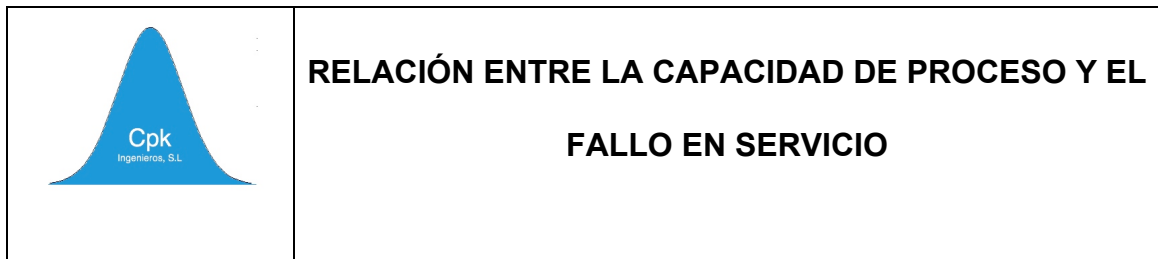


RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE PROCESO Y EL FALLO EN SERVICIO

Ponencia presentada por Arturo Ruiz-Falcó Rojas, en el VIII Congreso de Confiabilidad, organizado por la Asociación Española para la Calidad y celebrado en la Universidad Europea de Madrid.

Noviembre 2006

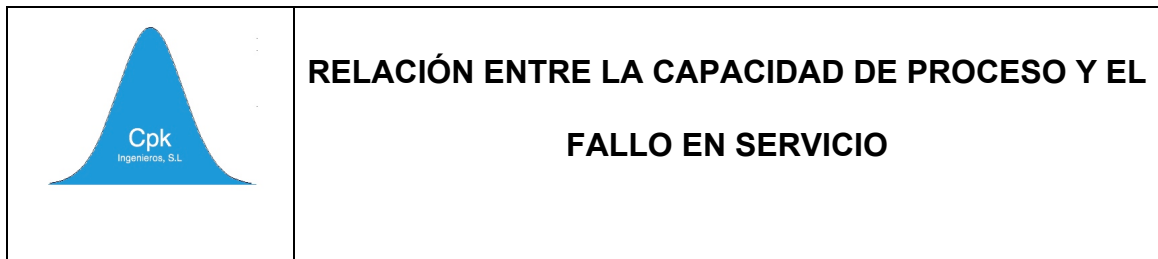


Con agradecimiento....

A los *procesos* que durante estos años me “*contaron sus problemas*” a través de los datos.

A los responsables de los procesos, que confiaron en mi y me permitieron ayudarles.

Y sobre todos, a mis alumnos de ICAI, a los que durante 18 cursos (1992-2010) traté de convencerles de que esto servía para algo. No siempre lo conseguí en clase, pero estoy seguro que cuando maduren profesionalmente y se encuentre con algún proceso con problemas, despolvarán mis apuntes de clase.



ÍNDICE

1. MEDIDA DE LA FIABILIDAD	4
2. ¿POR QUÉ SE PRODUCEN LOS FALLOS	9
3. ¿QUÉ SE PUEDE HACER CON LOS PROCESOS PARA MEJORAR LA FIABILIDAD?	13
4. ¿QUÉ PASOS DAR PARA CONSEGUIR PRODUCTOS FIABLES?	14



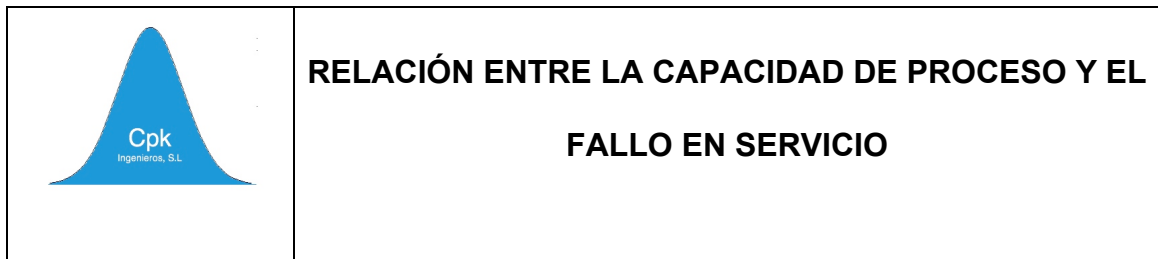
RESUMEN

En ingeniería de fiabilidad se considera habitualmente el tiempo hasta el fallo como una variable aleatoria. Este enfoque permite medir la fiabilidad de un equipo, pero no sirve para “mejorar” su fiabilidad. En esta ponencia se relaciona el tiempo hasta el fallo con las características y la variabilidad de los procesos de fabricación.

