación	
Nominal	50
Tolerancia superior	0,1
Tolerancia inferior (poner signo menos)	-0,1
Límite de Tolerancia superior (LTS)	50,1
Límite de Tolerancia inferior (LTI)	49,9
CpK requerido	1,33
CAM requerido	2
CAP requerido	2,5
Incertidumbre dispositivo medida	0,03

Figura 37. Especificaciones del estudio de dispersión extraídas del software. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 37, el taladro tiene un valor nominal de 50 mm, una tolerancia superior de 0,1 mm y una tolerancia inferior de 0,1 mm.

Además, para asegurar la calidad del proceso se ha establecido que los índices de capacidad requeridos sean, 1,33 para el CpK, 2 para el CAM, y 2,5 para el CAP. Por último, hay que añadir que el calibre con el que se ha realizado la toma de datos cuenta con una incertidumbre de 0,03 mm.

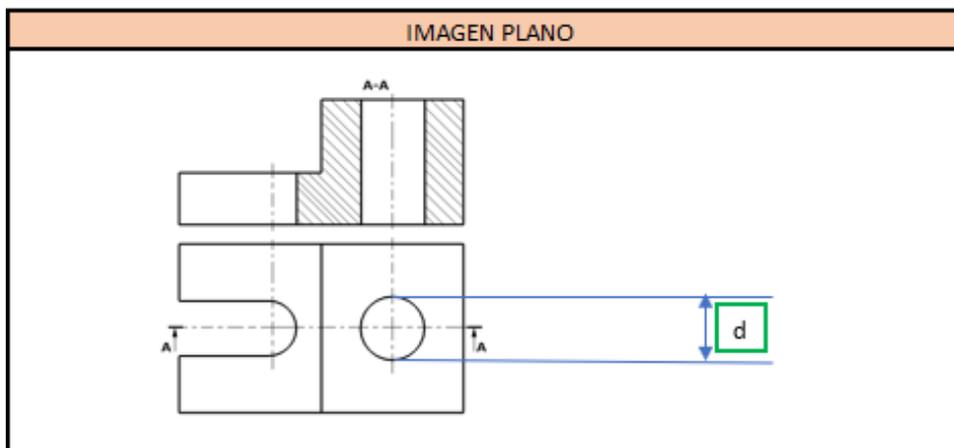


Figura 38. Plano de la pieza sobre la que se va a realizar el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas las especificaciones, se va a proceder estudiar la primera toma de datos.

4.1.1 Dispersión inválida

Vamos a considerar esta primera toma de datos como el “Caso 1”. Los valores que se han obtenido al adquirir las mediciones son:

Tabla 3. Tabla de datos del caso 1 extraída de la interfaz de operario del software. Fuente: Elaboración propia.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	50,030	49,980	50,010	49,980	49,975	49,970	49,980	50,015	49,950	49,985
2	50,000	49,980	50,015	49,980	49,975	49,970	50,020	50,020	49,960	49,985
3	49,970	50,020	50,010	50,015	49,980	50,025	50,015	50,010	49,965	49,940
4	50,020	50,010	50,025	50,030	50,000	50,020	49,960	49,950	49,995	50,020
5	49,980	50,025	50,030	50,035	50,010	49,985	50,020	49,990	49,990	50,030
6	49,980	50,025	50,000	49,970	50,020	49,990	50,025	49,975	49,980	49,990
7	49,970	50,035	50,010	49,975	50,035	50,020	50,020	49,995	49,995	49,995
8	50,000	49,975	50,035	49,990	50,030	50,010	49,950	50,015	49,990	50,000
9	50,010	50,000	50,035	50,030	49,980	49,990	49,995	50,015	49,995	50,000
10	50,000	50,025	50,010	50,025	50,000	49,970	50,000	50,030	49,985	49,995
Fecha y hora	08/02/21 10:12	15/02/21 10:10	22/02/21 10:08	01/03/21 10:16	08/03/21 10:05	15/04/21 10:19	22/03/21 10:15	29/03/21 10:02	05/04/21 10:10	12/04/21 10:02
CAM	1,614	1,497	2,712	1,269	1,463	1,508	1,235	1,373	2,032	1,395
CAP	1,44									
CpK	1,43									



Se puede ver que los datos han sido adquiridos mediante 10 series, siendo tomados con una semana de diferencia entre cada una de estas series, y respetando una hora similar en todos los casos. El estudio comenzó el 08/02/2021 a las 10:12 h, y finalizó el 12/04/2021 a las 10:02 h.

En la siguiente figura se va a mostrar de nuevo los datos adquiridos para el caso 1 pero directamente capturados del software mediante una imagen.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	50,030	49,980	50,010	49,980	49,975	49,970	49,980	50,015	49,950	49,985
2	50,000	49,980	50,015	49,980	49,975	49,970	50,020	50,020	49,960	49,985
3	49,970	50,020	50,010	50,015	49,980	50,025	50,015	50,010	49,965	49,940
4	50,020	50,010	50,025	50,030	50,000	50,020	49,960	49,950	50,000	50,020
5	49,980	50,025	50,030	50,035	50,010	49,985	50,020	49,990	49,990	50,030
6	49,980	50,025	50,000	49,970	50,020	49,990	50,025	49,975	49,980	49,990
7	49,970	50,035	50,010	49,975	50,035	50,020	50,020	49,995	49,995	49,995
8	50,000	49,975	50,035	49,990	50,030	50,010	49,950	50,015	49,990	50,000
9	50,010	50,000	50,035	50,030	49,980	49,990	49,995	50,015	50,000	50,000
10	50,000	50,025	50,010	50,025	50,000	49,970	50,000	50,030	49,985	49,995
	08/02/2021 10:12	15/02/2021 10:10	22/02/2021 10:08	01/03/2021 10:16	08/03/2021 10:05	15/04/2021 10:19	22/03/2021 10:15	29/03/2021 10:02	05/04/2021 10:10	12/04/2021 10:02
Media (μ)	49,996	50,008	50,018	50,003	50,001	49,995	49,999	50,002	49,981	49,994
Desviación estándar (σ)	0,020655911	0,022267315	0,012292726	0,026267851	0,022785229	0,022110832	0,026982505	0,024272756	0,0164063	0,023897931
CAM	1,014	1,097	2,712	1,269	1,463	1,508	1,235	1,373	2,002	1,365

Figura 39. Datos para el caso 1 extraídos de la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

En esta segunda figura podemos observar los valores de la media y de la desviación estándar propia de cada una de las series de datos.

A simple vista, la gran cantidad de casillas rojas que se muestran nos indican que el proceso no está funcionando como los requerimientos exigen.

Desviación Estándar (σ)	0,023
Media (μ)	49,999
Límite de control superior (LCS)	50,069
Límite de control inferior (LCI)	49,930
Incertidumbre mínima ($U_{\leq T/6}$)	0,033
Límite tolerancia superior menos la incertidumbre (LTS-U)	50,070
Límite de tolerancia inferior más la incertidumbre (LTI+U)	49,930

Figura 40. Tabla de datos de la producción de la interfaz de ingenieros para el caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Tamaño muestra	100
CpK i	1,43
CpK s	1,45
CpK	1,43
CAP	1,44
k (Coeficiente de descentrado)	0,006

Figura 41. Tabla de índices de capacidad en la interfaz de ingenieros para el caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, tanto el índice de capacidad CAP correspondiente a toda la población de datos, como 8 de los 10 índices de capacidad CAM correspondiente a las diferentes series de datos obtenidos, dan como resultado un valor inferior a lo que se requería para ellos.

En cambio, el valor obtenido en el índice de capacidad CpK es superior al que se requería, y es por ello que se muestra en color verde.

Pasando al análisis de los gráficos se observa lo siguiente:

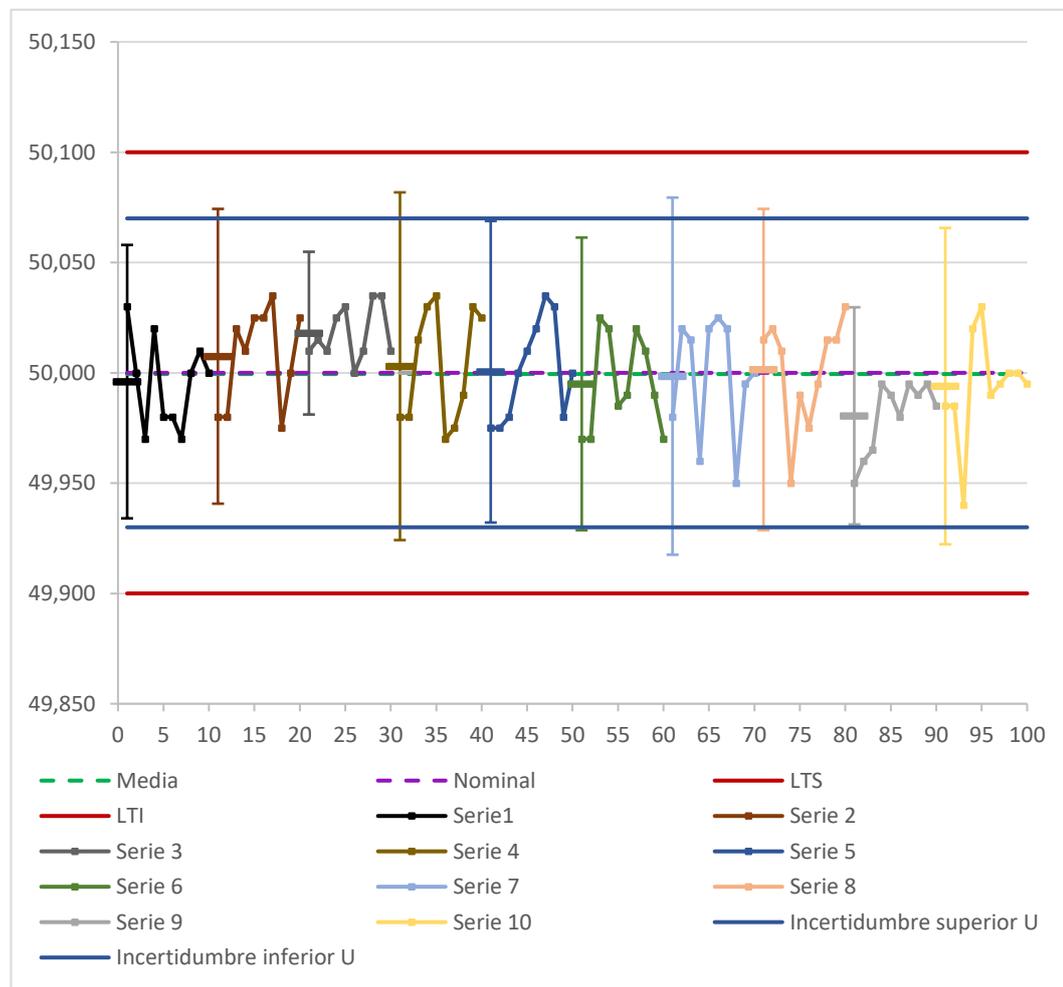


Figura 42. Gráfico del estudio intrínseco del caso 1. Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico podemos ver, serie por serie, la dispersión que ha sufrido cada una de ellas, lo que ha llevado a unos resultados insuficientes en cuando al valor del índice de capacidad CAM, en la mayoría. Solamente la serie 3 y la serie 9 muestran una dispersión asumible, y es por ello que cuentan con un CAM superior a 2. En cambio, las demás series muestran una enorme dispersión, llegando incluso sus barras de error, que muestran $\mu \pm 3\sigma$ en cada una de las series, a sobrepasar los límites de tolerancias con la incertidumbre añadida (líneas continuas de color azul). Aunque en ningún momento se traspasan los límites de tolerancias, este proceso se categoriza como inválido debido a la excesiva dispersión que muestra.

