



**Universidad**  
Zaragoza

1542

## Trabajo Fin de Máster

# Simulación del comportamiento de técnicas de calidad industrial mediante Montecarlo con GNU Octave

Autor

Daniel Molina Galilea

Director

Juan José Aguilar Martín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2013/2014

## Simulación del comportamiento de técnicas de calidad industrial mediante Montecarlo con GNU Octave

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto el estudio, simulación y análisis del comportamiento de técnicas de calidad industrial en tres casos diferentes aplicando el método estadístico Montecarlo con la ayuda del programa informático de cálculo numérico Octave en su versión 3.8.2.

Se realiza una introducción en la que se comenta brevemente los tres casos que se plantean, se presenta el método Montecarlo, y se comentan los distintos programas que podrían utilizarse para realizar los cálculos y simulaciones requeridas para los distintos casos, haciendo especial hincapié en el software finalmente utilizado, Octave 3.8.

En el siguiente apartado se muestran las diferencias entre las primeras versiones de Octave, donde el entorno de trabajo únicamente era línea de comandos, y las últimas versiones, donde se ha añadido un entorno gráfico que por el momento está en periodo de experimentación.

En los próximos apartados se exponen los siguientes casos:

- Caso A: Creación de un código ejecutable en Octave con el que se calculará la incertidumbre de planitud de una superficie realizando una única medición real.  
Se realiza un código con el que es posible determinar la incertidumbre total de una medición conociendo únicamente la incertidumbre de la máquina de medir por coordenadas y los valores de una única medición de planitud de una superficie.  
Se muestran los resultados para una medición, y se analiza el efecto al variar la incertidumbre de la máquina de medir por coordenadas.
- Caso B: Creación de un código ejecutable en Octave con el cual se pueda determinar la tasa de acierto en la toma de decisiones de validación o rechazo de una característica, teniendo en cuenta la capacidad del proceso, la incertidumbre de la medición y el porcentaje de desviación de la tolerancia de la característica medida respecto a su nominal.  
Se realiza un código que da como resultado la relación entre las propiedades comentadas anteriormente. El análisis de este resultado ayudará en la toma de decisión de la relación incertidumbre/tolerancia, dependiendo de la capacidad del proceso y de si está más o menos centrado en rango de tolerancia.
- Caso C: Estudio de la fiabilidad de un sistema. Para el sistema de amarre de un torno se estudia, con ayuda de un código implementado en Octave, la fiabilidad del sistema para un modo de fallo específico. Se tiene en cuenta la distribución de los componentes en el sistema para crear la función de probabilidad de fallo total del sistema.

Se adjuntan los siguientes anexos: Manual de uso rápido de GNU Octave, instrucciones y notación, donde se muestran las principales instrucciones para poder desarrollar un código en Octave; método de Montecarlo, que contiene una explicación detallada del método usado; Anexo III: Extracto de RD 2177/2004 – BOE nº 274, que recoge la normativa de seguridad que se comenta en el caso C; y también los códigos completos usados para los tres casos estudiados.

## 1. Índice

RESUMEN .....	1
1. Índice .....	2
2. Introducción .....	3
3. Línea de comandos frente a interfaz gráfica .....	6
4. Caso A: Herramienta de cálculo de incertidumbres en la planitud de una superficie .....	8
4.1. Introducción al problema .....	8
4.2. Desarrollo .....	8
4.3. Análisis de resultados .....	9
5. Caso B: Herramienta de cálculo del acierto en la toma de decisiones .....	12
5.1. Introducción al problema .....	12
5.2. Desarrollo .....	13
5.3. Análisis de resultados .....	14
6. Caso C: Cálculo de la fiabilidad de un sistema de seguridad .....	16
6.1. Introducción al problema .....	16
6.1. Desarrollo .....	18
6.2. Análisis de resultados .....	20
7. Conclusiones .....	24
8. Índice de Figuras .....	25
9. Índice de Tablas .....	25
10. Glosario de términos .....	26
11. Bibliografía .....	27
Anexos .....	28
Anexo I: Manual de uso rápido de GNU Octave. Instrucciones y notación .....	29
Anexo II: Método de Montecarlo .....	37
Anexo III: Extracto de RD 2177/2004 – BOE nº 274 .....	43
Anexo IV: Códigos Octave casos A, B y C .....	59

## 2. Introducción

El presente trabajo fin de máster se desarrolla dentro del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, correspondiendo a la finalización del Máster Universitario de Sistemas Mecánicos de la Universidad de Zaragoza.

El proyecto tiene como objetivo el estudio, simulación y análisis del comportamiento de técnicas de calidad industrial en tres casos diferentes aplicando un método estadístico con la ayuda de un programa informático de cálculo numérico.

En el primer caso, se desarrolla una herramienta virtual que va a ayudar a calcular la planitud de una superficie. Para ello es necesaria la presentación de los siguientes conceptos:

- Metrología, la cual se basa en la medición de distintas magnitudes garantizando su normalización mediante la trazabilidad.
- Tolerancia, que es el intervalo de valores en el que debe encontrarse una magnitud significativa y cuantificable (como dimensiones, resistencia, peso...) para que sea aceptado como válida o rechazada cualquier característica de un producto.
- MMC (máquina de medición por coordenadas): son instrumentos que realizan mediciones dimensionales y de desviaciones de la regularidad geométrica, mediante el uso de un palpador que determina las coordenadas del punto a verificar.
- Incertidumbre [1] que se define como la dispersión de los valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando.

En el segundo caso, se procede a calcular la tasa de acierto cuando una medición está cerca del límite de tolerancia.

Además de los conceptos comentados en el anterior punto, se deben presentar también:

- Capacidad de procesos, es decir, la aptitud del proceso (o de una sola máquina) para cumplir con los límites de tolerancia especificados.
- Relación incertidumbre-tolerancia.

En cuanto al último caso, se lleva a cabo un análisis para comprobar la fiabilidad de un sistema, teniendo en cuenta la posibilidad de fallo de cada componente por separado.

De este modo, se debe realizar una observación sobre:

Seguridad del sistema de mando [2]: es una asociación de elementos que responde a unas señales de entrada, generando unas señales de salida que dan lugar a que el equipo de trabajo bajo control funcione de una manera determinada.

Por tanto, es primordial que tenga un diseño seguro para garantizar la seguridad del funcionamiento.

La fiabilidad del sistema es la probabilidad de que el sistema funcione o desarrolle una cierta función, bajo las condiciones fijadas y durante un periodo de tiempo determinado.

Se analiza la fiabilidad del sistema teniendo en cuenta que las relaciones entre los componentes puede ser en serie, es decir, el funcionamiento de cada componente está directamente relacionado

con el funcionamiento del componente antecesor y predecesor (si uno falla, falla todo el sistema); o en paralelo, en los que se precisa, al menos, el funcionamiento de un componente para que el sistema funcione (donde los componentes son redundantes).

Para la resolución de los casos mencionados anteriormente se ha hecho uso del Método de Montecarlo (o Monte Carlo) [3] que es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.

Su aplicación es de gran uso en la resolución de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, y que además dependen de factores aleatorios o pueden ser asociados a un modelo de probabilística artificial.

La clave de la simulación Montecarlo [4] radica en crear un modelo matemático del sistema, proceso o sistema que se quiere analizar, identificando las variables cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema.

Posteriormente, se procede a generar muestras aleatorias y a analizar cómo afecta al sistema esos valores que han sido generados a través del muestreo.

De esta forma, tras repetir la operación en repetidas ocasiones, se consigue obtener observaciones que ayudan a entender el comportamiento del sistema.

En cuanto a los programas de cálculo numérico y programación se han estudiado las distintas alternativas que hay disponibles, siendo finalmente elegido Octave.

Seguidamente se describen con brevedad cada una de ellos:

- Matlab [5] es un lenguaje de programación propio de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación.  
Permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones.  
Entre sus inconvenientes [6] destacan la lentitud del mismo al tratarse de un lenguaje interpretado, y su elevado coste.
- Scilab [7] es un software libre para cálculo numérico con lenguaje de programación (lenguaje interpretado).  
Entre sus funcionalidades se incluyen control, simulación, optimización... aunque el alcance de Scilab es algo más limitado que el de Matlab.
- Rlab [8] es otro de los programas de cálculo numérico que existen en el mercado y fue diseñado para proporcionar prototipos rápidos, facilitar la visualización de datos y el procesamiento de los mismos.
- Maple [9] es un lenguaje de programación interpretado que resuelve sistemas de ecuaciones mediante cálculos numéricos e iteraciones, realiza operaciones con matrices, programación de algoritmos...  
Al igual que Matlab tampoco es un software libre.
- Octave [10], al igual que los anteriores es un software de cálculo numérico con lenguaje de programación propio.  
Proporciona una consola para resolver problemas lineales y no lineales y desarrollar experimentos numéricos. Puede ser modificado libremente [11].

El programa elegido ha sido Octave debido a que no tiene coste de adquisición frente al elevado desembolso monetario que hay que realizar en el caso de los software propietario (como Matlab), otra de sus ventajas es que todo el mundo puede acceder a su aprendizaje y modificación y además hay que destacar su eficiencia puesto que los usuarios tienden a mejorarlo y optimizarlo.

GNU Octave [12] fue creado en el año 1988 para otro fin diferente al actual, diseño de reactores químicos, pero su gran desarrollo surgió cuatro años más tarde gracias a John W. Eaton.

La primera versión nació en el año 1993.

Como ya se ha indicado, es un programa de cálculo numérico con un lenguaje de programación de alto nivel (C++) que está pensando fundamentalmente para trabajar con matrices, y se comporta como una consola de comandos.

Es un software libre y cualquier usuario puede modificarlo y redistribuirlo, acogiéndose a los términos indicados en la GPL (Licencia Pública General).

Es considerado como el equivalente libre de Matlab y es compatible con muchas de sus funciones de extensión .m.

Se trabaja mediante línea de comandos para resolver tanto problemas lineales como no lineales, además de facilitar la resolución de complejos problemas numéricos como integrar ecuaciones diferenciales ordinarias, polinomios, etc.

