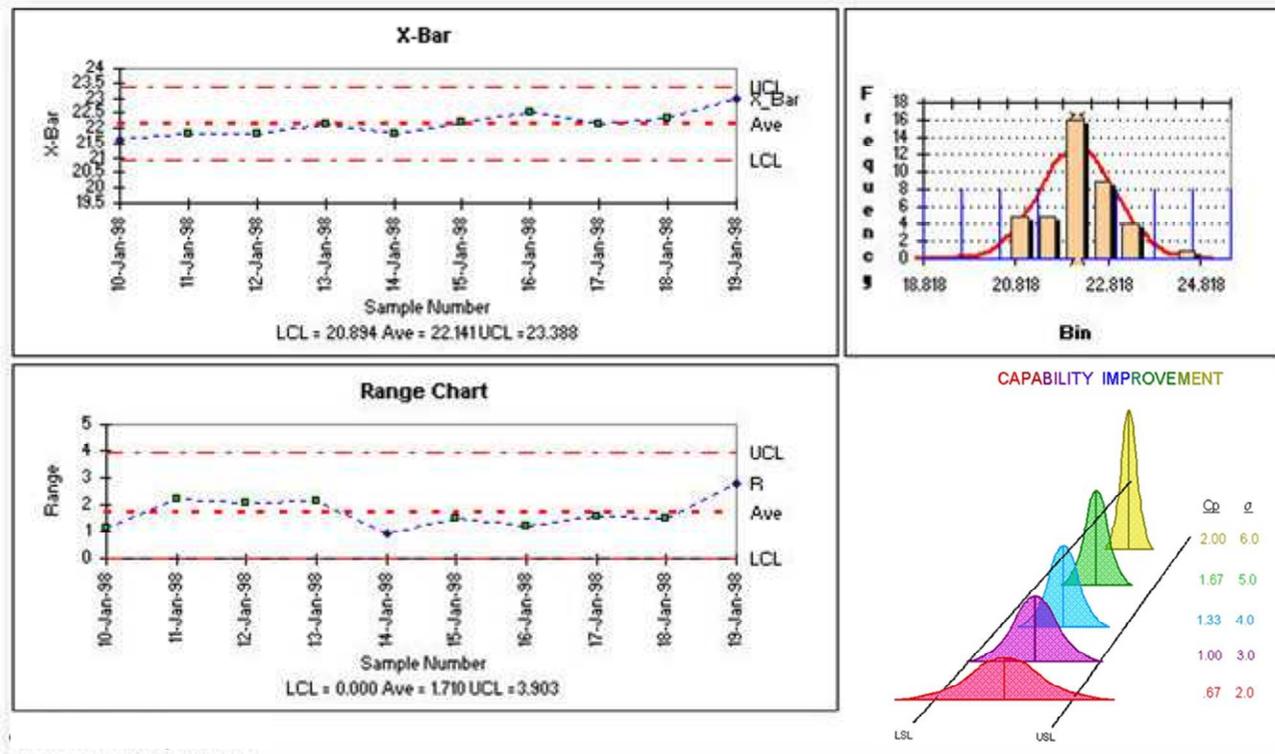


CONTROL DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN



Introducción a las técnicas de control estadístico de los procesos

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Introducción

El **Control Estadístico de los Procesos** (conocido de forma abreviada por sus siglas en inglés **SPC**) es un método práctico que aplica técnicas estadísticas para monitorizar⁽¹⁾ (vigilar y controlar), analizar y mejorar los procesos.

Aunque el Control Estadístico de los Procesos (SPC) es aplicable a cualquier tipo de proceso, en este caso estudiaremos su aplicación a los de las tecnologías de fabricación estudiados en esta Asignatura.

Por otra parte, es preciso señalar que SPC no debe confundirse con **TQM (Total Quality Management)**, aunque debería ser considerado como un elemento o parte muy relevante de TQM.

SPC permite vigilar y controlar la estabilidad de los procesos, ayudando así a lograr la uniformidad del producto resultante. Se trata de una herramienta de aplicación en una estrategia de fabricación en la que prevalece la “**prevención**” sobre la “detección” de desviaciones y fallos.

(1) Monitorizar, [del latín *monitor*, *monitoris* (el que advierte, aconseja o hace recordar)]

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Definiciones

Proceso.- Es una combinación única de máquinas, herramientas, métodos, materiales y personas comprometidas en la producción. A menudo es factible separar y cuantificar el efecto de las variables que entran en esta combinación y tal separación puede resultar clarificadora.