Curiosamente, la dispersión se ha producido tanto hacia la zona superior al valor nominal como hacia la zona inferior, y es por ello que los valores se han compensado obteniendo una media del proceso muy cercana al valor nominal, lo que se convierte en un índice de capacidad CpK superior al requerido. Es decir, el proceso se muestra centrado.

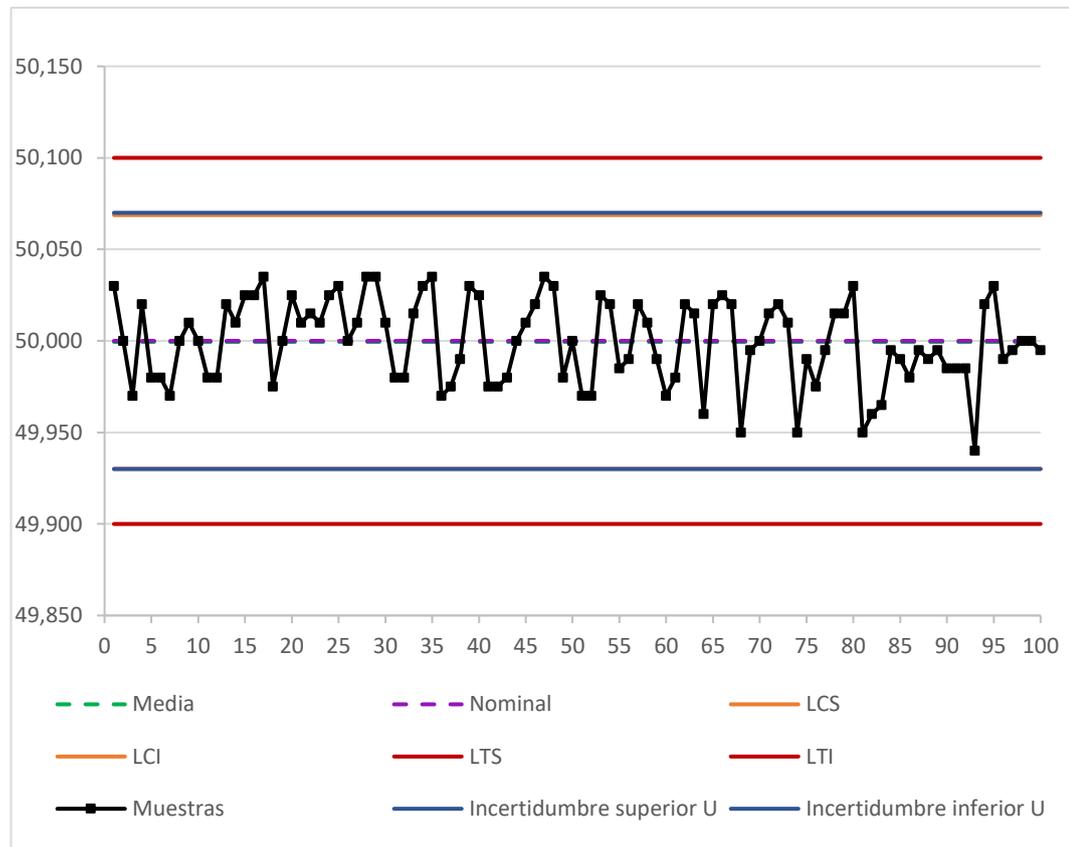


Figura 43. Gráfico del estudio de producción para el caso 1. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico de estudio de producción los datos se muestran como una serie única, y al igual que en el anterior se puede ver como existe una gran dispersión, lo que en este caso se traduce en un índice de capacidad CAP menor que el requerido, como ya habíamos visto en las tablas.

De nuevo, se muestra cómo se solapan las líneas del valor nominal y de la media del proceso, por lo que el centrado es bueno, y es por ello que el valor del CpK es mayor que el requerido.

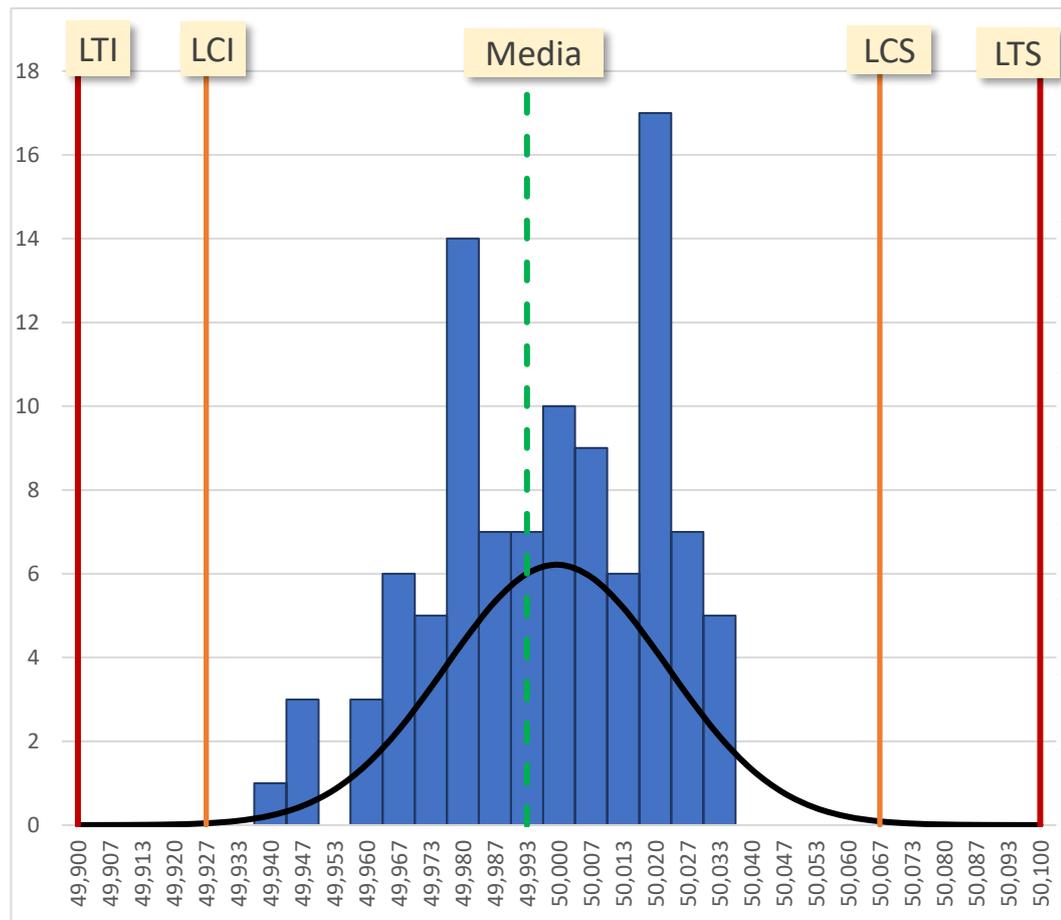


Figura 44. Histograma del caso 1. Fuente: Elaboración propia.

El histograma es de gran importancia dentro del estudio. Se necesita comprobar que la muestra sigue una distribución normal para poder dar como correcto el estudio realizado. En este caso se observa como la silueta del conjunto de las barras se ajusta lo suficiente a la línea negra que muestra la distribución normal, por lo que, en ese sentido, se puede dar validez al estudio. Sin embargo, se muestran barras alejadas de la línea central que muestra la media, con mucha superficie, es decir, que su frecuencia es alta. Esto lo que indica, de nuevo, es la alta dispersión que muestra el estudio, corroborando lo visto hasta llegar a este gráfico.

De la misma manera, se observa como la media se encuentra en el valor 49,993 mm, muy próximo al valor nominal de 50 mm que se estableció en las especificaciones, lo que vuelve a cerciorarnos que el valor del CpK es superior al requerido.

También hay que añadir que mediante la norma AFNOR HF E60-181 se ha calculado la tasa de no conformidad de este caso.



AFNOR HF E60-181	
Tasa No conformidad (TNC) (en tantos por mil)	
TNC (tantos por mil)	0,027
TNC ppm	27

Figura 45. Tasa de no conformidad del caso 1. Fuente: Elaboración propia.

El resultado muestra una tasa de no conformidad de 27 ppm (partes por millón).

En conclusión, el caso 1 muestra una producción con una alta dispersión tanto serie a serie, como en el cómputo global de los datos, y a su vez da lugar a un buen centrado de la misma.

4.1.2 Dispersión válida

Este será llamado “caso 2”. Consta de la misma pieza y del mismo proceso a realizar, es decir, comparte especificaciones con el caso 1. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 4. Tabla de datos del caso 2 extraída de la interfaz de operario del software. Fuente: Elaboración propia.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	50,010	50,020	50,010	50,020	50,000	49,995	49,980	50,010	50,000	50,010
2	50,005	50,025	50,005	50,025	50,000	49,990	49,985	50,010	50,000	50,010
3	50,000	50,015	50,000	50,015	50,005	49,995	49,990	50,005	50,000	50,000
4	50,010	50,020	50,010	50,020	50,000	49,980	49,995	50,000	49,995	49,995
5	50,010	50,030	50,010	50,025	50,005	49,985	50,000	50,000	49,990	50,000
6	50,010	50,025	50,010	50,025	49,990	50,000	50,000	50,000	50,005	50,005
7	50,000	50,015	50,000	50,015	50,000	50,005	50,005	49,995	50,000	50,000
8	50,015	50,025	50,015	50,000	49,995	49,985	49,990	50,015	50,000	50,000
9	50,015	50,020	50,015	50,020	50,005	49,990	49,995	50,015	49,995	49,995
10	50,000	50,025	50,000	50,025	50,000	50,000	50,000	50,000	50,010	49,995
Fecha y hora	19/04/21 10:15	26/04/21 10:10	03/05/21 10:05	10/05/21 10:12	17/05/21 10:05	24/05/21 10:21	31/05/21 10:11	07/06/21 10:08	14/06/21 10:10	21/06/21 10:02
CAM	5,657	6,901	5,657	4,303	7,071	4,216	4,303	4,714	6,058	5,872
CAP	3,01									
CpK	2,86									

Tras el estudio anterior que invalidó el proceso de producción por no cumplir con la dispersión requerida, se ha simulado un proceso en el que se ha tratado de corregir la máquina encargada del mecanizado de la cota que se está sometiendo a estudio. Los resultados de esta corrección se han plasmado en el caso 2.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	50,010	50,020	50,010	50,020	50,000	49,995	49,980	50,010	50,000	50,010
2	50,005	50,025	50,005	50,025	50,000	49,990	49,985	50,010	50,000	50,010
3	50,000	50,015	50,000	50,015	50,005	49,995	49,990	50,005	50,000	50,000
4	50,010	50,020	50,010	50,020	50,000	49,980	49,995	50,000	50,000	50,000
5	50,010	50,030	50,010	50,025	50,005	49,985	50,000	50,000	49,990	50,000
6	50,010	50,025	50,010	50,015	49,990	50,000	50,000	50,000	50,005	50,010
7	50,000	50,015	50,000	50,015	50,000	50,005	50,005	49,995	50,000	50,000
8	50,015	50,025	50,015	50,000	49,995	49,985	49,990	50,015	50,000	50,000
9	50,015	50,020	50,015	50,020	50,005	49,990	49,995	50,015	50,000	50,000
10	50,000	50,025	50,000	50,025	50,000	50,000	50,000	50,000	50,010	49,995
	19/04/2021 10:15	26/04/2021 10:10	03/05/2021 10:05	10/05/2021 10:12	17/05/2021 10:05	24/05/2021 10:21	31/05/2021 10:11	07/06/2021 10:08	14/06/2021 10:10	21/06/2021 10:02
Media (μ)	50,008	50,022	50,008	50,019	50,000	49,993	49,994	50,005	50,000	50,001
Desviación estándar (σ)	0,005892557	0,004830459	0,005892557	0,007745967	0,004714045	0,007905694	0,007745967	0,007071068	0,005502525	0,005676462
CAM	5,657	6,301	5,657	4,303	7,071	4,218	4,303	4,714	6,058	5,872

Figura 46. Datos para el caso 2 extraídos de la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

De nuevo, la adquisición de datos se ha realizado mediante 10 series, cada una de ellas tomadas una semana después de la anterior, es por esto que el estudio comenzó el día 19/04/2021 a las 10:15 h, y finalizó el 21/06/2021 a las 10:02 h.