1. MEDIDA DE LA FIABILIDAD

La ingeniería de fiabilidad desarrolló hace décadas¹ procedimientos estadísticos para medir la fiabilidad, es decir la probabilidad de fallo en el tiempo, y deducir de ahí algunos parámetros (MTBF, MTTF), etc. necesarios para evaluar riesgos, planes de mantenimiento, niveles óptimos de repuestos, etc.). En la Tabla 1 se indican las funciones que se utilizan con mayor frecuencia en ingeniería de fiabilidad. Si se dispone de datos de tiempos hasta el fallo (ya sean experimentales en un banco de ensayos, ver esquema en la Figura 1, o procedentes del comportamiento en servicio), se pueden estimar los parámetros de la función que explican mejor esos datos; por ejemplo el parámetro λ en el caso de la función exponencial, ver Figura 2. Una vez hecho esto, se podría

¹ La función de Weibull tiene sus orígenes en 1939.



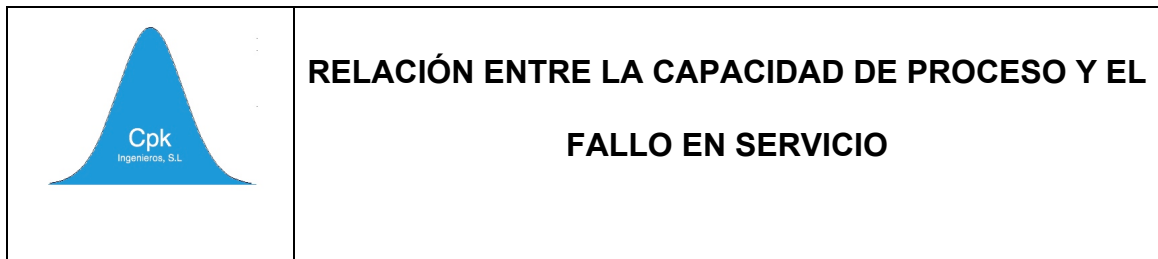
calcular el MTTF y realizar previsiones de tiempo hasta el fallo. Todo esto tiene una gran utilidad, pero...¿es suficiente? ¿no puede aportar nada más la ingeniería de fiabilidad? Para ver qué grado de avance representa este enfoque es ilustrativo compararlo con otras ramas de la ciencia.

Supongamos un paciente que acude a la consulta de un médico. Tras realizarle la correspondiente exploración, el médico le responde:

– Bien tiene Ud X años. Debo felicitarle porque ha sobrevivido al x% de los que nacieron al mismo tiempo que Ud y ya han fallecido. Teniendo en cuenta que ya ha llegado a los X años, su esperanza de vida son Y años, por lo que le deseo que disfrute de los X – Y años que le restan...

Bien, el médico ha informado a su paciente de su MTTF, etc., pero no le ha curado. No ha contribuido a aumentar el MTTF de los pacientes. Afortunadamente para las máquinas humanas, la medicina actual hace más cosas:

- **Toma medidas preventivas** (por ejemplo, campañas de vacunación). En ingeniería de calidad / fiabilidad, también se toman medidas de este tipo (por ejemplo, AMFE, poka yoke, diseños robustos, mantenimientos preventivos / predictivos, etc.).
- **Diagnostica**. Para ello la medicina ha estudiado los síntomas y los encuadra en enfermedades. En ingeniería de fiabilidad se realiza, por ejemplo, el análisis de fallo. En el caso particular de la metodología 6 Sigma, se dedica una de las cinco fases de los proyectos de mejora DMAIC (fase “Analizar”) a la determinación de las causas.
- **Cura**. Para ello la medicina ha estudiado las relaciones causa efecto entre síntomas / enfermedades y tratamientos. En la medida que la medicina



progresar, esta relación causa efecto se completa con el conocimiento del mecanismo de la enfermedad y del tratamiento.