Además, incorpora otras aplicaciones (GNU plot) que da la posibilidad de imprimir y/o guardar los gráficos.

Permite trabajar en sistemas operativos Unix y Windows.

La última versión es Octave 3.8.1 [13], actualizada en Marzo de 2.014, incorpora una nueva interfaz gráfica (GUI) mientras que hasta el momento sólo se podía trabajar con línea de comandos. También está disponible la versión 3.8.2, aunque de manera no oficial [14].

Existen otros proyectos relacionados con Octave como:

- Octave UPM [14] que es una versión personalizada para la Universidad Politécnica de Madrid.
- QtOctave que es la interfaz gráfica externa más completa disponible para el software, hasta el momento del lanzamiento de Octave 3.
- XOctave [15] es un importante software que está destinado a liberar el poder de GNU Octave mediante la creación de un programa informático dentro del ámbito científico y que se constituye como una alternativa muy económica para los usuarios de Matlab.

Entre sus características destacan: la edición de secuencia de comandos, variables...además de poder utilizarse en múltiples idiomas y de ser personalizable mediante *plug-ins* para Windows, Linux y Max OSX.

### 3. Línea de comandos frente a interfaz gráfica

Como se ha comentado en el apartado anterior, desde el momento de su creación y hasta la última versión publicada de Octave (las nuevas 3.8.x) el entorno de trabajo en Octave era línea de comandos.

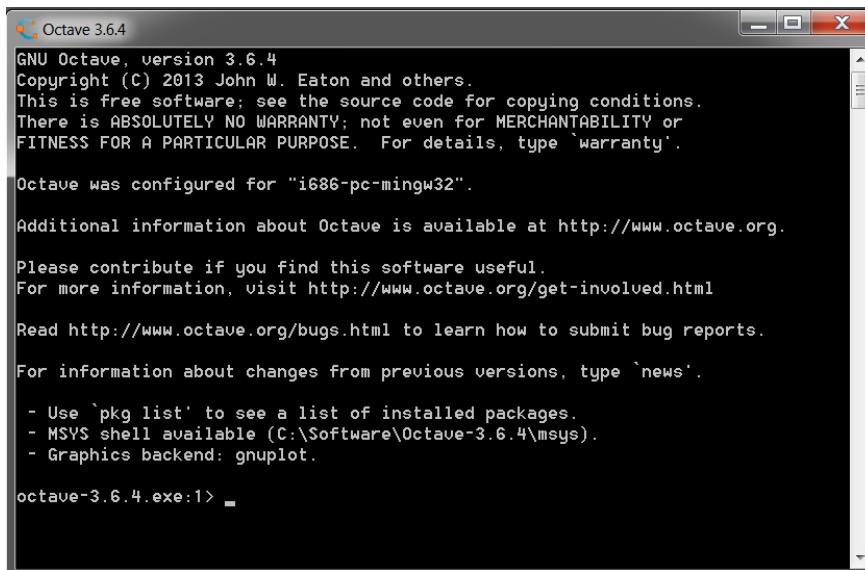
En las versiones 3.8.0 y 3.8.1 el entorno de trabajo por defecto es también línea de comandos, pero es posible acceder al entorno gráfico en pruebas con el parámetro --force-gui.

La versión 3.8.2 arranca por defecto con el entorno gráfico, aunque durante su instalación también se crea un acceso directo con el que se puede lanzar el programa en línea de comandos.

El entorno gráfico de la versión 3.8.2 sigue estando en modo de prueba, ya que el lanzamiento definitivo de Octave con entorno gráfico será en la versión 4.0.

La estabilidad, la facilidad y sencillez de navegación por los menús y que se puedan configurar los textos en español confirma la posibilidad de ser usado aún sin ser definitivo.

La línea de comandos característica de una de las versiones anteriores, por ejemplo de la 3.6.4, tiene la apariencia que se muestra en la figura 1.

A screenshot of a Windows command-line window titled "Octave 3.6.4". The window displays the following text:

```
GNU Octave, version 3.6.4
Copyright (C) 2013 John W. Eaton and others.
This is free software; see the source code for copying conditions.
There is ABSOLUTELY NO WARRANTY; not even for MERCHANTABILITY or
FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. For details, type 'warranty'.

Octave was configured for "i686-pc-mingw32".

Additional information about Octave is available at http://www.octave.org.

Please contribute if you find this software useful.
For more information, visit http://www.octave.org/get-involved.html

Read http://www.octave.org/bugs.html to learn how to submit bug reports.

For information about changes from previous versions, type 'news'.

- Use 'pkg list' to see a list of installed packages.
- MSYS shell available (C:\Software\Octave-3.6.4\msys).
- Graphics backend: gnuplot.

octave-3.6.4.exe:1>
```

Figura 1: Ventana de línea de comandos de Octave 3.6.1

En las versiones 3.8.x, la interfaz ofrece un explorador de archivos, un visor del espacio de trabajo que nos muestra todas las variables definidas, un historial de comandos, un editor de guiones y documentación en línea fácilmente accesible.

En la figura 2 se puede observar el entorno que aparece por defecto al ejecutar Octave 3.8.2 en Windows.

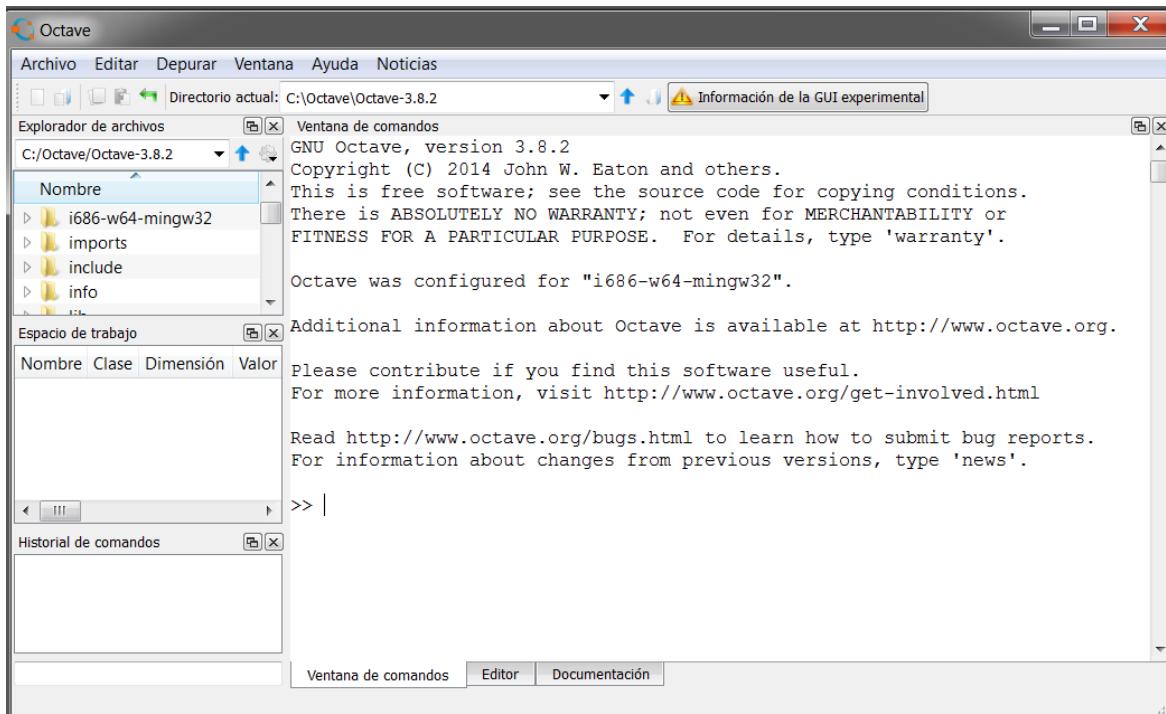


Figura 2: Entorno gráfico de Octave 3.8.2

La interfaz gráfica de Octave ofrece algunas opciones útiles. Por ejemplo, como se ve en la figura 3, con un clic derecho sobre una variable en el visor del espacio de trabajo se pueden realizar acciones rápidas como crear un gráfico de los datos en la misma o mostrar los valores de la variable en la ventana de comandos para, por ejemplo, poder tomarlos y copiarlos a un documento Excel (las opciones dependen del tipo de variable).

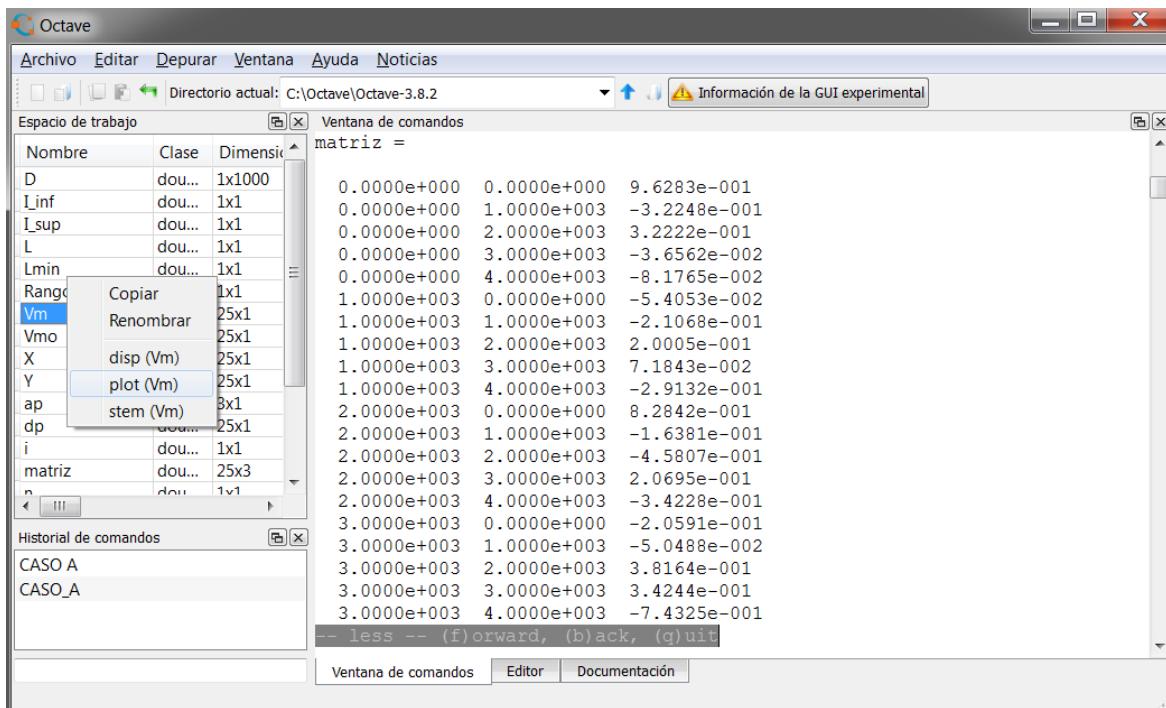


Figura 3: Opciones sobre variables en interfaz gráfica de Octave 3.8.2

## 4. Caso A: Herramienta de cálculo de incertidumbres en la planitud de una superficie

### 4.1. Introducción al problema

El caso A consiste en la creación de un código ejecutable en Octave con el que se calculará la incertidumbre de planitud de una superficie realizando una única medición real. Será preciso conocer la incertidumbre de la MMC con la que se va a realizar la medición.