A primera vista, ya son visibles los valores de los índices de capacidad, y todos ellos se muestran en verde, lo que indica que todos se encuentran por encima de los valores requeridos para ellos en las especificaciones.

Desviación Estándar (σ)	0,011
Media (μ)	50,005
Límite de control superior (LCS)	50,038
Límite de control inferior (LCI)	49,972
Incertidumbre mínima ($U_{\leq T/6}$)	0,033
Límite tolerancia superior menos la incertidumbre (LTS-U)	50,070
Límite de tolerancia inferior más la incertidumbre (LTI+U)	49,930

Figura 47. Tabla de datos de la producción de la interfaz de ingenieros para el caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Tamaño muestra	100
CpK i	3,15
CpK s	2,86
CpK	2,86
CAP	3,01
k (Coeficiente de descentrado)	0,048

Figura 48. Tabla de índices de capacidad en la interfaz de ingenieros para el caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Los índices de capacidad muestran valores superiores a los requeridos en todos sus casos, lo que, a falta de ver los gráficos, ya nos da un primer indicio de que el proceso ha mejorado y se encuentra dentro de los requerimientos de

capacidad. Los diferentes índices de capacidad CAM indican en todas las series que su valor está por encima de lo requerido, por lo que la dispersión que existe dentro de cada serie es asumible. El valor del índice de capacidad CAP indica que la dispersión de toda la población entra dentro de los valores asumibles, y por último el índice de capacidad CpK indica que el centrado de las muestras es correcto y se encuentra dentro de los requerimientos.

Pasando al análisis de los gráficos se muestra lo siguiente:

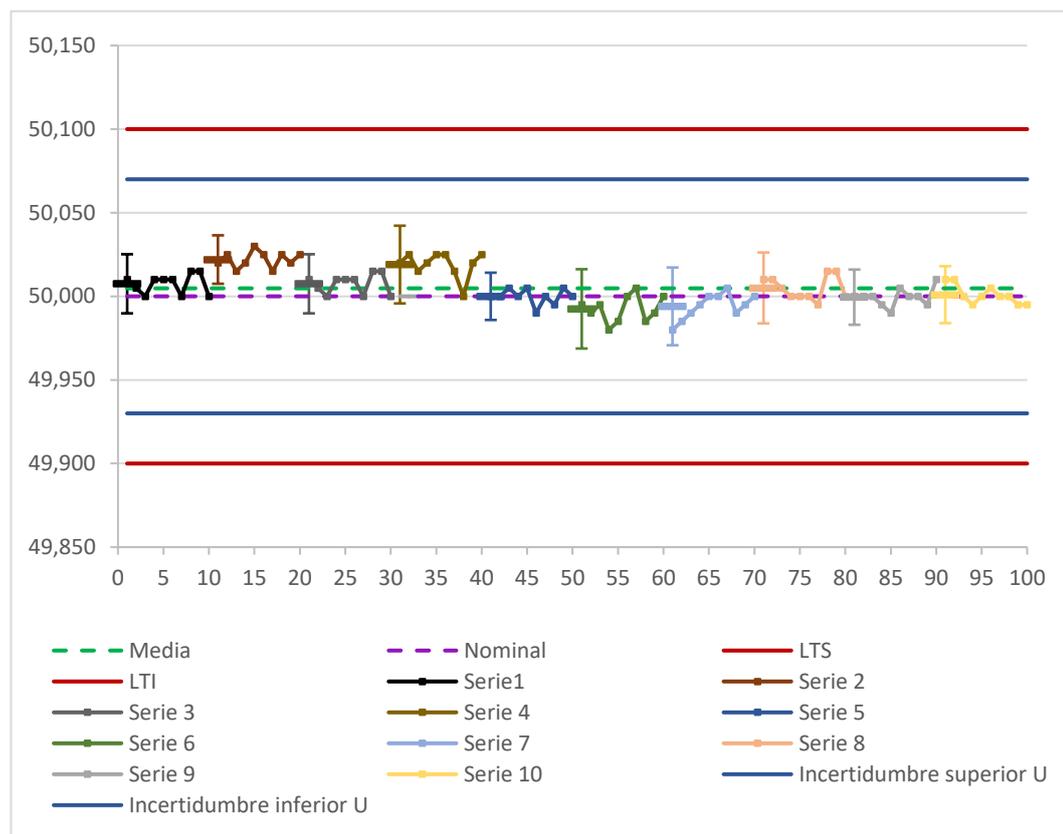


Figura 49. Gráfico del estudio intrínseco del caso 2. Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico se muestra, serie por serie, una dispersión muy contenida, por lo que se confirman los valores obtenidos en los índices de capacidad CAM. En contraposición con el caso 1, en este caso 2 ninguna de las barras de error llega a cruzar los límites de tolerancias con la incertidumbre añadida (que siguen la norma UNE-EN ISO 14253), y aún menos, los límites de tolerancias.

Además, al igual que en el caso 1, el valor nominal y el valor de la media de las muestras se encuentra lo suficientemente cercano como para no obtener un descentramiento, y eso confirma también un valor del índice de capacidad CpK superior al requerido.

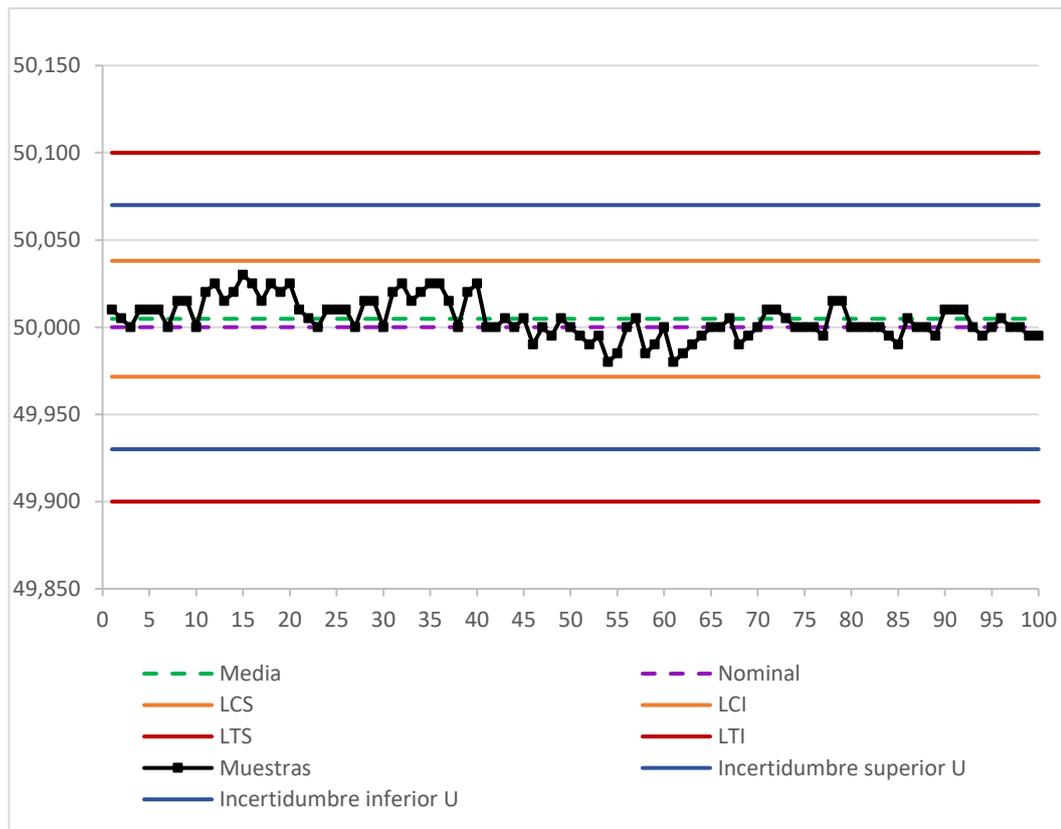


Figura 50. Gráfico del estudio de producción para el caso 2. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de estudio de producción muestra todos los datos como si de una sola serie se trataran, y de nuevo confirma la poca dispersión que existe en el proceso en este caso, dando sentido al valor obtenido del índice de capacidad CAP, el cual es mayor de lo requerido.

De nuevo, se demuestra que el centrado es correcto y que el CpK obtenido, mayor que lo requerido, es válido debido a la cercanía entre la línea verde discontinua que marca el valor de la media de las muestras, y la línea discontinua de color morado que muestra el valor nominal asignado en las especificaciones.

El siguiente gráfico a estudio será el histograma:

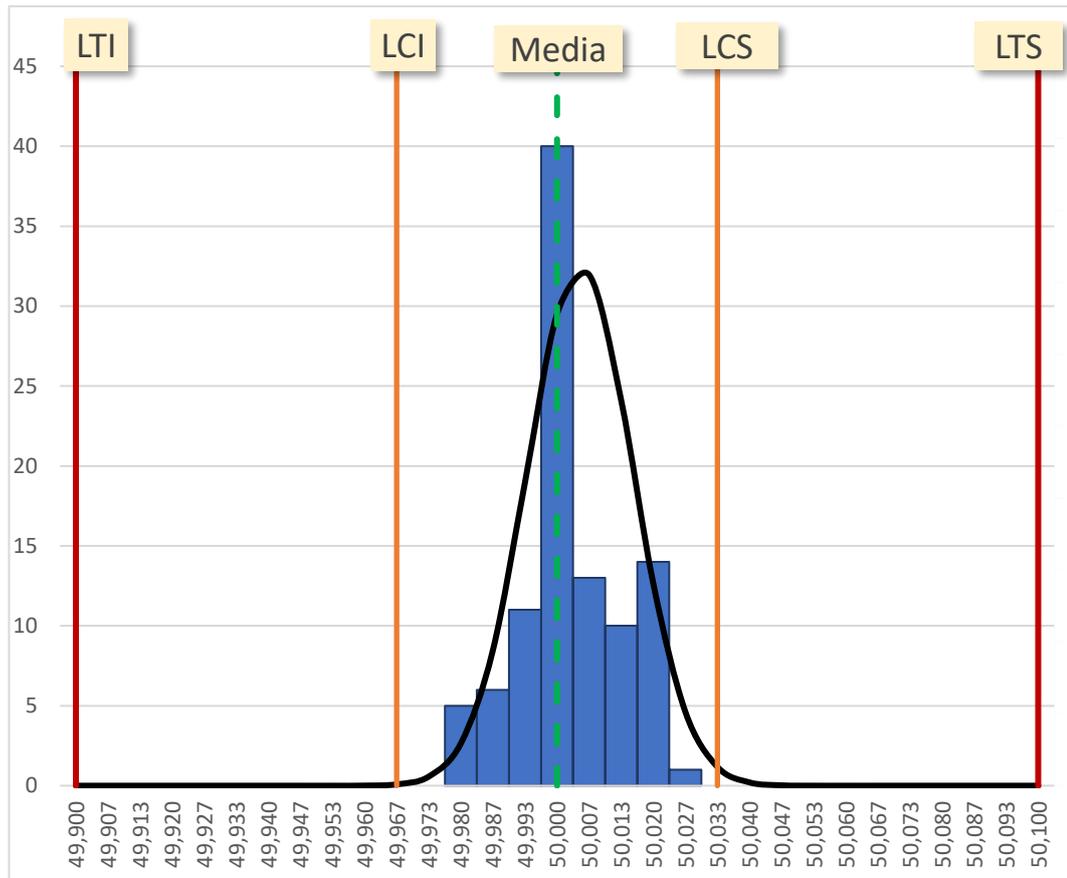


Figura 51. Histograma del caso 2. Fuente: Elaboración propia.