El diagnóstico es poco útil si después no hay una cura. En el caso particular de la metodología 6 Sigma, se dedican dos de las fases de los proyectos de mejora DMAIC (fases “Mejorar” y “Controlar”) a la determinación e implantación de las mejoras. Para ello en estas fases se aplican un abanico bastante amplio de herramientas, muchas de ellas de naturaleza estadística.

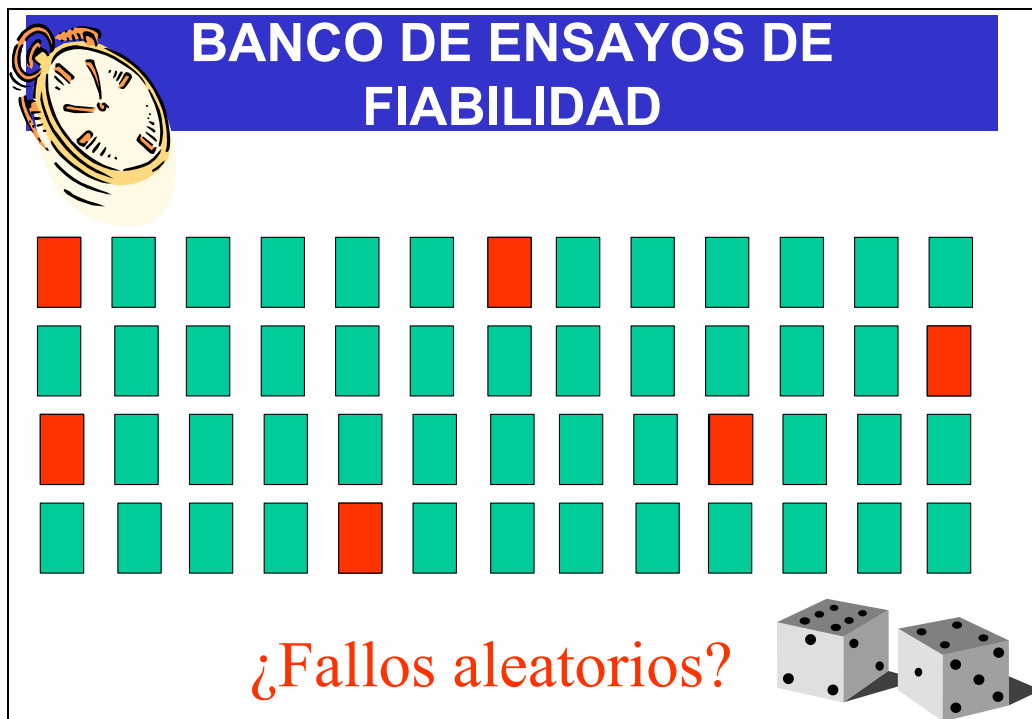
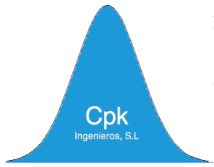


Figura 1: Banco de ensayos de fiabilidad. Se han registrado 6 fallos en 52 componentes ensayados

	RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE PROCESO Y EL FALLO EN SERVICIO
--	--

Función de	Función de fiabilidad	Situaciones en la que es previsible que sea aplicable
Exponencial	$R(t) = e^{-\frac{t}{\lambda}}$	Tasa de fallos constante en el tiempo. MTTF = $1/\lambda$
Gamma	$R(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{a-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}$	Situaciones en las que se deben dar a fallos parciales que sigan un distribución exponencial antes del fallo catastrófico.
Weibull	$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{c}\right)^m}$	m: parámetro de forma. m<1: tasa de fallos decreciente. m=0: Coincide con la exponencial (tasa de fallo constante). m>1: tasa de fallos decreciente. t ₀ : parámetro de origen c: parámetro de escala Explica situaciones en las que un componente está sometido a varios mecanismos de fallo posibles y falla cuando uno de ellos se produce.
Lognormal	$R(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$	Describe bien fallos por desgaste. Se emplea también para describir tiempos hasta la reparación.