Si se realiza una única medición de cada punto para determinar la tolerancia de planitud que cumple una superficie se está cometiendo un error que está relacionado con la incertidumbre de medición característica de la MMC con la que se realice la medición. Para cuantificar este error habría que realizar un número alto de ensayos.

Con este programa se realizan todos los ensayos adicionales de forma virtual.

El planteamiento es el siguiente:

Se realiza una medición de la superficie, en la que se toman los valores de desviación en altura de los puntos medidos distribuidos en forma de malla sobre la superficie, se realizan n experimentos virtuales en los que a esa medición se le aplica un ruido dependiente de la incertidumbre de la MMC. Al tener los valores máximos y mínimos de las mediciones virtuales de los n experimentos, se puede determinar el máximo y mínimo de incertidumbre que se daría en la medición de planitud de la superficie.

### 4.2. Desarrollo

Para la creación del código se toma como punto de partida los datos de entrada de los que se van a disponer, que son la medición real, y la incertidumbre de la MMC.

El código consiste en la realización de n experimentos. En cada experimento se le aplicará a la medición real de cada punto un ruido relacionado con la incertidumbre de la MMC. Éste nuevo valor simulará la desviación del valor real (que se toma como nominal).

En cada experimento, para la malla de puntos generados, se calcula por mínimos cuadrados el plano que mejor se ajusta a esa nube de puntos. Después de haber generado el plano de mejor ajuste se busca el punto que está más alejado de él, y se registra la distancia entre ese punto y el plano creado.

Una vez realizados todos los experimentos se determina el límite inferior y el límite superior de tolerancias, y con eso la incertidumbre de planitud resultante. Para la obtención de resultados se define un intervalo de cobertura del 95%.

El código completo correspondiente a este caso se puede consultar en el anexo IV.

Se realizan varios cálculos con el programa creado, en los que se toma la misma medición real para los distintos cálculos, y sólo varía la incertidumbre de la máquina de medir por coordenadas.

El objetivo de este estudio es poder analizar la influencia de la incertidumbre del aparato de medida en la obtención del valor de la incertidumbre de medición de la planitud de una superficie.

Se realizan 1.000.000 experimentos para cada cálculo. La malla de puntos de medición es de 25 puntos (5x5), y la distancia entre puntos es de 1mm.

Los valores de la medición real ( $\mu\text{m}$ ) son los siguientes:

0.4	0.2	0.1	0.1	-0.1
-0.2	-0.1	0.1	0.2	-0.4
0.4	-0.3	-0.2	0.1	-0.4
-0.2	-0.1	0.3	0.2	-0.4
-0.3	0.1	0.2	0.1	-0.1

Se realizan cálculos con los siguientes valores de incertidumbre:

0.05 $\mu\text{m}$   
0.15 $\mu\text{m}$   
0.25 $\mu\text{m}$   
0.35 $\mu\text{m}$

### 4.3. Análisis de resultados

En la tabla 1 se muestran los valores resultantes de las distintas simulaciones para los múltiples valores de incertidumbre estudiados.

Incertidumbre MMC ( $\mu\text{m}$ )	I_inf	I_sup	Incertidumbre planitud	L
0,05	0,33688	0,46869	0,13181	0,23862
0,15	0,34779	0,68514	0,33735	0,63291
0,25	0,40086	0,91973	0,51887	1,1034
0,35	0,47351	1,1664	0,69289	1,5516

Tabla 1: Resultados simulaciones

En las figuras 4-7 se muestran las distribuciones de los valores de planitud para las distintas simulaciones:

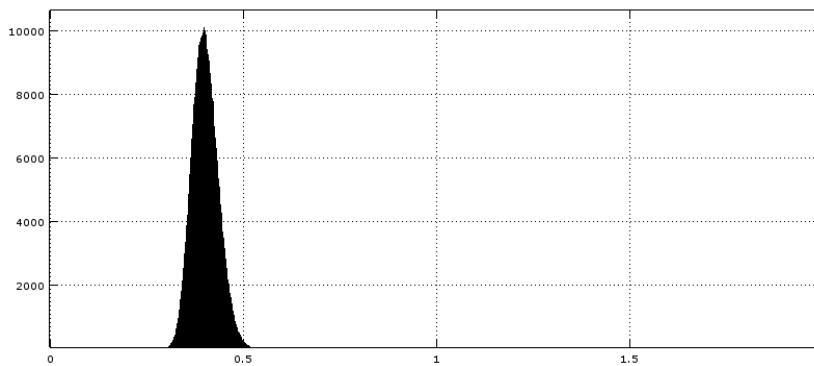


Figura 4: Histograma planitud para incertidumbre  $0.05\mu\text{m}$

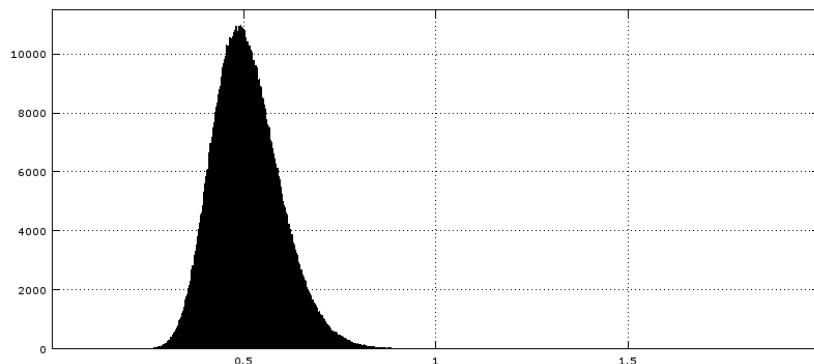


Figura 5: Histograma planitud para incertidumbre  $0.15\mu\text{m}$

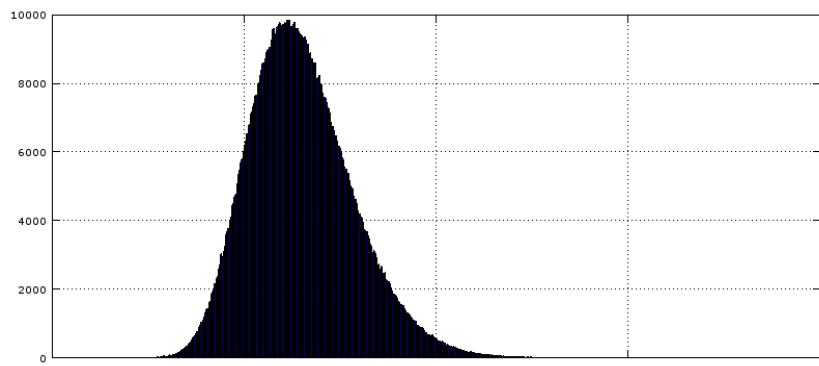


Figura 6: Histograma planitud para incertidumbre  $0.25\mu\text{m}$

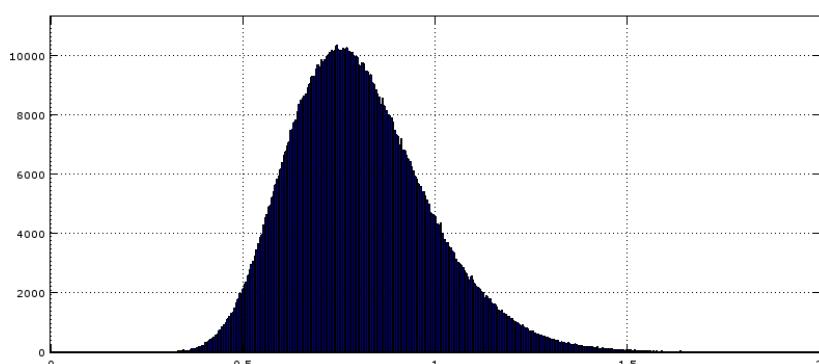


Figura 7: Histograma planitud para incertidumbre  $0.35\mu\text{m}$

Los resultados del estudio se representan gráficamente en la figura 8. La línea azul representa el valor calculado de rango de tolerancia, las líneas rojas representan los límites superior e inferior del intervalo de cobertura, y la línea verde el valor del defecto de planitud real.