El histograma es el gráfico capaz de dar validez al estudio de capacidad que se está realizando debido a la hipótesis de que las muestras siguen una distribución normal. En este caso, es claramente visible como el histograma se ajusta perfectamente a la campana generada por la distribución normal (línea de color negro), y es por ello que confirmamos la hipótesis de que las muestras siguen una distribución normal.

A diferencia con el caso 1, ahora es muy visible un apuntamiento del histograma en la zona central siendo, a medida que se aleja del centro, cada vez menor la frecuencia de los valores. Esto indica que la dispersión de este caso 2 es mucho menor que la anterior, lo que confirma lo obtenido mediante los índices de capacidad CAP y CAM. Además, el valor de la media se mantiene prácticamente alineado con el valor nominal que se había tomado, 50 mm, y es por esto que el CpK es superior al requerido, es decir, el histograma también confirma que el proceso se encuentra bien centrado.



Con respecto a la tasa de no conformidad obtenida, en acuerdo con la norma AFNOR HF E60-181 que busca valores dentro de una tabla la cual depende del coeficiente de descentrado (k) y del CpK , se muestra lo siguiente:

AFNOR HF E60-181	
Tasa No conformidad (TNC) (en tantos por mil)	
TNC (tantos por mil)	0,000002
TNC ppm	0,00200

Figura 52. Tasa de no conformidad del caso 2. Fuente: Elaboración propia.

El resultado refleja un valor de la tasa de no conformidad de 0,002 ppm (partes por millón), lo que en comparación a lo obtenido en el caso 1 donde el proceso estaba disperso, es muchísimo menor.

En conclusión, el caso 2 es un ejemplo de proceso con baja dispersión y bajo descentramiento y esto se ha comprobado analíticamente mediante los índices de capacidad CAM, CAP y CpK , y también gráficamente.

4.2 DESCENTRAMIENTO

Los estudios que se mostrarán a continuación tratarán de poner a prueba el software en cuanto a la detección de problemas con el descentramiento del proceso. Es decir, el índice de capacidad CpK será el más destacable para este apartado.

La pieza sometida a estudio es un tornillo, y en concreto nos interesa estudiar la calidad del proceso que se encarga de mecanizarlo mediante un cilindrado. Esta zona del tornillo posteriormente será roscada, pero para conseguir la calidad necesaria en el producto es necesario realizar un estudio de capacidad antes del proceso de roscado. La pieza a estudio es la siguiente:

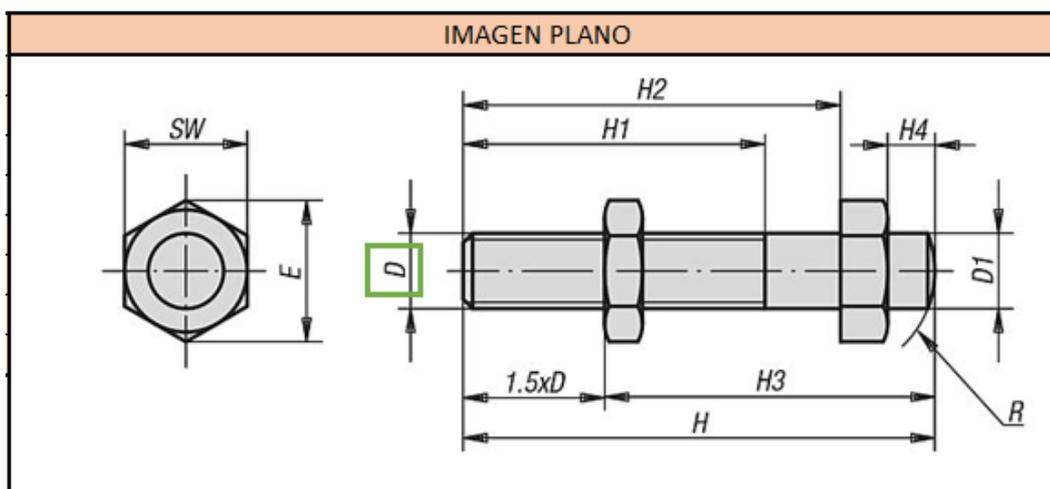


Figura 53. Plano de la pieza sobre la que se va a realizar el estudio. Fuente: Elaboración propia.

En verde se destaca la cota que realmente nos importa para la aplicación de las técnicas SPC.

Las especificaciones que se han asignado a esta cota y que por ello se han introducido en el software son las siguientes:



Especificación

Nominal	16
Tolerancia superior	0,1
Tolerancia inferior (poner signo menos)	-0,1
Límite de Tolerancia superior (LTS)	16,1
Límite de Tolerancia inferior (LTI)	15,9
CpK requerido	2
CAM requerido	2
CAP requerido	1,5
Incertidumbre dispositivo medida	0,04

Figura 54. Especificaciones establecidas para la pieza del estudio de descentramiento. Fuente: Elaboración propia.

Las especificaciones nos indican que el valor nominal para el diámetro del cilindrado debe ser de 16 mm y las tolerancias tanto superior como inferior serán de 0,1 mm. En cuanto a los requerimientos para los índices de capacidad, se ha establecido que el valor del CpK requerido será de 2, el valor del CAM requerido será de 2, y el valor del CAP requerido será de 1,5. Por último, la incertidumbre del instrumento de medida utilizado es de 0,04 mm.

Una vez establecidas las especificaciones a las que debe ajustarse la pieza, se pueden definir los casos simulados.

4.2.1 Descentramiento inválido

Esta toma de datos va a ser llamada “caso 3”, y será una simulación de un proceso en el cual existe un gran descentramiento.

Los datos registrados son los siguientes:



Tabla 5. Tabla de datos del caso 3 extraída de la interfaz de operario del software. Fuente: Elaboración propia.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	16,020	16,035	16,040	16,055	16,060	16,055	16,060	16,060	16,060	16,065
2	16,020	16,035	16,045	16,050	16,055	16,065	16,065	16,065	16,060	16,065
3	16,025	16,040	16,040	16,060	16,065	16,065	16,065	16,065	16,065	16,065
4	16,030	16,045	16,045	16,060	16,060	16,060	16,060	16,065	16,060	16,070
5	16,040	16,040	16,050	16,055	16,060	16,060	16,065	16,070	16,070	16,065
6	16,035	16,040	16,045	16,060	16,060	16,060	16,060	16,060	16,060	16,070
7	16,035	16,040	16,050	16,060	16,060	16,065	16,060	16,060	16,065	16,070
8	16,040	16,045	16,050	16,055	16,060	16,060	16,065	16,065	16,065	16,070
9	16,040	16,040	16,055	16,060	16,065	16,065	16,065	16,065	16,070	16,065
10	16,035	16,040	16,055	16,060	16,065	16,065	16,070	16,070	16,065	16,070
Fecha y hora	06/06/21 10:15	07/06/21 10:10	08/06/21 10:05	09/06/21 10:12	10/06/21 10:05	11/06/21 10:21	12/06/21 10:11	13/06/21 10:08	14/06/21 10:10	15/06/21 10:02
CAM	4,226	10,000	6,172	9,428	10,541	9,535	9,877	9,035	8,452	12,649

CAP	2,75
CpK	1,21

Dentro del software, se pueden encontrar estos datos en la interfaz de ingenieros de la siguiente manera:

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	16,020	16,035	16,040	16,055	16,060	16,055	16,060	16,060	16,060	16,065
2	16,020	16,035	16,045	16,050	16,055	16,065	16,065	16,065	16,060	16,065
3	16,025	16,040	16,040	16,060	16,065	16,065	16,065	16,065	16,065	16,065
4	16,030	16,045	16,045	16,060	16,060	16,060	16,060	16,065	16,060	16,070
5	16,040	16,040	16,050	16,055	16,060	16,060	16,065	16,070	16,070	16,065
6	16,035	16,040	16,045	16,060	16,060	16,060	16,060	16,060	16,060	16,070
7	16,035	16,040	16,050	16,060	16,060	16,065	16,060	16,060	16,065	16,070
8	16,040	16,045	16,050	16,055	16,060	16,060	16,065	16,065	16,065	16,070
9	16,040	16,040	16,055	16,060	16,065	16,065	16,065	16,065	16,070	16,065
10	16,035	16,040	16,055	16,060	16,065	16,065	16,070	16,070	16,065	16,070
	06/06/2021 10:15	07/06/2021 10:10	08/06/2021 10:05	09/06/2021 10:12	10/06/2021 10:05	11/06/2021 10:21	12/06/2021 10:11	13/06/2021 10:08	14/06/2021 10:10	15/06/2021 10:02
Media (μ)	16,032	16,040	16,048	16,058	16,061	16,062	16,064	16,065	16,064	16,068
Desviación estándar (σ)	0,007888106	0,003333333	0,005400617	0,003535534	0,003162278	0,003496029	0,003374743	0,003689324	0,003944053	0,002635231
CAM	4,226	10,000	6,172	9,428	10,541	9,535	9,877	9,035	8,452	12,649

Figura 55. Datos para el caso 3 extraídos de la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso, la toma de datos se ha realizado adquiriendo una serie de 10 muestras cada día. Es por ello que el estudio comenzó el día 06/06/2021 a las 10:15 h, y finalizó el 15/06/2021 a las 10:02 h. Se ha mantenido siempre una hora del día similar para la toma de datos por si esta pudiera afectar en algún sentido a la adquisición de los datos.

En un primer vistazo, en la tabla obtenida de la interfaz de operarios ya se puede observar como el valor del índice de capacidad CpK es menor del requerido en las especificaciones.



Desviación Estándar (σ)	0,012
Media (μ)	16,056
Límite de control superior (LCS)	16,092
Límite de control inferior (LCI)	16,020
Incertidumbre mínima ($U_{\leq T/6}$)	0,033
Límite tolerancia superior menos la incertidumbre (LTS-U)	16,060
Límite de tolerancia inferior más la incertidumbre (LTI+U)	15,940

Figura 56. Tabla de datos de la producción de la interfaz de ingenieros para el caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra desde la interfaz de ingenieros los valores de ciertos parámetros que serán luego representados en las gráficas. Los valores de media y desviación estándar son los aplicados a la totalidad de la población obtenida.

Tamaño muestra	100
CpK i	4,28
CpK s	1,21
CpK	1,21
CAP	2,75
k (Coeficiente de descentrado)	0,559

Figura 57. Tabla de índices de capacidad en la interfaz de ingenieros para el caso 3. Fuente: Elaboración propia.

La figura anterior muestra el tamaño total de muestras obtenido, el coeficiente de descentrado, útil más adelante para la obtención de la tasa de no conformidad, y los índices de capacidad CpK y CAP.

Se puede observar, al igual que en la interfaz para operarios que el CpK se encuentra por debajo de los requerimientos que se han establecido para este índice en las especificaciones, lo que nos indica que, si el estudio se ha desarrollado correctamente, el proceso sufre un descentramiento no deseado.

En cuando a los valores de los índices de capacidad referidos a la dispersión, tanto el CAM en cada una de las 10 series de datos adquiridas, como el CAP referido a la totalidad de las muestras, han dado como resultado un valor superior a lo requerido para cada uno de ellos, y es por esto que, si el estudio se está desarrollando correctamente, el proceso tiene poca dispersión.

A continuación, mediante el uso de los gráficos, se comprobará si estos índices están devolviendo valores acertados acerca del proceso de producción.

El primer gráfico para analizar es el correspondiente al estudio intrínseco. Su característica más relevante es la separación de las muestras, serie por serie pudiendo reflejar la dispersión que se ha obtenido en cada una de las series por separado.