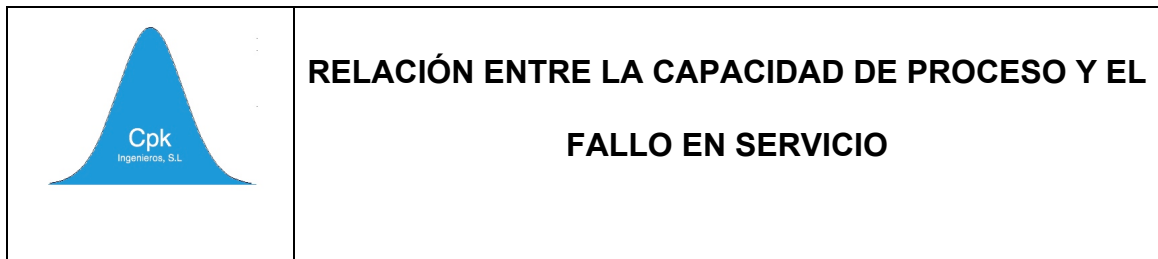
Tabla 1: Funciones estadísticas más empleadas en ingeniería de fiabilidad



RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE PROCESO Y EL FALLO EN SERVICIO



Figura 2: Estimación de los parámetros de las funciones de fiabilidad



2. ¿POR QUÉ SE PRODUCEN LOS FALLOS

Tras las reflexiones anteriores, queda claro que en ingeniería de fiabilidad no es suficiente la contabilización pasiva del número de fallos. A este respecto Taguchi afirma:

“MIDIENDO LA FIABILIDAD NO SE CONSIGUE FIABILIDAD”

Es decir, la fiabilidad es un “*síntoma*”, o dicho de otro modo, una consecuencia de las características del producto, proceso de fabricación y condiciones de uso (uniformidad de recubrimientos, valores de tensiones de pico, etc.). Dicho de otro modo, la variable aleatoria “*tiempo hasta el fallo*” depende de características físicas. Por ejemplo, el tiempo hasta el fallo de un componente puede estar determinado por el espesor de una capa de recubrimiento superficial (ver Figura 3). La ingeniería de calidad nos enseña que los procesos están sometidos a una variabilidad, por lo que la circunstancia que determina el tiempo hasta el fallo no es el espesor nominal ni el espesor medio...es la variabilidad del proceso que genera zonas débiles de fallo potencial (ver Figura 4).



Figura 3: El tiempo hasta el fallo es función de algunas características técnicas

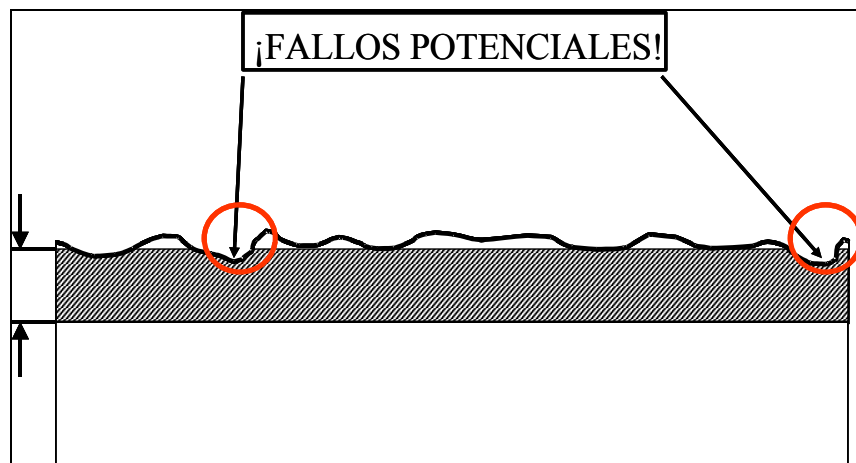
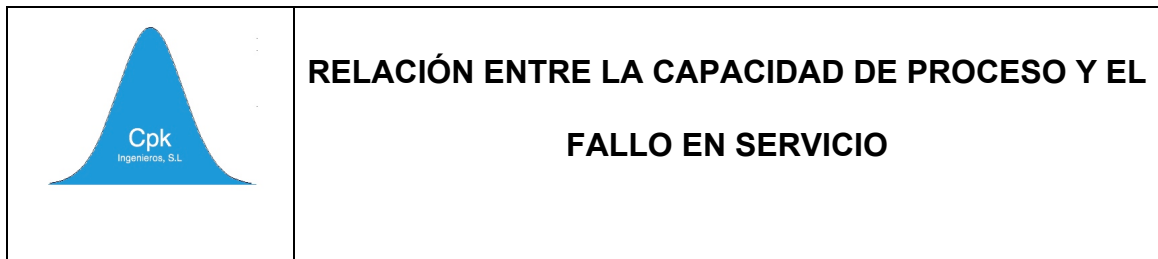