Variación.- Las numerosas diferencias que resultan en el producto del efecto combinado de los elementos que influyen en un proceso. No existen dos productos o características que sean exactamente iguales.

Gráficos o Cartas de control.- Son los instrumentos empleados para detectar las causas “asignables” o especiales (no aleatorias) de variación en el proceso.

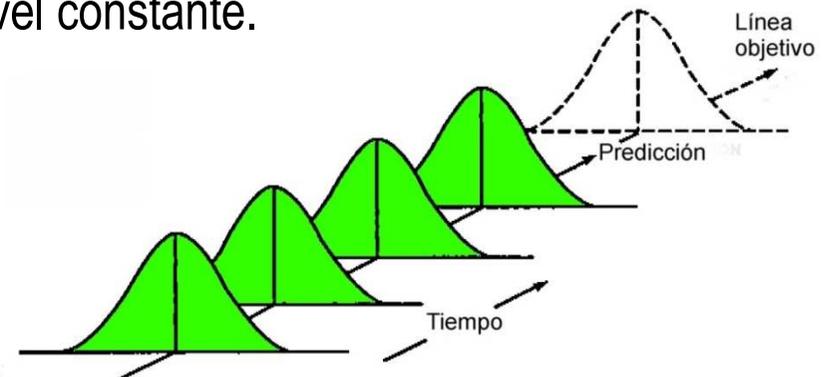
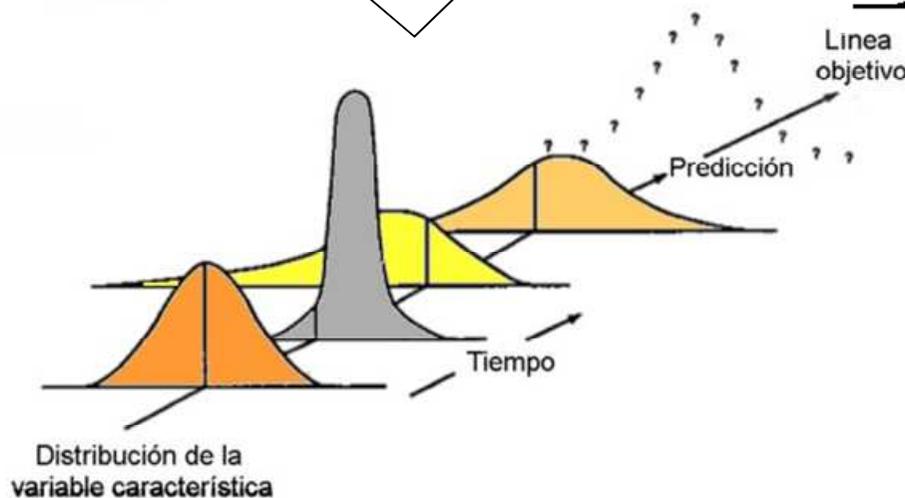
Capacidad.- Es la medida que relaciona el rendimiento real de una máquina o un proceso con el rendimiento especificado (Posibilidad, basada en realizaciones contrastadas, de lograr los resultados especificados).

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Introducción

Se dice que un proceso funciona “bajo control estadístico” cuando la única fuente de variación son las causas comunes (aleatorias). El objetivo del análisis mediante gráficos de control es determinar cualquier evidencia de que la variabilidad del proceso o la media del proceso no se mantienen a un nivel constante.

Si hay causas de variación especiales (asignables), el resultado del proceso no es estable en el tiempo.



Si solamente están presentes las causas comunes de variación (aleatorias), el resultado del proceso forma una distribución que es estable y predecible en el tiempo.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Tipos

Se utilizan dos tipos de gráficos de control: de **Variables** y de **Atributos**.

Si la característica a controlar puede medirse y expresarse como un número, la llamamos variable. En tales casos se utilizan los llamados **gráficos de control por variables**. Los gráficos **X** son los más utilizados para controlar la tendencia central, mientras que los gráficos de **rango (recorrido)** y de **desviación típica** se utilizan para controlar la dispersión aunque lo normal es utilizar gráficos que recojan las dos informaciones (gráficos **\bar{X} -R**).