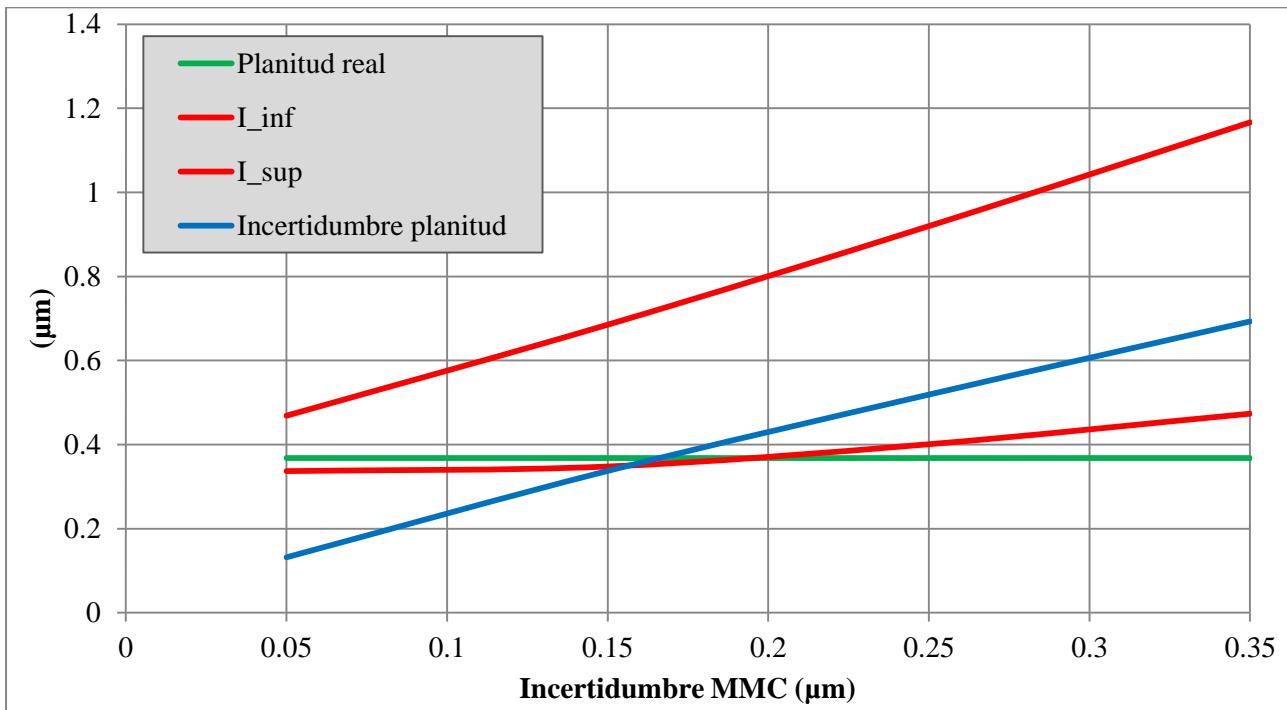


Figura 8: Gráfica resultados simulaciones planitud

Se observa que, para una incertidumbre de la MMC baja, la resultante de incertidumbre de planitud es insignificante. Si se extrapolasen los valores  $I_{\text{inf}}$  e  $I_{\text{sup}}$  llegarían a converger en el eje 0, lo que hace evidente que la MMC, con incertidumbre de medición 0 estaría dando el valor real de planitud de la superficie medida.

Para valores de incertidumbre de MMC a partir de  $0.2\mu\text{m}$ , el intervalo de cobertura ni tan siquiera incluye al valor verdadero de planitud.

## 5. Caso B: Herramienta de cálculo del acierto en la toma de decisiones

### 5.1. Introducción al problema

El caso B consiste en la creación de un código ejecutable en Octave con el cual se pueda determinar la tasa de acierto en la toma de decisiones de validación o rechazo de una característica, teniendo en cuenta la capacidad del proceso, la incertidumbre de la medición y el porcentaje de desviación de la tolerancia de la característica medida respecto a su nominal.

La relación incertidumbre/tolerancia ha de ser considerada cada vez que se realice una medición ya que puede afectar negativamente al resultado de la medición y también a su coste. Se debe relacionar el proceso de medición correcto para cada tarea, para evitar riesgos en la realización de las mediciones intentando invertir la menor cantidad de tiempo y dinero, y evitar aplicar altos niveles de exactitud que podrían ser innecesarios.

La relación entre la incertidumbre y la tolerancia total (diferencia entre los límites máximo y mínimo) se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{2 \times I}{T} = \frac{\pm 3\sigma_M}{(\text{máximo} - \text{mínimo})} = \frac{6\sigma_M}{\text{Tolerancia total}}$$

donde  $\sigma_M$  es la desviación típica de la distribución de la medición.

Normalmente se utiliza la ‘regla del décimo’ para la relación  $2I/T$ , es decir, igual al diez por ciento de la tolerancia total. En este estudio se determinarán las tasas de acierto para los valores de la relación  $2I/T$  de  $1/10$ ,  $3/10$  y  $5/10$ .

La figura 9 muestra tres procesos de medición. Las líneas verticales indican la tolerancia y las curvas representan el efecto del proceso de medición. La muestra #1 está completamente inscrita en la zona de tolerancia, por lo que tiene una probabilidad prácticamente nula de ser rechazada. La muestra #2 está próxima al límite inferior de tolerancia. Esta muestra tiene una pequeña probabilidad de ser rechazada, esto es, el área sombreada bajo la curva. La muestra #3 está por fuera y alejada de los límites, y tiene una probabilidad prácticamente total de ser rechazada.

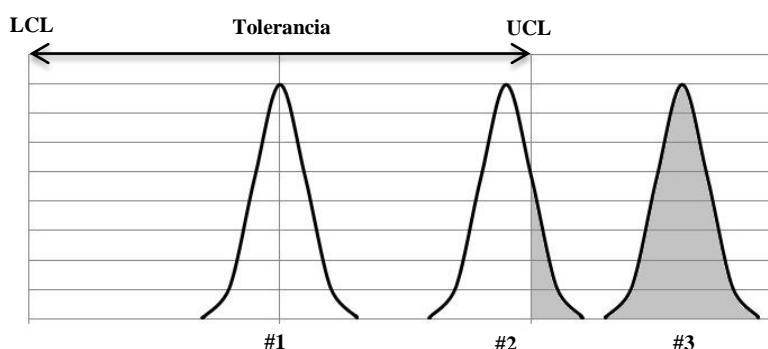


Figura 9: Medición de tres elementos con el mismo proceso de medición

El objetivo del presente estudio es obtener las tasas de acierto para los distintos índices de capacidad propuestos y las relaciones 2I/T indicadas, para el rango de tolerancia de -100% a 100%.

El planteamiento es el siguiente:

Para cada índice de capacidad y relación 2I/T definida, se realizan  $n$  simulaciones del proceso y  $n$  simulaciones de la medición. Para cada conjunto proceso/medición se realizará una comprobación de si el valor real del proceso y el valor de la medición están o no dentro o fuera de la zona de tolerancia. Haciendo un barrido situando la media del proceso en toda la zona de tolerancia se podrán obtener los datos suficientes para poder crear la curva de porcentaje de acierto buscada.

## 5.2. Desarrollo

Se precisa crear un código que dé como resultado para cada experimento un verdadero o falso a la condición de acierto de la decisión, es decir, a cada valor de proceso hay que sumarle el valor de la desviación por la incertidumbre de la medición y comprobar si el resultado se mantiene en la zona de tolerancia del valor del proceso.

Tenemos cuatro posibles estados:

Proceso=cumple; Proceso + desviación medición=cumple → Acierto

Proceso=cumple; Proceso + desviación medición=no cumple → Error

Proceso=no cumple; Proceso + desviación medición=cumple → Error

Proceso= no cumple; Proceso + desviación medición= no cumple → Acierto

El código realiza  $n$  experimentos del proceso, con la desviación típica relacionada con la capacidad del proceso ( $\text{sigmap} = T/(6*C_p)$ ), y  $n$  mediciones, con la desviación típica relacionada con la relación incertidumbre tolerancia 2I/T ( $\text{sigmam} = (R_{it} * T/6)$ ).

Se realizan 21 barridos para cubrir el rango de -100% a 100% con una resolución de 10%.

En cada barrido se comprueba si cada conjunto proceso/medición cumple según los estados descritos anteriormente. El porcentaje de acierto resultante por cada barrido es registrado en un vector de 21 posiciones, resultado que se usará para crear la gráfica buscada.

El código completo correspondiente a este caso está disponible para su consulta en el anexo IV.

Se realizan 1.000.000 experimentos para cada cálculo, con los que se generan ese número de procesos y de mediciones. Esos datos son utilizados 21 veces por cada cálculo para cubrir todo el rango a estudiar, se realizan un total de 9 cálculos para todas las combinaciones posibles de los siguientes valores de capacidad de proceso y relación incertidumbre tolerancia 2I/T:

Cp:	1	4/3	5/3
2I/T:	1/10	2/10	5/10

### 5.3. Análisis de resultados

En la tabla 2 se muestran los resultados de las distintas simulaciones:

CP 1	2I/T			CP 4/3	2I/T			CP 5/3	2I/T		
Tolerancia (%)	1/10	3/10	5/10	Tolerancia (%)	1/10	3/10	5/10	Tolerancia (%)	1/10	3/10	5/10
-100	99,966	99,872	99,675	-100	99,998	99,99	99,958	-100	100	100	99,993
-90	99,816	99,38	98,743	-90	99,974	99,88	99,631	-90	99,998	99,985	99,891
-80	99,371	97,985	96,34	-80	99,755	99,112	97,986	-80	99,934	99,687	98,955
-70	98,474	95,292	92,088	-70	98,821	96,198	93,092	-70	99,264	97,361	94,506
-60	97,343	92,19	87,404	-60	96,938	90,926	85,404	-60	96,74	90,434	84,395
-50	96,813	90,743	85,259	-50	95,74	87,929	81,28	-50	94,717	85,266	77,888
-40	97,342	92,196	87,346	-40	96,925	90,922	85,459	-40	96,778	90,377	84,398
-30	98,454	95,273	92,049	-30	98,812	96,187	93,115	-30	99,258	97,362	94,501
-20	99,352	97,951	96,349	-20	99,753	99,111	97,999	-20	99,936	99,697	98,979
-10	99,81	99,353	98,699	-10	99,974	99,878	99,633	-10	99,998	99,984	99,896
0	99,93	99,739	99,349	0	99,997	99,98	99,917	0	100	99,999	99,988
10	99,81	99,359	98,679	10	99,974	99,879	99,628	10	99,998	99,985	99,891
20	99,37	97,984	96,333	20	99,755	99,112	97,986	20	99,934	99,687	98,955
30	98,474	95,292	92,087	30	98,821	96,198	93,092	30	99,264	97,361	94,506
40	97,343	92,19	87,404	40	96,938	90,926	85,404	40	96,74	90,434	84,395
50	96,813	90,743	85,259	50	95,74	87,929	81,28	50	94,717	85,266	77,888
60	97,342	92,196	87,346	60	96,925	90,922	85,459	60	96,778	90,377	84,398
70	98,454	95,274	92,05	70	98,812	96,187	93,115	70	99,258	97,362	94,501
80	99,352	97,953	96,357	80	99,753	99,111	97,999	80	99,936	99,697	98,979
90	99,815	99,376	98,756	90	99,974	99,879	99,637	90	99,998	99,984	99,896
100	99,964	99,867	99,674	100	99,999	99,99	99,959	100	100	100	99,995

Tabla 2: Resultados para Cp 1, Cp4/3 y Cp 5/3

Con los resultados anteriores se generan las gráficas mostradas en las figuras 10,11 y12.