Figura 4: Nos encontramos con el enemigo tradicional de la calidad... ¡la variabilidad!

Es decir, el carácter aleatorio del tiempo hasta el fallo proviene no solo de la aleatoriedad de las condiciones de uso y servicio, sino que también viene inducido por el carácter de variable aleatoria que tienen las características físicas del producto.



RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE PROCESO Y EL FALLO EN SERVICIO

En ingeniería de calidad se aplica el concepto de *capacidad de proceso* para medir su variabilidad natural (seis desviaciones típicas) y se emplean habitualmente los índices C_p y C_{pK} para compararlo con las tolerancias prefijadas. Ver Figura 5 y Figura 6.

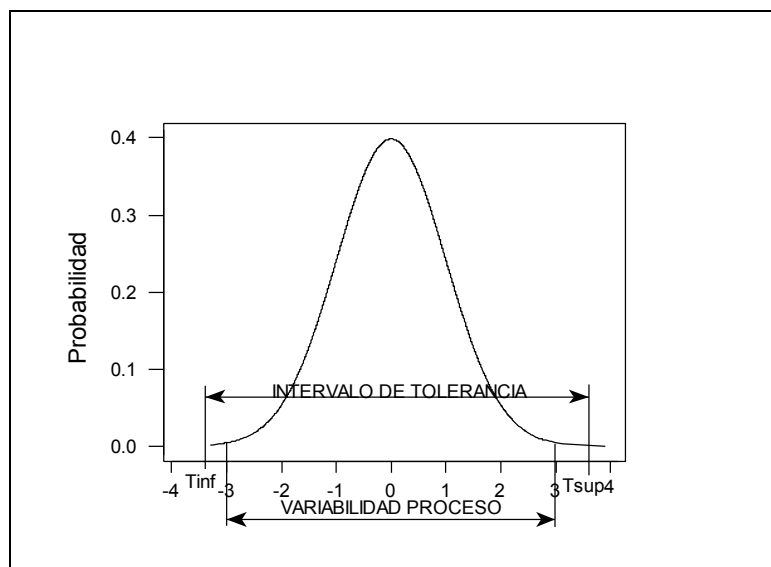


Figura 5: Índice C_p

$$C_p = \frac{\text{Intervalo de tolerancias}}{\text{Capacidad del proceso}} = \frac{T_s - T_i}{6\sigma}$$