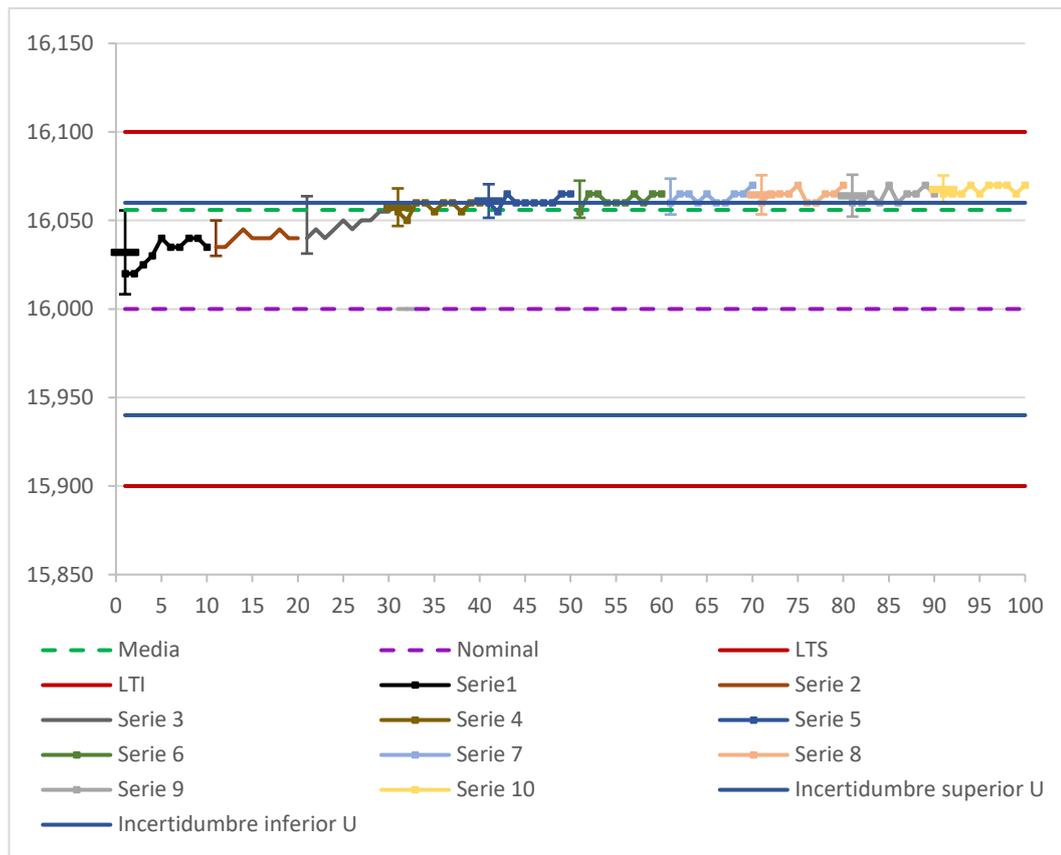


Figura 58. Gráfico del estudio intrínseco del caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico permite ver como la dispersión de cada una de las series es bastante pequeña ya que las barras de error que tienen cada una de las series tienen una amplitud pequeña. Así mismo, la dispersión general entre la serie 1, que es la que se encuentra más cercana al valor nominal, y la serie 10 que es la que se encuentra más alejada, no es muy grande, y esto reitera lo obtenido anteriormente con los índices de capacidad CAM y CAP respectivamente.

El problema que se observa en este gráfico es un gran descentramiento de la producción, los menores valores adquiridos comienzan en 16,02 mm, lo cual ya se encuentra por encima del valor nominal, y se aprecia una gran degradación que hace aumentar la cota hasta valores como 16,07 mm, muy por encima del valor nominal. Esto refleja un problema con el descentramiento, lo cual confirma lo obtenido mediante el índice de capacidad CpK.

La degradación sufrida muestra una clara tendencia ascendente de la producción, la cual puede ser causada por el desgaste de la herramienta utilizada durante el mecanizado de la misma, al realizar el cilindrado.

El siguiente gráfico será el correspondiente al estudio de producción:

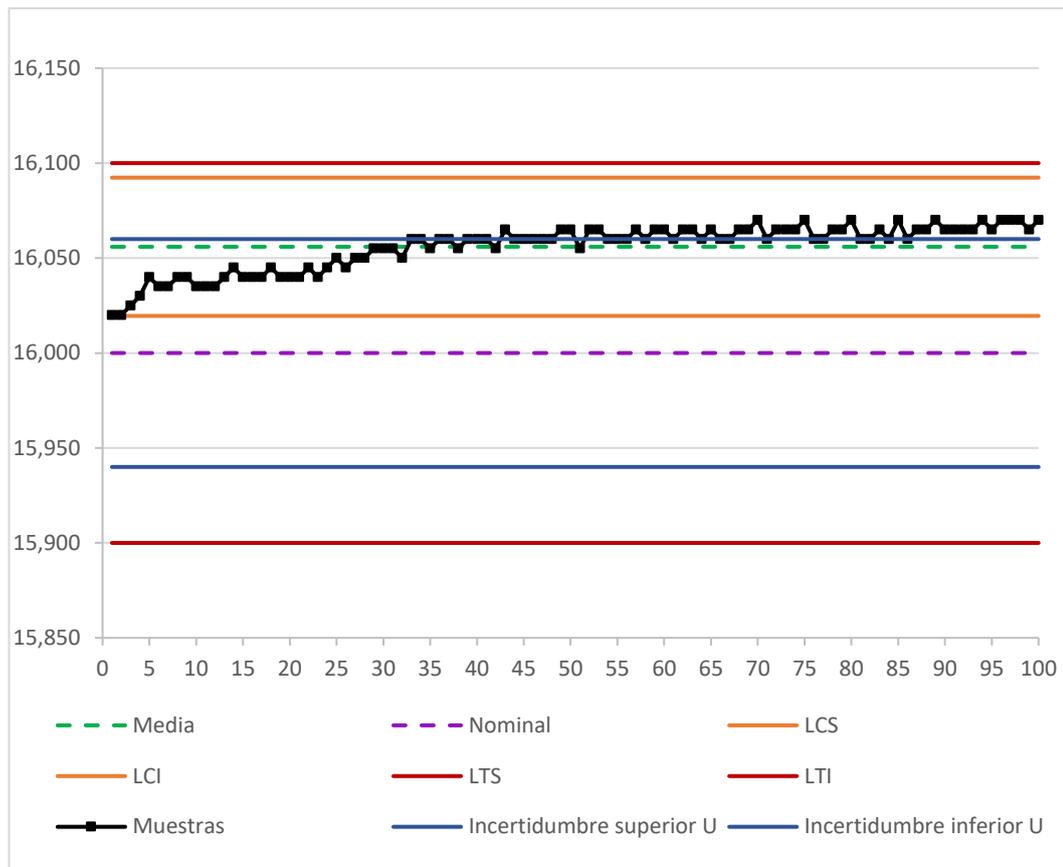


Figura 59. Gráfico del estudio de producción para el caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Con este gráfico se confirma lo visto en el anterior, existe un enorme descentramiento de la producción, pero la dispersión está contenida. A mayores, este gráfico ofrece la visualización de los límites de control (líneas continuas de color naranja), situadas a una distancia de 3 veces la desviación estándar de la población, en los dos sentidos, con respecto a la media. Hasta el límite de control inferior se encuentra por encima del valor nominal, estando la media (línea discontinua de color verde), muy alejada del valor nominal (línea discontinua de color morado).

Además, gran parte de las muestras sobrepasan el límite de tolerancia superior con la incertidumbre añadida como dicta la norma UNE-EN ISO 14253.

Este tipo de gráficos, así como el estudio en general, puede resultar de gran utilidad para conocer el momento en el que es necesario sustituir la herramienta encargada del mecanizado (plaquita), que, debido a un excesivo desgaste, a lo largo de su uso comienza a ir reduciendo su punto de contacto con la pieza a mecanizar obteniéndose cotas cada vez mayores, como es el caso. Esto genera una tendencia ascendente en el proceso, la cual es fácilmente visible en los dos gráficos anteriores.

El siguiente gráfico será el histograma:

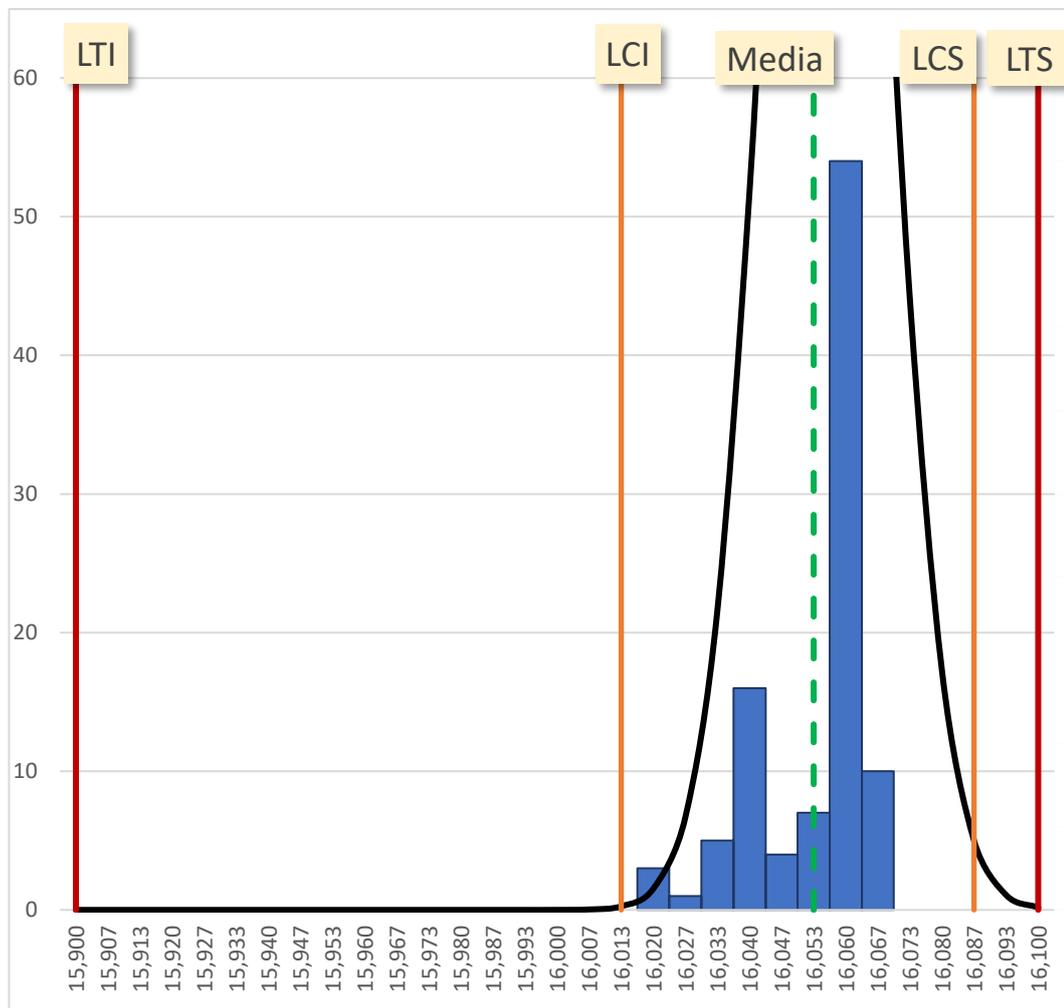


Figura 60. Histograma del caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Este histograma se encuentra desplazado hacia la derecha en gran medida, y esto es debido al descentramiento que sufre el proceso. El valor de la media (línea discontinua de color verde) es de 16,056 mm, lo cual es muy superior al valor nominal de 16,00 mm que se había establecido en las especificaciones.