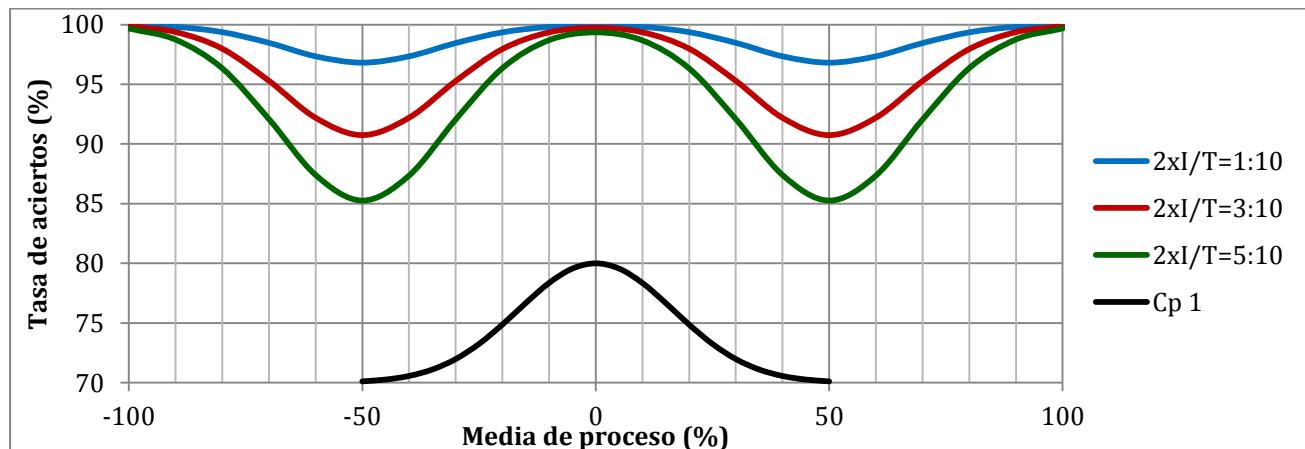


Figura 10: Gráfica tasa de aciertos para Cp 1

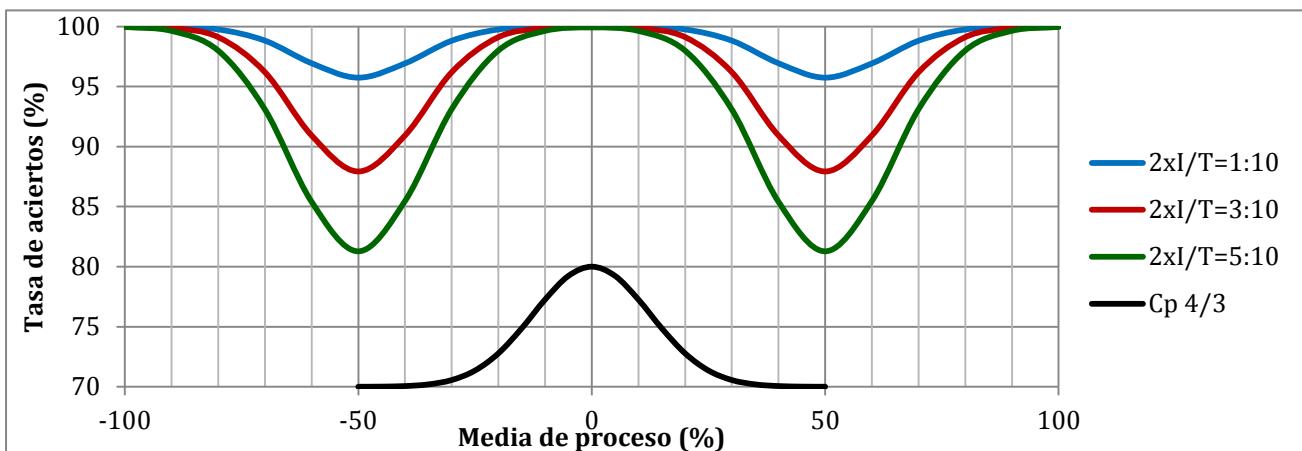


Figura 11: Gráfica tasa de aciertos para Cp 4/3

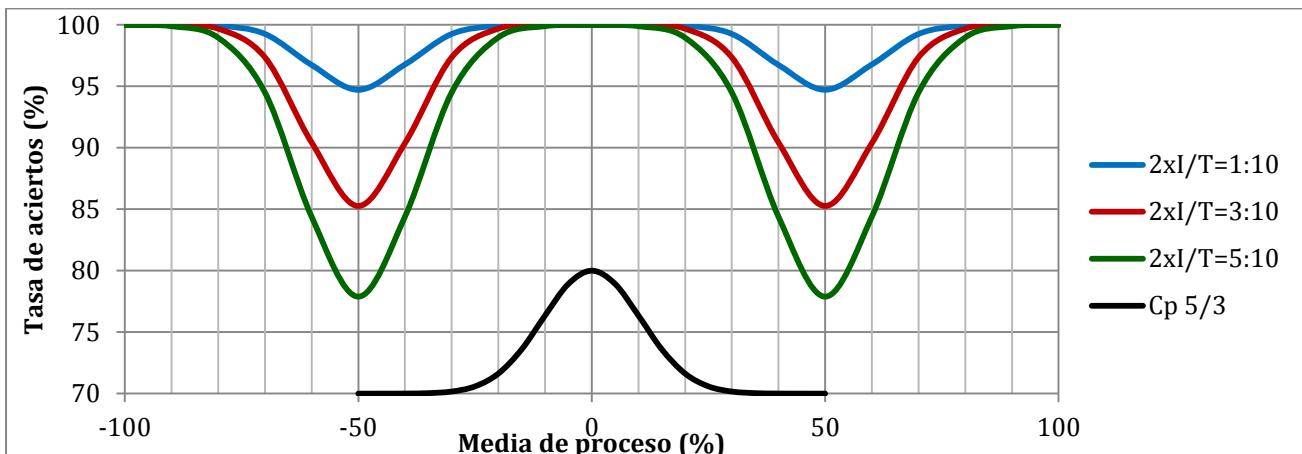


Figura 12: Gráfica tasa de aciertos para Cp 5/3

Las unidades del eje horizontal representan igual porcentaje de tolerancia respecto al centro, con 0, +50 y -50 indicando el centro, el límite superior de tolerancia y el límite inferior de tolerancia respectivamente. En el eje vertical se indica el porcentaje de decisiones correctas. La capacidad del proceso de fabricación se representa con la curva centrada inferior.

Cuando el proceso de fabricación está centrado, sólo una pequeña parte caerá cerca de los límites de tolerancia. La tasa de acierto es mayor al 98.5% para las tres relaciones de 2I/T en los tres casos de capacidad. Cuanto mayor sea la capacidad del proceso mayor será la zona en la que la tasa de acierto es muy alta. Por ejemplo, con una relación 2I/T=5/10 a un porcentaje de desviación del centro de la tolerancia de 20% la tasa de acierto cambia de Cp1→96 a Cp5/3→99.

Cuando la distribución del producto se desplaza hacia uno de los dos límites de tolerancia, la diferencia entre las relaciones 2I/T seleccionadas se vuelve más pronunciada. Estas diferencias alcanzan un máximo cuando la distribución está posicionada en uno de los límites de tolerancia y gradualmente disminuye de nuevo cuando la distribución se mueve más allá de estos puntos. Cuanto mayor es la capacidad del proceso menor es la tasa de acierto en las zonas próximas a los límites de tolerancia. Por ejemplo, con una relación 2I/T=5/10 a un porcentaje de desviación del centro de la tolerancia de 50% la tasa de acierto cambia de Cp1→85 a Cp5/3→78.

## 6. Caso C: Cálculo de la fiabilidad de un sistema de seguridad

### 6.1. Introducción al problema

El caso C consiste en la realización del estudio de la fiabilidad de un sistema. Se realiza el estudio de un modo de fallo en el sistema de amarre de un torno.

Para ello se va a crear un código ejecutable en Octave en el que se podrá determinar la probabilidad media de fallo por hora del sistema a partir de las probabilidades medias de fallo por hora de los componentes por separado.

El documento “guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos de trabajo” contiene la definición de los niveles y categorías de las partes de los sistemas de mandos relativas a la seguridad.

Un extracto del apéndice H del documento anteriormente nombrado queda incluido en el anexo IV.

En cuanto a los niveles de prestaciones [16], se definen como nivel discreto utilizado para especificar la aptitud de las SRP/CS para desempeñar una función de seguridad en condiciones previsibles [17], siendo SRP/CS las piezas relacionadas con la seguridad en los sistemas de control.