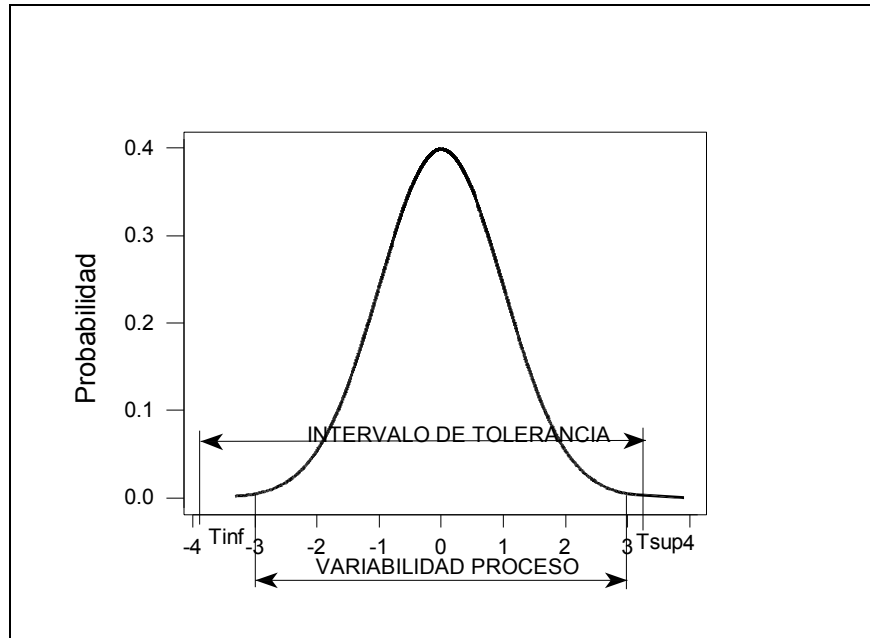
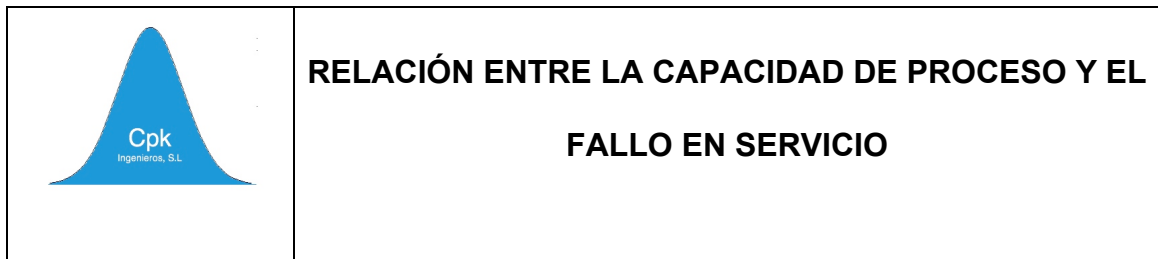


Figura 6: Índice C_{pk}

$$C_{pk} = \frac{\text{Dist. de la media al limite de tol. mas ajustado}}{\text{semicapacidad del proceso}}$$

Para fijar ideas, industrias punteras como puede ser automoción, requieren unos C_{pk} mínimos de 1,33 o incluso 1,66. La famosa *Calidad Seis Sigma* equivale a un $C_{pk} = 2,0$.

Esta visión de la relación de la variabilidad de los procesos con el tiempo hasta el fallo es perfectamente coherente con el punto de vista de los ingenieros, que siempre han visto con recelo la ruleta rusa de los ensayos de fiabilidad. Por otra parte, permite relacionar la ingeniería de calidad con la ingeniería de fiabilidad, de



manera que ambas están enfocadas al cumplimiento de las especificaciones y requisitos entre los que se encuentran los relacionados con la fiabilidad.

3. ¿QUÉ SE PUEDE HACER CON LOS PROCESOS PARA MEJORAR LA FIABILIDAD?

Con los procesos se pueden hacer básicamente dos cosas, modificar su valor medio (centrado) o reducir su variabilidad (ver Figura 7) de manera que en todos los casos las condiciones del producto superen las sollicitaciones a las que ha de estar sometido en servicio. En función de la previsibilidad de las condiciones de servicio, el coeficiente de seguridad deberá ser mayor o menor, pero también es importante al fijar este coeficiente que **se debe tener en cuenta el extremo de la cola y no el nominal.**