Por otro lado, es visible que el proceso cumple correctamente la hipótesis de seguir una distribución normal, ya que se ciñe de una forma correcta a la campana de la distribución normal que se representa dentro del histograma.

También cabe destacar que la dispersión del proceso es bastante pequeña ya que las barras de frecuencias son mucho mayores en la zona cercana al valor de la media, y ninguna barra se sale de la campana por los extremos.

En cuanto a la tasa de no conformidad, para este caso se ha obtenido lo siguiente:

AFNOR HF E60-181	
Tasa No conformidad (TNC) (en tantos por mil)	
TNC (tantos por mil)	0,16
TNC ppm	160,00000

Figura 61. Tasa de no conformidad del caso 3. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene un valor de la tasa de no conformidad de 160 ppm (partes por millón), un valor muy alto.

En conclusión, el caso 3 es un claro ejemplo de proceso descentrado y que además sigue una tendencia ascendente, y esto lo acredita el bajo valor obtenido para su CpK, y lo anteriormente comentado con las gráficas. En cuanto a la dispersión se encuentra dentro de los valores requeridos, por lo que sería correcta.

Para solucionar el problema encontrado en el caso 3, se va a desarrollar el caso 4, el cual se realizará tras haber sustituido la herramienta desgastada en el proceso de mecanizado.

4.2.2 Descentramiento válido

Este será el llamado “caso 4”, en el cual se simulará una mejora con respecto al anterior caso, tratando de solucionar el problema del descentramiento mediante la sustitución de la plaquita de corte para el cilindrado que se realiza en la pieza a estudio. Debido a que la herramienta de corte, aunque sea nueva, seguirá desgastándose a lo largo del proceso y por ello a lo largo del registro de datos, la tendencia ascendente se podrá observar también en el caso 4.

Los datos registrados en la adquisición de muestras son los siguientes:



Tabla 6. Tabla de datos del caso 4 extraída de la interfaz de operario del software. Fuente: Elaboración propia.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	15,970	15,975	15,980	15,990	15,995	16,000	16,000	16,005	16,010	16,015
2	15,970	15,975	15,985	15,990	15,995	16,000	16,000	16,010	16,010	16,015
3	15,975	15,980	15,985	15,990	16,000	16,000	16,000	16,005	16,010	16,015
4	15,970	15,980	15,985	15,990	16,000	16,005	16,005	16,005	16,010	16,015
5	15,975	15,980	15,990	15,990	16,000	16,000	16,010	16,005	16,010	16,010
6	15,975	15,980	15,990	15,995	16,000	16,000	16,005	16,010	16,005	16,015
7	15,970	15,975	15,990	15,990	16,000	15,995	16,005	16,010	16,015	16,020
8	15,975	15,980	15,985	15,995	16,000	16,000	16,005	16,005	16,010	16,020
9	15,975	15,980	15,990	15,995	15,995	16,000	16,000	16,005	16,015	16,020
10	15,975	15,985	15,990	15,995	16,000	16,005	16,005	16,010	16,015	16,020
Fecha y hora	16/06/21 10:02	17/06/21 10:10	18/06/21 10:16	19/06/21 10:12	20/06/21 10:24	21/06/21 10:21	22/06/21 10:01	23/06/21 10:08	24/06/21 10:07	25/06/21 10:17
CAM	12,910	10,541	9,535	12,910	13,801	11,744	9,877	12,910	10,541	9,877

CAP	2,45
CpK	2,37

A primera vista, la interfaz para operarios nos muestra que el descentramiento que se había reportado en el caso 3, ha desaparecido ya que se ha obtenido un valor del CpK superior al requerido en las especificaciones. Además, los valores de los índices de capacidad CAM y CAP que aportan información acerca de la dispersión se han mantenido dentro de los márgenes correctos.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Serie 9	Serie 10
1	15,970	15,975	15,980	15,990	15,995	16,000	16,000	16,005	16,010	16,015
2	15,970	15,975	15,985	15,990	15,995	16,000	16,000	16,010	16,010	16,015
3	15,975	15,980	15,985	15,990	16,000	16,000	16,000	16,005	16,010	16,015
4	15,970	15,980	15,985	15,990	16,000	16,005	16,005	16,005	16,010	16,015
5	15,975	15,980	15,990	15,990	16,000	16,000	16,010	16,005	16,010	16,010
6	15,975	15,980	15,990	15,995	16,000	16,000	16,005	16,010	16,005	16,010
7	15,970	15,975	15,990	15,990	16,000	15,995	16,005	16,010	16,015	16,020
8	15,975	15,980	15,985	15,995	16,000	16,000	16,005	16,005	16,010	16,015
9	15,975	15,980	15,990	15,995	15,995	16,000	16,000	16,005	16,010	16,015
10	15,975	15,985	15,990	15,995	16,000	16,005	16,005	16,010	16,015	16,020
Media (μ)	15,973	15,979	15,987	15,992	15,999	16,001	16,004	16,007	16,011	16,017
Desviación estándar (σ)	0,002581989	0,003162278	0,003496029	0,002581989	0,002415229	0,002838231	0,003374743	0,002581989	0,003162278	0,003374743
CAM	12,910	10,541	9,535	12,910	13,801	11,744	9,877	12,910	10,541	9,877

Figura 62. Datos para el caso 4 extraídos de la interfaz de ingenieros. Fuente: Elaboración propia.

En la interfaz de ingenieros se aporta, a mayores, información acerca de la media y la desviación estándar de cada una de las series.

La adquisición de datos del caso 4 comenzó el día 16/06/2021 a las 10:02 h, una vez había sido cambiada la plaquita de corte con respecto al caso 3. Y finalizó el día 25/06/2021 a las 10:17 h. Es decir, la toma de datos se hizo en 10 series, una cada día, y se trataron de realizar todas las tomas de datos a la



misma hora del día para evitar agentes externos que pudieran modificar el estudio.

Desviación Estándar (σ)	0,014
Media (μ)	15,997
Límite de control superior (LCS)	16,038
Límite de control inferior (LCI)	15,956
Incertidumbre mínima ($U \leq T/6$)	0,033
Límite tolerancia superior menos la incertidumbre (LTS-U)	16,060
Límite de tolerancia inferior más la incertidumbre (LTI+U)	15,940

Figura 63. Tabla de datos de la producción de la interfaz de ingenieros para el caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Tamaño muestra	100
CpK i	2,37
CpK s	2,52
CpK	2,37
CAP	2,45
k (Coeficiente de descentrado)	0,032

Figura 64. Tabla de índices de capacidad en la interfaz de ingenieros para el caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Las dos figuras anteriores muestran tablas de datos integrados dentro de la interfaz para ingenieros y contienen datos referidos a la totalidad de la población.

También se puede destacar de nuevo el valor del índice de capacidad CpK que indica que el descentramiento que existía en el caso 3, se pudo enmendar con el cambio de herramienta de corte. Gracias al índice de capacidad CAP se ve que la dispersión de la totalidad de los datos entra dentro de los valores que son aceptables, y es por ello que el valor de este índice es mayor que el requerido en las especificaciones.

A continuación, se pasará a analizar los gráficos obtenidos para el caso 4, estos servirán de ayuda para comprobar que los valores obtenidos analíticamente mediante los índices de capacidad se pueden confirmar como correctos, además, se tratará de buscar tendencias dentro de la producción debidas al desgaste de la plaquita de corte, al igual que pasaba en el caso 3.

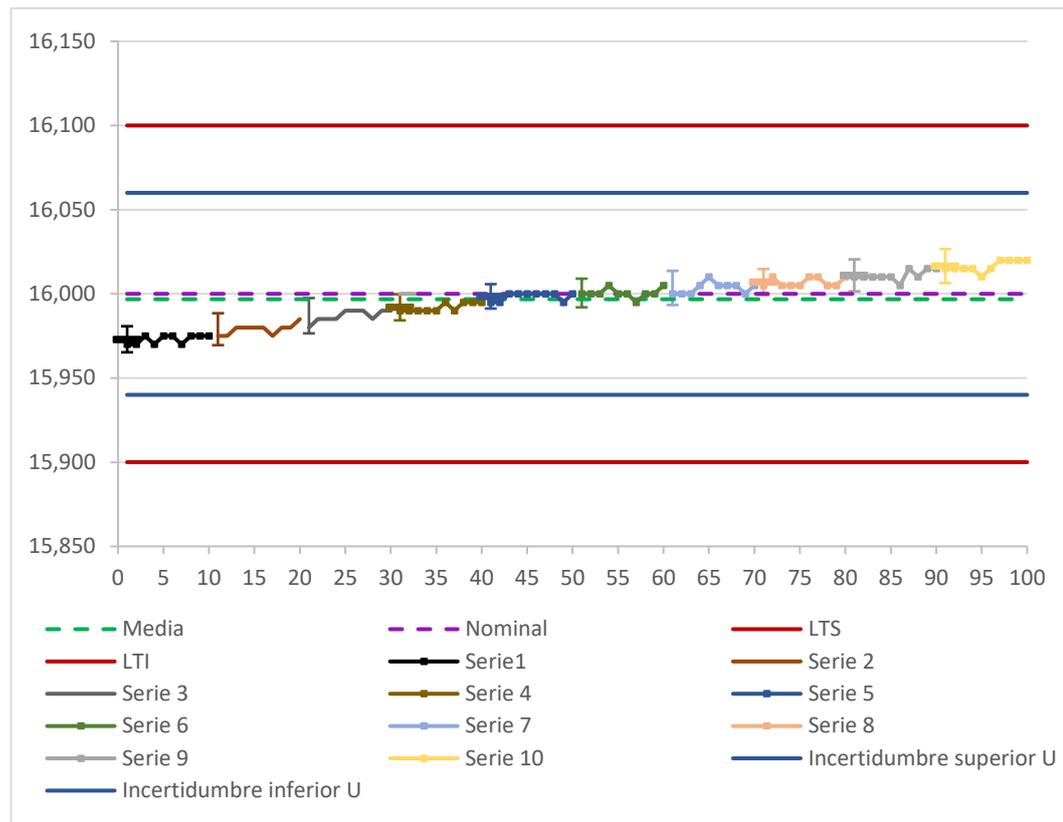


Figura 65. Gráfico del estudio intrínseco del caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico nos muestra lo esperado tras obtener los valores de los índices de capacidad. Se muestra un buen centrado del proceso, el valor de la media (línea discontinua de color verde) se encuentra muy cerca del valor nominal introducido en las especificaciones (línea discontinua de color morado). Esto corrobora el valor del índice de capacidad CpK obtenido mediante la forma analítica.

En cuanto a la dispersión observada, este gráfico muestra el estudio intrínseco, es decir, representa cada serie por separado añadiendo una barra de error a cada una de ellas. Todas las series presentan una dispersión lo suficientemente pequeña, por lo que se corrobora el valor obtenido del índice de capacidad CAM.

Es destacable también que todas las muestras, así como las barras de error de cada serie que representan tres veces el valor de la desviación estándar intrínseca hacia cada lado de la media de cada serie, se mantienen dentro de los límites de tolerancias con el añadido de la incertidumbre del instrumento de medida tal y como se indica en la norma UNE-EN ISO 14253.