Los distintos niveles de prestaciones (PL) son mostrados en la tabla 3.

PL	Probabilidad media de fallo peligroso por hora (PFH) 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ a $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ a $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ a $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ a $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ a $< 10^{-7}$

Tabla 3: Niveles de prestaciones (PL)

La PFH es, en realidad, un término de tasa media de fallos peligrosos de la función de seguridad y se puede interpretar como el número medio de demandas no atendidas de la función de seguridad por hora.

En esta norma se considera que el nivel de prestaciones de una SRP/CS depende de una serie de aspectos que, desde el punto de vista de la evaluación, se pueden agrupar en:

a) aspectos cuantificables (la estructura, el tiempo medio hasta un fallo peligroso MTTF<sub>d</sub> de los componentes, la cobertura de los diagnósticos DC, la resistencia a fallos de causa común CCF...), y

b) aspectos cualitativos no cuantificables (el comportamiento de la función de seguridad en condiciones de defecto, el software relativo a la seguridad, la gestión del proyecto, la documentación, la revisión del diseño y los ensayos, la resistencia a las condiciones ambientales...)

En este caso se va a estimar un PFH para cada uno de los componentes al no disponer de datos reales, por lo que el resultado no será veraz. Pero el método y el código pueden servir como base para otros estudios de lo que si se disponga la información suficiente.

Se realiza el estudio de un modo de fallo de un sistema expuesto en el apéndice incluido en el anexo IV, y que se muestra en la figura 13.

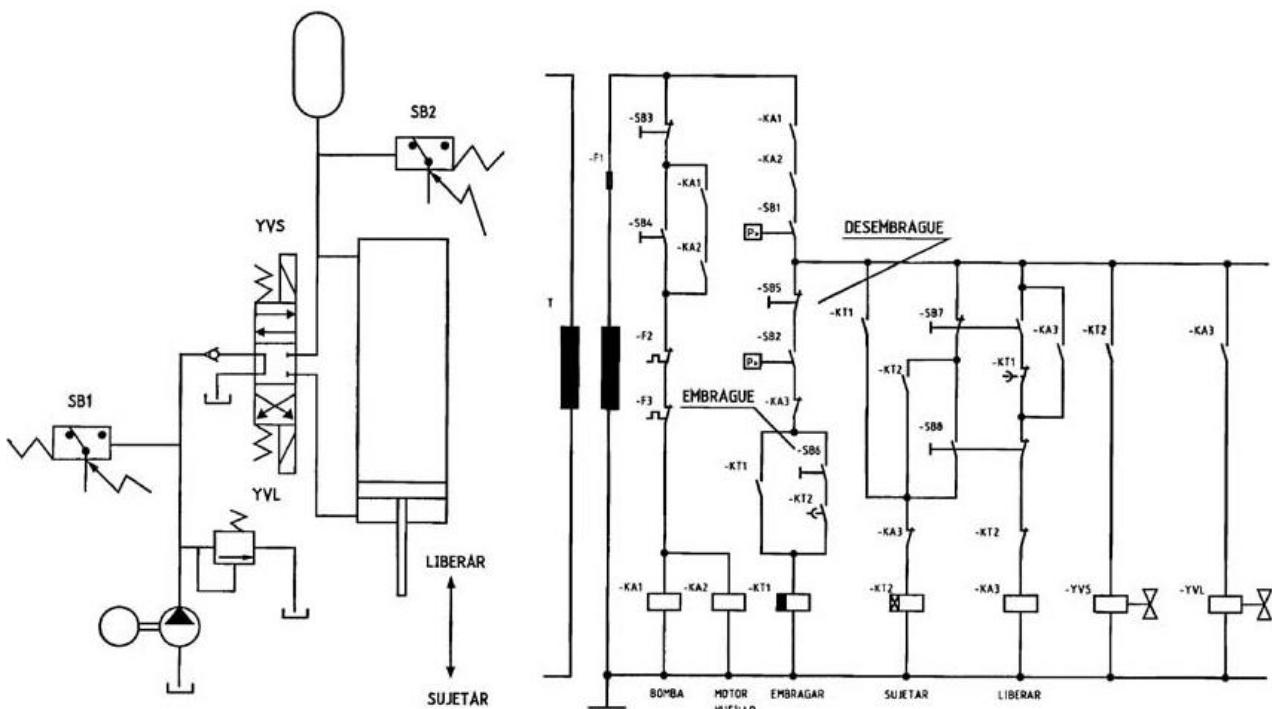


Figura 13: Esquema circuito de potencia, mando hidráulico y mando eléctrico de un torno

El fallo a estudiar es que el sistema, por el fallo de uno de sus componentes o de la suma de varios, pierda la fuerza de apriete del sistema de amarre y la pieza montada sea liberada.

El objetivo del estudio es poder categorizar el sistema en PL para el modo de fallo analizado.

Para ello, se plantea el estudio de la siguiente forma:

Se define el árbol de fallos del modo de fallo especificado, se desarrolla el árbol con el fin de crear la función de fallo a implementar en programa, se estiman las probabilidades medias de fallo por cada componente, se crean n experimentos donde se calcula el PFH de cada componente y, con la ayuda de la función de fallo, el PFH total.

## 6.1. Desarrollo

Los componentes vinculados al amarre de la pieza serían:

- Circuito de potencia: Motobomba, válvula de seguridad, acumulador, cilindro, válvula YV, bobina YVL, presostato SB1.
- Circuito de mando: Pulsadores SB5 y SB6.

El sistema liberará la pieza si:

- La motobomba falla y no da presión suficiente o se para.
- La válvula de seguridad falla y se abre.
- La válvula de seguridad está desajustada y no hay presión suficiente.
- El acumulador falla y pierde presión.
- El pulsador SB5 y el SB6 fallan, y dan señal de abrir la válvula YV.
- El cilindro falla y pierde presión.
- La bobina YVL falla y acciona la válvula YV.
- Ante una sobrepresión el presostato SB1 no detiene la motobomba y la válvula de seguridad falla. La sobrepresión revienta el circuito.
- Ante una sobrepresión el presostato SB1 no detiene la motobomba, la válvula de seguridad está desajustada y no abre a la presión determinada. La sobrepresión revienta el circuito.

En la figura 14 se muestra el árbol de fallos correspondiente a éste sistema. Siendo  $\leq 1$  conexión en paralelo,  $\&$  conexión en serie, C fallo de componente y S salida de señal.

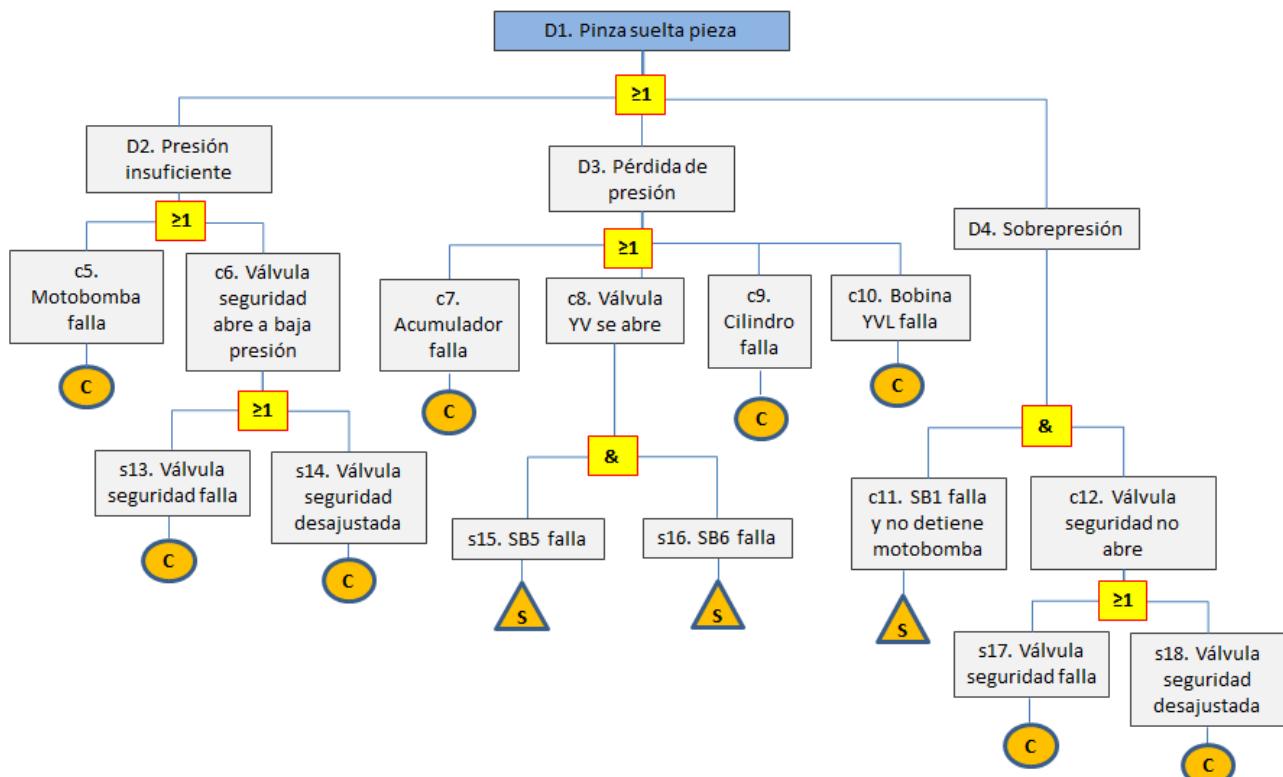


Figura 14: Árbol de fallos sistema pinza suelta pieza

La tabla 4 corresponde al desarrollo del anterior árbol de fallos.