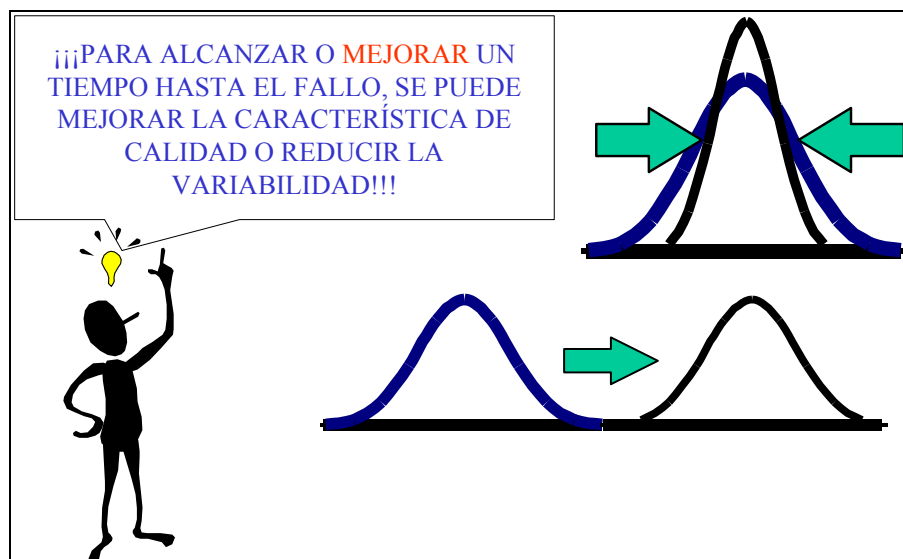
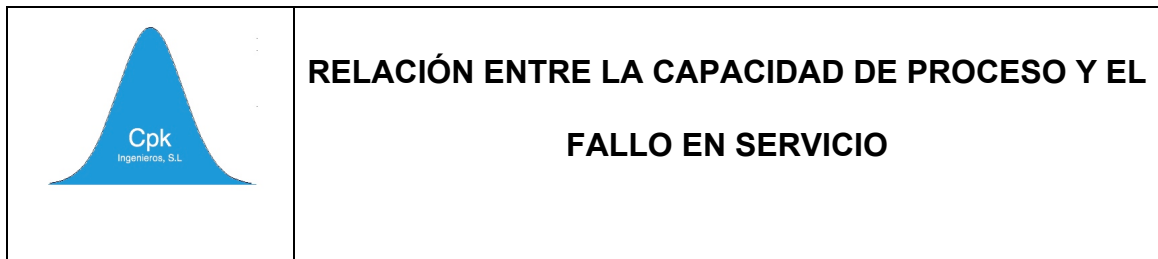


Figura 7: ¿Qué se puede hacer con los procesos?



4. ¿QUÉ PASOS DAR PARA CONSEGUIR PRODUCTOS FIABLES?

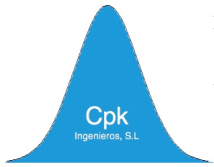
Pueden seguirse los siguientes pasos:

1. **Determinar las características del producto de las que depende el tiempo hasta el fallo.** Si bien la casuística puede ser muy diversa, en este caso es muy útil la realización de AMFEs, Árboles de Fallo, Análisis de Fallo, CSP, etc
2. **Cuantificar la relación entre los valores de las características y el tiempo hasta el fallo.** Para ello no sería necesario realizar ensayos de tiempo de vida del producto completo, sino de la vida de alguna de las partes. Por ejemplo, para especificar el espesor mínimo de una protección superficial, se podría realizar ensayos de desgaste. Mediante técnicas de regresión se podría llegar a al modelo siguiente, en la que x_1, x_2, \dots, x_n son los valores de las características de calidad del producto:

$$T = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

3. **Relacionar cada una de las características x_i con los parámetros clave que controlan el proceso.** Este es el verdadero campo de la ingeniería de calidad. Las técnicas a aplicar en cada caso pueden ser muy variadas en función de la naturaleza y el conocimiento previo que se tenga del proceso. En general las técnicas de diseño de experimentos, VSP, etc. son muy útiles. Como consecuencia de este estudio se podría llegar a al modelo siguiente para cada uno de los x_i :

$\mu = \Phi_1(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$ $\sigma = \Phi_2(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$	CONDICIONES AMBIENTALES DE FABRICACIÓN
--	--



RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE PROCESO Y EL FALLO EN SERVICIO

4. **Fijar los valores nominales y las tolerancias de los x_i .** Esto ha de hacerse en función de la variabilidad de las condiciones de servicio (coeficiente de seguridad) y la variabilidad del proceso. Como se ha dicho anteriormente **se debe tener en cuenta el extremo de la cola y no el nominal** por lo tanto el coeficiente de seguridad ha de calcularse para el caso de características del tipo “*mayor es mejor*”:

$$CS = \frac{X_{no\ min\ al} - 3\sigma}{\text{Condición requerida de servicio}}$$

Si fuera (si fuera “*menor es mejor*”):

$$CS = \frac{\text{Condición requerida de servicio}}{X_{no\ min\ al} + 3\sigma}$$