El siguiente gráfico a representar es el correspondiente al estudio de producción:

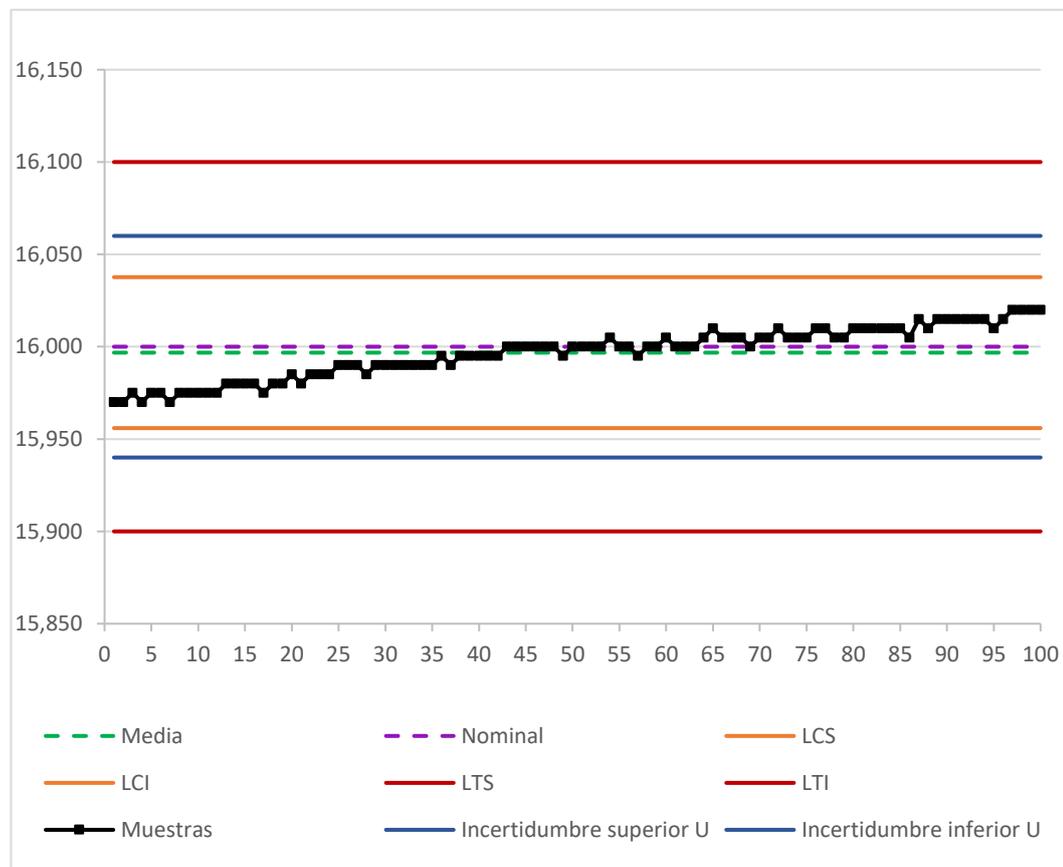


Figura 66. Gráfico del estudio de producción para el caso 4. Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico, además de lo anteriormente dicho, demuestra que el conjunto de muestras tratadas todas ellas como una misma serie obtiene una dispersión lo suficientemente pequeña para que el proceso sea correcto, por lo que el valor del índice de capacidad CAP, que se ha obtenido mediante el método analítico concuerda con lo que se encuentra representado en la gráfica.

Es de gran importancia añadir que el proceso, de la misma manera que pasaba en el caso 3, muestra una clara tendencia ascendente. Esto debe suceder por el desgaste de la herramienta de corte utilizada, e indica de una forma bastante fiable el tiempo de duración de estas herramientas. Por el momento todos los índices de capacidad son correctos, pero si la tendencia siguiera tal y como se demuestra que sigue en el caso 3, el proceso se degradaría y no se obtendría la calidad deseada, por lo que es necesario cambiar la plaquita de corte cuando esto esté cerca de ocurrir.

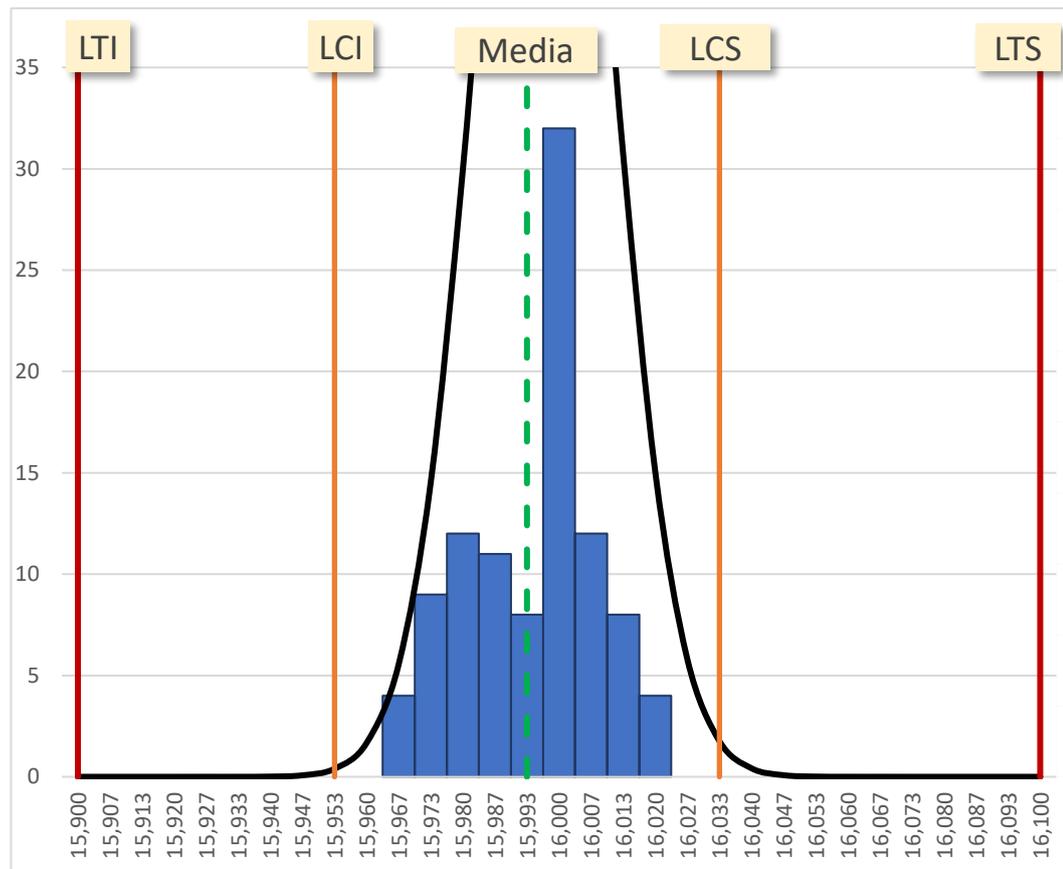


Figura 67. Histograma del caso 4. Fuente: Elaboración propia.

El histograma de nuevo va a ser el gráfico empleado para dar por correcta la hipótesis supuesta de que el proceso sigue una distribución normal.

Es visible que el proceso se ciñe de una manera bastante cercana a la campana descrita por la distribución normal (línea de color negro), por lo que se asume que la hipótesis es correcta.

Además, el histograma vuelve a corroborar como este caso, a diferencia del caso 3, se encuentra perfectamente centrado, ya que la media (línea discontinua de color verde) se encuentra muy cercana al valor nominal establecido en las especificaciones, 16 mm. Además, en cuanto a la dispersión, las barras centrales tienen una frecuencia mayor que las que se encuentran en los extremos, manteniéndose todas dentro de los extremos de la campana de la distribución normal.

Por último, en cuanto a la tasa de no conformidad se ha obtenido lo siguiente:



AFNOR HF E60-181	
Tasa No conformidad (TNC) (en tantos por mil)	
TNC (tantos por mil)	0,000002
TNC ppm	0,00200

Figura 68. Tasa de no conformidad del caso 4. Fuente: Elaboración propia.

El valor obtenido es de 0,002 ppm (partes por millón), lo que realmente es un muy buen resultado que asegura que el proceso de producción analizado en el caso 4 es un proceso de alta calidad.

En conclusión, el caso 4 resuelve el problema planteado en el caso 3 con respecto al descentramiento, en este obtenemos un valor del CpK superior a los requerimientos, y mantenemos los valores tanto de CAM, como de CAP por encima de los requerimientos, al igual que en el caso 3.

Además, se ha demostrado la degradación sufrida por el proceso al mecanizar la pieza a estudio, ya que tras cambiar la plaquita el proceso siguió con su tendencia ascendente, aunque en este caso controlada ya que era nueva.



CAPÍTULO V

ESTUDIO ECONÓMICO



5.1 ESTUDIO ECONÓMICO

A continuación, se va a realizar un análisis económico del proyecto desarrollado para la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Para esto se tendrán en cuenta tanto los materiales necesarios para el desarrollo del mismo, el estudio llevado a cabo para conformar tanto el software como la memoria, así como el tiempo que se ha necesitado para realizar cada parte de este proyecto.

Para detallar el estudio económico de una forma más clara, se segmentará en cuatro partes, recursos utilizados, costes directos, costes indirectos y coste total del proyecto.

5.1.1 Recursos utilizados

Para llevar a cabo, tanto el desarrollo de este software capaz de sincronizarse con instrumentos de medición mediante bluetooth, como la memoria técnica correspondiente, han sido necesarios los siguientes recursos:

- Hardware:

- Ordenador Portátil Sony Intel® Core™ i3 con 6 Gb de RAM.
- Calibre TESA TWIN-CAL IP67.
- Emisor bluetooth TESA TLC-BLE.
- Calibre Mahr MARCAL 16 EWRI.

- Software:

- Sistema Operativo Windows 10 Pro.
- Microsoft Office 365.

- Material de oficina:

- Papel DIN A4 80 g/m².
- Servicios de impresora y encuadernación.



5.1.2 Costes directos del proyecto

Se comenzará realizando el cálculo de las horas trabajadas por una persona a lo largo de un año, es decir, las horas efectivas anuales.

Tabla 7. Días hábiles por año. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Días/año
Días anuales de un año medio	365
Sábados y Domingos	104
Días efectivos de vacaciones	20
Días festivos	14
Días tomados por enfermedad	15
TOTAL DE DÍAS HÁBILES	212

Este cálculo se ha realizado restando a los días con los que cuenta un año medio, el número de días que son parte del fin de semana, los días de vacaciones, los días festivos, y los días de posible petición por enfermedad.

Suponiendo un horario laboral de jornada completa en el que se realizan 8 horas de trabajo al día, se obtendrá un total de **1696 h/año**.

Simulando que el proyecto ha sido desarrollado por un Ingeniero Mecánico, supondremos un salario anual, incluyendo prestaciones de IRPF y demás contribuciones a la Seguridad Social, de 30000,00 €.

Es por ello que el salario por cada hora de trabajo será de **17,69 €/h**.

El siguiente paso es el cálculo de las horas que han sido necesarias para la realización del proyecto al completo:

Tabla 8. Horas empleadas para la realización del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Horas
Planificación del estudio	20
Documentación	120
Desarrollo del Software	120
Experimentación con los instrumentos de medida	40
Redacción de la memoria	200
HORAS TOTALES	500



El coste total de personal necesario para la realización de este proyecto se obtendrá multiplicando las horas totales requeridas, por el salario por cada hora trabajada, lo que da un total de **8844,34 €**

Por otro lado, se encuentra el coste del material utilizado, que se dividirá en material amortizable y material no amortizable.

Para el cálculo del coste del material amortizable se tendrá en cuenta el coste actual de los equipos y la amortización lineal de los mismos, dependiendo el número de años del tipo de equipo al que se refiera.

Tabla 9. Tabla de costes amortizables. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Precio de compra	Años de uso	Días por año	Horas para el proyecto	Coste Final (€)
Ordenador Portátil Sony Intel® Core™ i3 con 6Gb de RAM	500,00	5	212	500	29,48
Calibre TESA TWIN-CAL IP67	230,00	10	212	40	0,54
Emisor bluetooth TESA TLC-BLE	90,00	10	212	40	0,21
Calibre Mahr MARCAL 16 EWRI	300,00	10	212	40	0,71
Sistema Operativo Windows 10 Pro	259,00	5	212	500	15,27
Microsoft Office 365	69,00	1	212	340	13,83
TOTAL					60,05

El coste final de cada uno de los equipos se ha realizado de la siguiente manera:

$$\text{Coste final} = \frac{500,00 \text{ €}}{5 \text{ años} \cdot \frac{212 \text{ d}}{\text{años}} \cdot \frac{8 \text{ h}}{\text{d}}} \cdot 500 \text{ h} = 29,48 \text{ €}$$

Por lo tanto, el coste debido a los equipos informáticos y los instrumentos de medida necesarios es de **60,05 €**.