<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>c5</b>	<b>s13</b>
		<b>D3</b>	<b>s14</b>
		<b>D4</b>	<b>s15s16</b>
		<b>c6</b>	<b>c11s17</b>
		<b>c7</b>	<b>c11s18</b>
		<b>c8</b>	
		<b>c9</b>	
		<b>c10</b>	
		<b>c11</b>	
		<b>c12</b>	

Tabla 4: Desarrollo árbol de fallos pinza suelta pieza

El diagrama de bloques correspondiente al sistema es el de la figura 15.

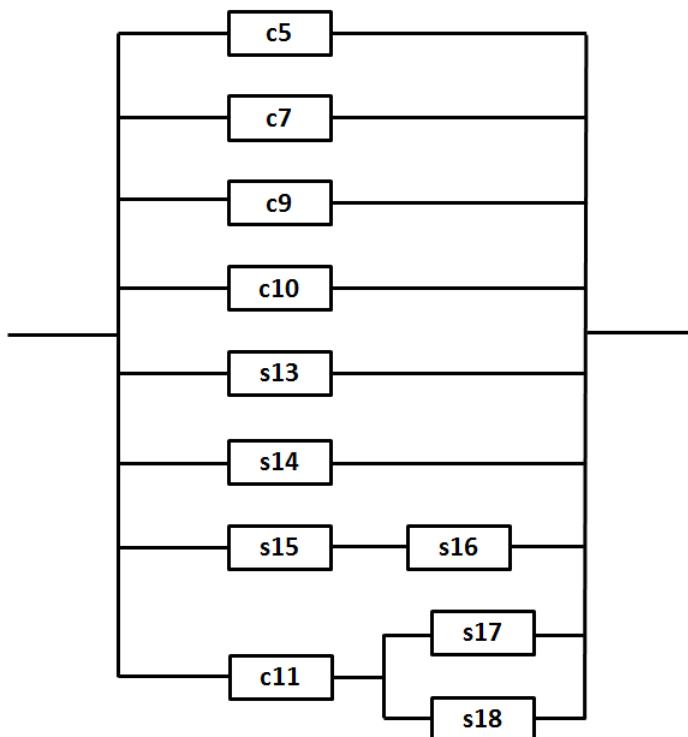


Figura 15: Diagrama de bloques sistema pinza suelta pieza

Se crea un código ejecutable en Octave para determinar el valor de PFH del sistema. El código consiste en la realización de  $n$  experimentos. En cada experimento se crea una PFH de cada componente por separado según una distribución determinada. Para cada experimento se calcula el PFH del sistema resultante de aplicar la función de fallo que se muestra a continuación:

$$S_f = \max(c5, c7, c9, c10, s13, s14, \min(s15, s16), \min(c11, s17), \min(c11, s18))$$

El código completo correspondiente a este caso se puede consultar en el anexo IV.

Se realizan 1.000.000 experimentos para cada cálculo. Los valores estimados para las PFHs de los distintos componentes se recogen en la tabla 5:

PFH c5	5*10e-3
PFH c7	1*10e-4
PFH c9	4*10e-3
PFH c10	1*10e-6
PFH s13	4*10e-6
PFH s14	8*10e-5
PFH s15	6*10e-5
PFH s16	6*10e-5
PFH c11	3*10e-6
PFH s17	4*10e-6
PFH s18	8*10e-5

Tabla 5: Valores estimados de PFH por cada componente

## 6.2. Análisis de resultados

Se realizan 3 cálculos para distribuciones uniforme, exponencial y normal.

Los códigos empleados para realizar los siguientes cálculos están disponibles para su consulta en el anexo IV.

### Distribución uniforme:

Se estima que en la distribución uniforme, el rango en el que se van a encontrar las valores resultantes para cada componente es de más menos la mitad de la vida útil estimada.

El histograma resultante para los n ensayos de uno de los componentes se muestra en la figura 16.

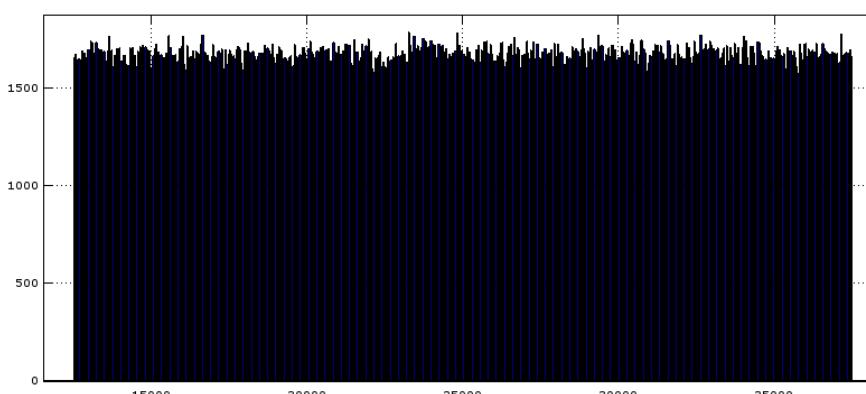


Figura 16: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución uniforme

El resultado del sistema en cuanto al tiempo medio entre fallos se muestra en la figura 17.

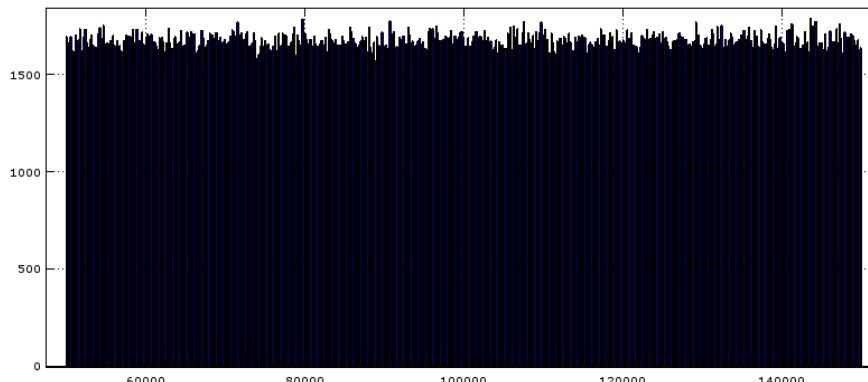


Figura 17: Histograma tiempo medio entre fallos del sistema con distribución uniforme

La tabla 6 recoge los resultados numéricos.

Distribución uniforme	
Media	$1*10e5$
Desviación	$2,887*10e4$
Máximo	$1,5*10e5$
Mínimo	$5*10e4$
Límite superior	$1,491*10e5$
Límite inferior	$5,411*10e4$

Tabla 6: Resultados tiempo medio entre fallos distribución uniforme

#### Distribución normal:

Se estima que en la distribución normal, la varianza para cada componente es igual a 2 veces la media entre raíz de tres.

El histograma resultante para los n ensayos de uno de los componentes se muestra en la figura 18.

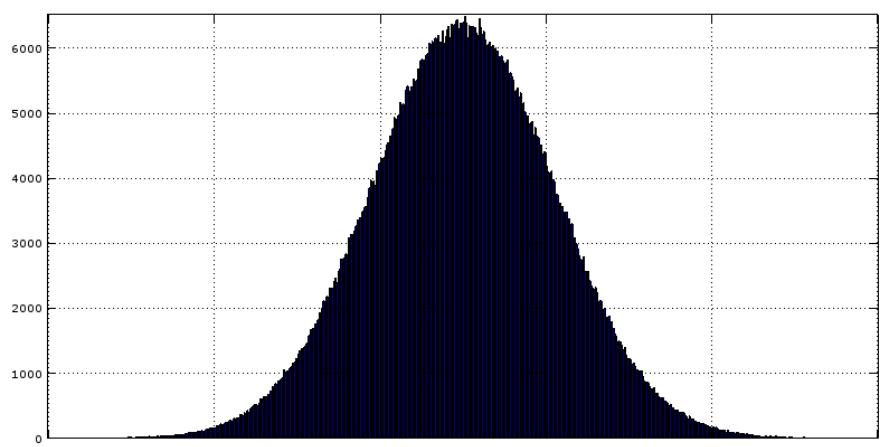


Figura 18: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución normal

El resultado del sistema en cuanto al tiempo medio entre fallos se muestra en la figura 19.

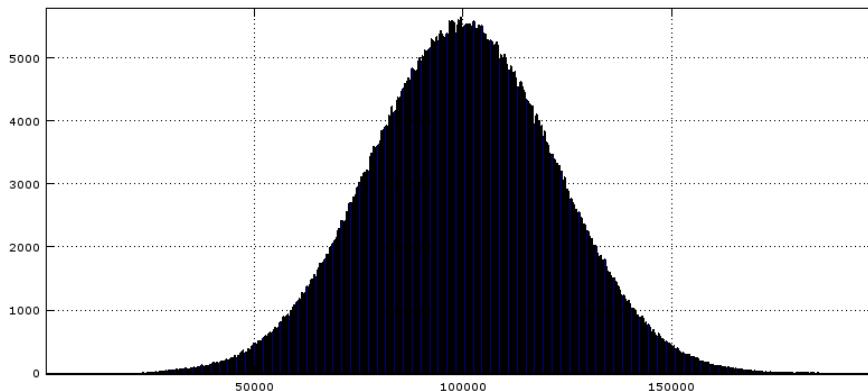


Figura 19: Histograma tiempo medio entre fallos para distribución normal

La tabla 7 recoge los resultados numéricos.

Distribución normal	
Media	1*10e5
Desviación	2,218*10e4
Máximo	2,043*10e5
Mínimo	1,976*10e4
Limite superior	1,435*10e5
Limite inferior	5,652*10e4

Tabla 7: Resultados tiempo medio entre fallos distribución normal

#### Distribución exponencial:

Se deduce que en la distribución exponencial,  $\lambda$  de cada componente es igual a su PFH.

El histograma resultante para los n ensayos de uno de los componentes se muestra en la figura 20.