En cuanto al cálculo de los costes de materiales no amortizables, es decir aquellos que no podrán seguir usándose a lo largo del tiempo, se realizará de la siguiente manera:



Tabla 10. Tabla de costes no amortizables. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Precio de compra (€)
Papel DIN A4 80 g/m ²	20,00
Servicios de impresora y encuadernación	50,00
Otros	40,00
Total sin IVA	110,00
IVA 21%	23,10
TOTAL IVA INCLUIDO	133,10

Por tanto, el total de los costes no amortizables será de **133,10 €**.

Ya se puede realizar la suma de todos los costes directos del proyecto, lo que ascendería hasta **9037,49 €**.

5.1.3 Costes indirectos del proyecto

En este apartado se recogen aquellos costes que no pueden ser introducidos en el apartado anterior debido a que no son asignables a un único elemento, pero a su vez son costes indispensables para la realización del proyecto.

Dentro de este tipo de coste indirecto se encuentra el gasto de electricidad, climatización, iluminación, etc.

Tabla 11. Tabla de costes indirectos totales. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Coste (€)
Consumo eléctrico de los equipos	120,00
Climatización	80,00
Iluminación	50,00
Otros	50,00
TOTAL DE COSTES INDIRECTOS	300,00

Por lo tanto, los costes indirectos debido a la realización de este proyecto son de **300,00€**.



5.1.4 Coste total del proyecto

En los apartados anteriores se han desglosado los costes del proyecto en directos e indirectos, y a su vez, los directos se han desglosado en amortizables y no amortizables. Si realizamos la suma de todos estos costes se obtendrá el coste total para la realización de este proyecto llamado “Desarrollo de un software para la aplicación de técnicas SPC en procesos de fabricación”.

Tabla 12. Tabla de coste total del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Coste (€)
Costes directos totales	9037,49
Costes indirectos totales	300,00
TOTAL DE COSTES DEL PROYECTO	9337,49

Finalmente, el coste total del proyecto se resume en la cifra de **9337,49 €**.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES



6.1 CONCLUSIONES

Este capítulo recopila las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto, tratando de compararse con los objetivos propuesto al inicio de este.

El objetivo principal que se propuso para este proyecto fue el desarrollo de un software, mediante el lenguaje de Microsoft Excel, capaz de aplicar técnicas de control estadístico de procesos a muestras tomadas durante un proceso de fabricación. Bajo mi punto de vista, este objetivo ha sido alcanzado de una forma solvente, se ha conseguido desarrollar este software añadiendo además diferentes funcionalidades que hacen que tanto el manejo como la interpretación de los resultados sea lo más sencilla posible.

Se ha establecido un modo de adquisición de datos totalmente inalámbrico gracias al uso de instrumentos de medida con conexión bluetooth que han funcionado perfectamente durante las numerosas pruebas realizadas para el desarrollo del software. Esto solventa el objetivo de facilitar a los operarios encargados de la toma de datos directamente en la cadena de producción, realizar las mediciones con tan solo pulsar un botón, y además sin cables.

La introducción de interfaces diferenciadas para cada tipo de usuario mejora el uso del software evitando fallos de utilización. Así mismo, el sistema de protección de las zonas de la interfaz que no deben ser modificadas por personal no cualificado para ello mejora la experiencia de uso y evita reportes de errores en el proceso del estudio de capacidad.

Más allá del cumplimiento de los objetivos, este software es una herramienta de gran valor para empresas que busquen una mejora en la calidad de su fabricación, consiguiendo hacer estudios de capacidad del proceso de una forma rápida y con una gran cantidad de información como resultado, pudiendo gracias a esta tomar decisiones acerca de cambios en el proceso de fabricación, cambios de herramientas que puedan sufrir un desgaste, etc. Todo esto aporta un valor añadido en cuanto al ahorro de costes debido a defectos en la producción.

Gracias a esta herramienta se pueden prevenir defectos, incontrolables de no ser por la aplicación de las técnicas de control estadístico de procesos, lo que supone una mejora en la calidad de los productos finales que pueden llegar a los clientes, y del proceso de fabricación en sí mismo.

Este tipo de software, ayudado de un hardware acorde, es uno de los pilares básicos para implementar las metodologías de la industria 4.0 en una empresa.



6.2 LÍNEAS FUTURAS

En cuanto a las líneas de mejora futuras que se podrían implementar para este proyecto, la más interesante sería la de conseguir una toma de mediciones aún más automatizada. Esto sería posible mediante una medidora tridimensional que fuera programada para hacer los movimientos necesarios para hacer contacto con la pieza y obtener el valor de la cota deseada. Los valores de las muestras se podrían lanzar directamente al software desarrollado durante este proyecto y de esa manera se conseguiría automatizar aún más.

También se podrían optar por otro tipo de instrumentos de medida en función de la cota y de la pieza sobre la que se vaya a realizar, como podrían ser medidoras por láser, o por ultrasonidos. Estos podrían acoplarse a un brazo robótico que los posicionara para realizar las mediciones.

Otro proceso de mejora que se podría añadir como línea futura sería adaptar el software para ser capaz de soportar una población mucho mayor a la que se ha utilizado para este caso, que era de 100 muestras. Esto sería un proceso no muy complejo de efectuar.



CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA



7.1 BIBLIOGRAFÍA

1. Real Academia Española. Real Academia española-Calidad. [Online]. [Consultado el 10 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/calidad>.
2. Centro Español de Metrología. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y terminos asociados. [Online].; 2012 [Consultado el 10 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>.
3. Granados Gonzalez CE. Introducción a la historia de la Metrología. Universidad Politécnica de Madrid ed. Madrid; 2007.
4. Centro Español de Metrología. La Metrología también existe. [Online].; 2019 [Consultado el 11 de Mayo de 2021]. Disponible en: https://www.cem.es/sites/default/files/30363_lametrologiatambienexiste_web.pdf.
5. Centro Español de Metrología. Consejo Superior de Metrología. [Online]. [Consultado el 21 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.cem.es/es/cem/consejo-superior-metrologia>.
6. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Revista Economía Industrial. [Online]. [Consultado el 14 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/407/NOTAS.pdf>.
7. Centro Español de Metrología. Infraestructura metrológica española. [Online]. [Consultado el 14 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.cem.es/es/cem/metrologia/infraestructura-metrologica-espanola>.
8. Cognex. Nuevo sensor de visión potenciado por In-Sight. [Online].; 2015 [Consultado el 21 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.cognex.com/es-ar/company/press-releases/2015/cognex-introduces-new-vision-sensor-powered-by-in-sight>.
9. Revistas.utp (Universidad Tecnológica de Panamá. Comunicaciones inalámbricas Bluetooth. [Online]. [Consultado el 25 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/412/html>.



10. IONOS. Qué es Bluetooth. [Online].; 2020 [Consultado el 15 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/que-es-bluetooth/>.
11. Osmosis Latina. LANs Inalámbricas y "Bluetooth". [Online]. [Consultado el 15 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.osmosislatina.com/conectividad/bluetooth.htm>.
12. Buisán M, Valdés F. LA INDUSTRIA CONECTADA 4.0. [Online].; 2017 [Consultado el 15 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://e4-0.ipn.mx/wp-content/uploads/2019/10/la-industria-conectada-4-0.pdf>.
13. Mendoza Martínez V, De la Parra PN. El control estadístico de procesos (SPC): aplicaciones y beneficios en la industria. [Online]. [Consultado el 16 de Mayo de 2021]. Disponible en: [https://upaep.mx//micrositios/coloquios/coloquio2013/memorias/Mesa%201%20PEyDT/EI%20control%20estad%3%adstico%20de%20procesos%20\(SPC\)-%20Aplicaciones%20y%20beneficios%20en%20la%20industria.pdf](https://upaep.mx//micrositios/coloquios/coloquio2013/memorias/Mesa%201%20PEyDT/EI%20control%20estad%3%adstico%20de%20procesos%20(SPC)-%20Aplicaciones%20y%20beneficios%20en%20la%20industria.pdf).
14. Rajadell M, Sánchez JL. Lean Manufacturing: La evidencia de una necesidad De Santos D, editor. Madrid; 2010.
15. Woller DT. Sistemas de Gestión de Calidad: La evolución de los SGC y su vinculación con los enfoques de inspección. [Online].; 2014 [Consultado el 15 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/adaintegracion/2-la-evolucion-de-los-sistemas-de-calidad>.
16. MtMIngenieros. ¿Qué es SMED? [Online]. [Consultado el 15 de Mayo de 2021]. Disponible en: <http://mtmingenieros.com/knowledge/que-es-smed/>.
17. López G. Metodología Six-Sigma: Calidad Industrial. [Online]. [Consultado el 16 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/1259722-Metodologia-six-sigma-calidad-industrial-la-elaboracion-de-los-productos-en-el-area-industrial-involucra-principalmente-tres-etapas.html>.
18. Kumiega A, Vliet VB. Perform SPC Analysis. Quality Money Management: (251-262); 2008.
19. Pulido HG, Salazar R. Control estadístico de calidad y seis sigma.: McGraw-Hill; 2009.



20. Sánchez I. Control de procesos por variables. [Online]. [Consultado el 17 de Mayo de 2021]. Disponible en: http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/leganes/ing_telecomunicacion/metodos_mejora_calidad/MEMC/doc_generica/Temario/CapCVar/CapCVariables.pdf.
21. measuracontrol.com. ¿Qué es CpK? [Online]. [Consultado el 17 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://measurecontrol.com/que-es-cpk/>.
22. measuracontrol.com. Control Estadístico de Procesos: Capacidad del Proceso. [Online]. [Consultado el 17 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://measurecontrol.com/wp-content/uploads/FAQ/controlestadistico12.pdf>.
23. Mitutoyo. Software de SPC en tiempo real MEASURLINK. [Online]. [Consultado el 20 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.mitutoyo.com/catalogs-brochures/measurlink-real-time-spc-software/#>.
24. Mitutoyo. MEASURLINK 9 REAL-TIME SPC SOFTWARE. [Online]. [Consultado el 20 de Mayo de 2021]. Disponible en: https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2019/02/MeasurLink_9.pdf.
25. InfinityQS. Características del control estadístico de procesos (SPC). [Online]. [Consultado el 21 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.infinityqs.lat/statistical-process-control/spc-features#spc-flexibility>.
26. HEXAGON. Q-DAS. [Online]. [Consultado el 24 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.q-das.com/en/company/30-years-of-q-das>.
27. HEXAGON Q-DAS. Q-DAS O-QIS: Visualización en tiempo real. [Online]. [Consultado el 24 de Mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.q-das.com/en/products/software/q-das-o-qis-real-time-visualisation>.
28. HEXAGON. Catalogo TESA. [Online]. [Consultado el 4 de Junio de 2021]. Disponible en: <https://tesatechnology.com/es-es/productos/pieds-a-coulisse/pieds-a-coulisse-universels/modelos-universales-digitales-p42782.htm>.



29. Mahr. Catálogo pie de rey. [Online]. [Consultado el 4 de Junio de 2021]. Disponible en: <https://www.mahr.de/es/Services/Production-metrology/Products/Precision-gages/MarCal--Calipers/MarCal--Digital-calipers/MarCal-16-ER--16-EWR--16-EWRi--Digital-Caliper/MarCal-16-EWRi--Digital-Caliper-IP-67--Integrated-wireless/>.
30. UNE. NORMA UNE-EN ISO 14253. Especificación geométrica de productos (GPS). Inspección mediante medición de piezas y equipos de medida; 2019.