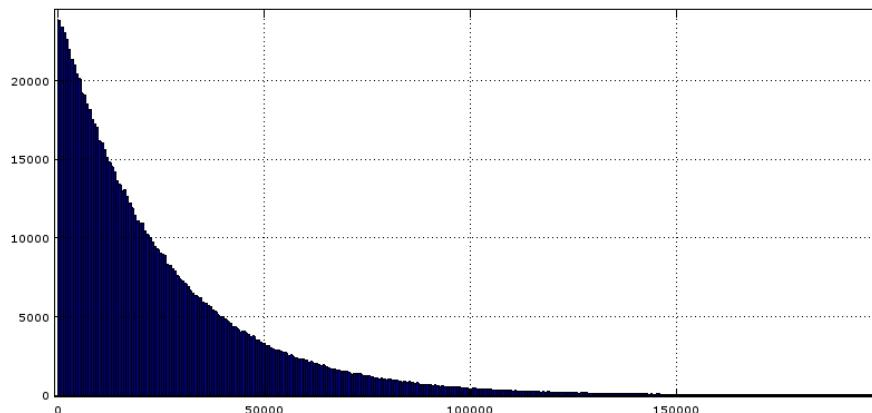


Figura 20: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución exponencial

El resultado del sistema en cuanto al tiempo medio entre fallos se muestra en la figura 21.

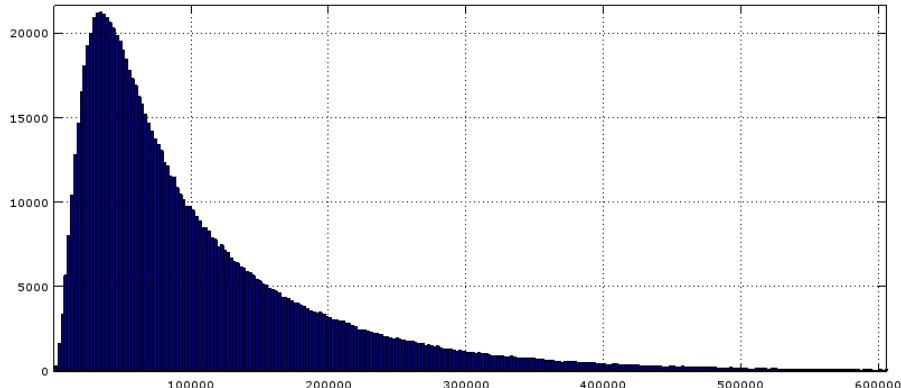


Figura 21: Histograma tiempo medio entre fallos para distribución exponencial

La tabla 8 recoge los resultados numéricos.

Distribución exponencial	
Media	1,066*10e5
Desviación	9,578*10e4
Máximo	1,391*10e6
Mínimo	787,94
Limite superior	2997*10e5
Limite inferior	3351,9

Tabla 8: Resultados tiempo medio entre fallos distribución exponencial

Se observa que para los tres tipos de distribución, la PFH media, que es la inversa de la MTTP, está en torno a  $1.*10^{-5}$ .

Este valor situaría el sistema en un PL a [16].

Para la realización y comprobación del código se han realizado pruebas con distintas distribuciones, y con valores estimados para cada componente. En la realidad, se deberían ajustar estos valores a los obtenidos empíricamente, y se debería asignar la distribución que más se ajustase a la resultante en los test de cada componente por separado.

De esa forma se podría categorizar el sistema no sólo gracias a la media, sino por ejemplo, al límite inferior del intervalo de confianza al 95%.

## 7. Conclusiones

Se han desarrollado tres casos distintos en los que se ha usado Octave 3.8.2. Se han creado los códigos necesarios para resolver los tres casos mediante Montecarlo.

En el caso A, se ha analizado el efecto de la incertidumbre de una MMC en el valor de la incertidumbre de medición de la planitud de una superficie.

En el caso B, se han obtenido las gráficas con la relación incertidumbre tolerancia  $2I/T$  para tres índices de capacidad habituales, que podrán servir como ayuda en la elección del método de medición en base a la capacidad del proceso a medir.

En el caso C se ha estudiado un modo de fallo de un sistema de seguridad para poder categorizarlo en un PL dentro de la norma UNE EN ISO 13849-1:2008 no sólo respecto a su media, sino a otros valores obtenibles de la distribución de su PFH.

El presente trabajo demuestra la validez de Octave como alternativa sólida ante otros programas de pago, y la aceptación de su interfaz gráfica de usuario aun estando todavía en fase de pruebas.

## 8. Índice de Figuras

Figura 1: Ventana de línea de comandos de Octave 3.6.1 .....	6
Figura 2: Entorno gráfico de Octave 3.8.2 .....	7
Figura 3: Opciones sobre variables en interfaz gráfica de Octave 3.8.2 .....	7
Figura 4: Histograma planitud para incertidumbre $0.05\mu\text{m}$ .....	10
Figura 5: Histograma planitud para incertidumbre $0.15\mu\text{m}$ .....	10
Figura 6: Histograma planitud para incertidumbre $0.25\mu\text{m}$ .....	10
Figura 7: Histograma planitud para incertidumbre $0.35\mu\text{m}$ .....	10
Figura 8: Gráfica resultados simulaciones planitud .....	11
Figura 9: Medición de tres elementos con el mismo proceso de medición.....	12
Figura 10: Gráfica tasa de aciertos para $C_p$ 1 .....	14
Figura 11: Gráfica tasa de aciertos para $C_p$ 4/3 .....	15
Figura 12: Gráfica tasa de aciertos para $C_p$ 5/3 .....	15
Figura 13: Esquema circuito de potencia, mando hidráulico y mando eléctrico de un torno .....	17
Figura 14: Árbol de fallos sistema pinza suelta pieza.....	18
Figura 15: Diagrama de bloques sistema pinza suelta pieza .....	19
Figura 16: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución uniforme.....	20
Figura 17: Histograma tiempo medio entre fallos del sistema con distribución uniforme .....	21
Figura 18: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución normal .....	21
Figura 19: Histograma tiempo medio entre fallos para distribución normal .....	22
Figura 20: Histograma tiempo medio entre fallos para s18 con distribución exponencial .....	22
Figura 21: Histograma tiempo medio entre fallos para distribución exponencial .....	23

## 9. Índice de Tablas

Tabla 1: Resultados simulaciones .....	9
Tabla 2: Resultados para $C_p$ 1, $C_p$ 4/3 y $C_p$ 5/3 .....	14
Tabla 3: Niveles de prestaciones (PL).....	16
Tabla 4: Desarrollo árbol de fallos pinza suelta pieza.....	19
Tabla 5: Valores estimados de PFH por cada componente .....	20
Tabla 6: Resultados tiempo medio entre fallos distribución uniforme .....	21
Tabla 7: Resultados tiempo medio entre fallos distribución normal.....	22
Tabla 8: Resultados tiempo medio entre fallos distribución exponencial.....	23

## 10. Glosario de términos

- Código: Texto desarrollado en un lenguaje de programación y que debe ser compilado o interpretado para poder ejecutarse en un ordenador.
- GUI: O interfaz gráfica de usuario, es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz.
- MMC: O máquina de medición por coordenadas, son instrumentos que realizan mediciones dimensionales y de desviaciones de la regularidad geométrica, mediante el uso de un palpador que determina las coordenadas del punto a verificar.
- Incertidumbre: Cuantificación de la duda que se tiene sobre el resultado de una medición.
- Planitud: Condición de una superficie específica que tiene todos los elementos en un plano. Tolerancia de planitud proporciona una zona de tolerancia definida por dos planos paralelos donde la superficie especificada debe estar contenida.
- Capacidad de proceso: Es una propiedad medible de un proceso que puede calcularse por medio del índice de capacidad del proceso.
- Índice de capacidad del proceso: es un cálculo estadístico sobre la capacidad del proceso (ej.  $C_{pk}$  o  $C_{pm}$ ).
- SRP/CS: Piezas relacionadas con la seguridad en los sistemas de control.
- PFH: Número medio de demandas no atendidas de la función de seguridad por hora.
- MTTF: (Mean Time To Failure). Tiempo medio entre fallos.

## 11. Bibliografía

- [1] <http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- [2] <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/equipo1.pdf>
- [3] [https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html)
- [4] [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion\\_MC.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion_MC.pdf)
- [5] <http://es.mathworks.com/products/matlab/?nocookie=true>
- [6] <http://pcmap.unizar.es/~pilar/matlab.pdf>
- [7] <http://www.scilab.org/>
- [8] <http://rlabplus.sourceforge.net/>
- [9] <http://www.maplesoft.com/products/maple/>
- [10] <https://www.gnu.org/software/octave/>
- [11] <http://iimyo.forja.rediris.es/tutorial/IntroduccionaMatlab.pdf>
- [12] [http://centrodeartigo.com/articulos-informativos/article\\_62356.html](http://centrodeartigo.com/articulos-informativos/article_62356.html)
- [13] <http://www.unocero.com/2014/01/03/interfaz-grafica-para-gnu-octave/>
- [14] [http://wiki.octave.org/Octave\\_for\\_Microsoft\\_Windows#MXE](http://wiki.octave.org/Octave_for_Microsoft_Windows#MXE)
- [14] <http://mat.caminos.upm.es/octave/>
- [15] <http://www.xoctave.com/>
- [16] Norma UNE EN ISO 13849-1:2008.
- [17] Guía técnica Real Decreto 2177/2004 – BOE nº 274.
- [18] [http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Ayuda\\_para\\_usar\\_Octave.pdf](http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Ayuda_para_usar_Octave.pdf)
- [19] <http://es.tldp.org/Presentaciones/200304curso-glisa/octave/curso-glisa-octave.pdf>
- [20] [http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Octave\\_1.pdf](http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Octave_1.pdf)
- [21] [https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html)
- [22] [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion\\_MC.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion_MC.pdf)
- [23] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lfa/bautista\\_a\\_md/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lfa/bautista_a_md/capitulo2.pdf)
- [24] <http://www.ugr.es/~jillana/Docencia/FM/mc.pdf>
- [25] [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica\\_/numerico/montecarlo/montecarlo.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/numerico/montecarlo/montecarlo.html)
- [26] <http://www.dc.uba.ar/materias/escuela-complutense/2012/estocasticos.pdf>