Hay también muchas características cualitativas que no se miden en una escala cuantitativa. En esos casos, se juzga si una unidad de producto es o no conforme si posee ciertos atributos o contando el número de defectos que aparecen en cada unidad de producto. Los gráficos de control para estas características se denominan **gráficos de control por atributos**. Los hay de cuatro tipos: **p**, **np**, **c** y **u** que controlan las unidades disconformes en proporción o cantidad o las disconformidades en cantidad o proporción, respectivamente.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Fases para la implantación de la mejora del proceso

La mejora del proceso es un proceso continuo en el que se repiten las siguientes fases:

Recogida.- De los datos correspondientes a la característica que se está estudiando y transformándolos en una forma que se puedan representar.

Control.-

- Cálculo de los límites de control partiendo de los datos obtenidos de la producción, del proceso. Estos límites de control no son límites de especificación ni objetivos, sino representaciones de la variabilidad natural del proceso.
- Identificación de causas especiales de variación.
- Adopción de medidas correctoras.
- Nueva recogida de datos y cálculo de nuevos límites de control.

Mejora.-

- Evaluación de la capacidad.
- Análisis de la variación debida a las causas comunes del proceso.
- Adopción de medidas correctoras.

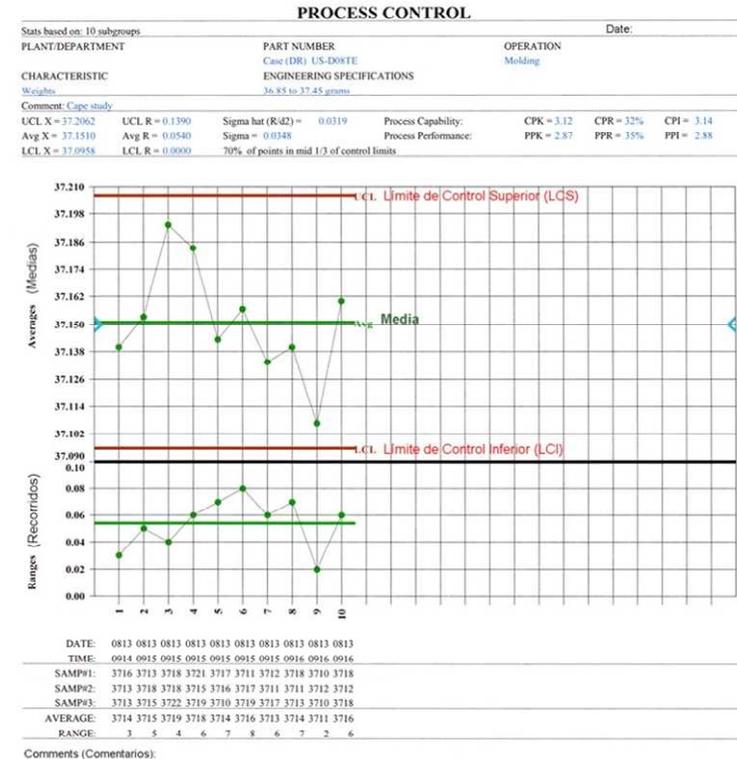
EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Variables. Gráficos \bar{X} -R. Selección del tamaño, frecuencia y número de muestras

El par de gráficos \bar{X} -R o “Media – Recorrido” se elaboran a partir de las mediciones de una de las características de la producción del proceso.

Los datos se reseñan en pequeñas muestras de tamaño constante, generalmente de 5 unidades consecutivas, tomándose las muestras periódicamente (por ejemplo, una vez cada 30 minutos, dos 4 veces por turno, etc.)

El número de muestras debe satisfacer dos criterios. Desde el punto de vista del proceso, deberán ser suficientes para cerciorarse de que las principales causas de variación tienen oportunidad de manifestarse. Desde el punto de vista estadístico, 25 o más muestras conteniendo 100 o más lecturas individuales, proporcionan una prueba satisfactoria de estabilidad.



EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

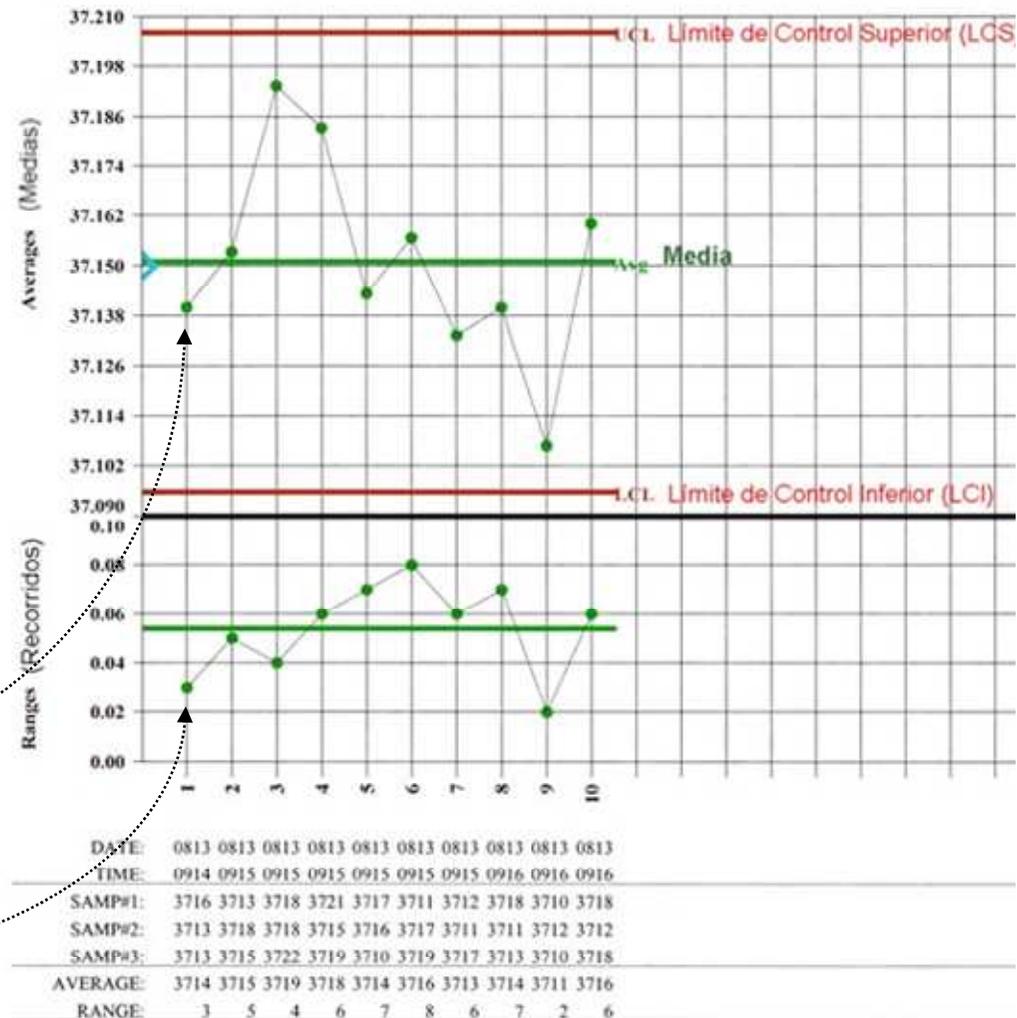
Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Preparación y registro de datos

Los gráficos \bar{X} -R se trazan, normalmente, poniendo el gráfico \bar{X} encima del gráfico R, con un bloque de datos en la parte inferior.

Los valores de \bar{X} y de R constituirán, normalmente, las escalas verticales, mientras que la secuencia de las muestras a lo largo del tiempo constituirán la escala horizontal.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

$$R = X_{\text{mayor}} - X_{\text{menor}}$$



EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Cálculo de los límites de control

En primer lugar se calculan los límites de control del gráfico de recorrido, calculándose después los límites de control del gráfico de medias. Para ello se calculan:

- el recorrido medio (\bar{R})
- la media de las medias de las muestras ($\bar{\bar{X}}$)
[m es el número de muestras].

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_m}{m}$$

Los límites de control tienen por objeto indicar en qué medida varían las medias y los recorridos de las muestras si sólo existen causas comunes de variación. Se basan en el tamaño de la muestra y la variabilidad dentro de la muestra reflejada en los recorridos.

La determinación de los límites de control se basa en conceptos y resultados estadísticos: Sabemos (por el TCL) que, para un tamaño muestral n grande, la distribución de las medias muestrales será aproximadamente normal con media igual a μ y desviación estándar igual a σ/\sqrt{n} . De este hecho se deduce que aproximadamente el 99,73% de las medias muestrales estarán contenidas en el intervalo $\mu \pm (3 \times \sigma/\sqrt{n})$, intervalo que viene definido por los límites de control. Este sencillo razonamiento es la base para la construcción de todos los gráficos de control.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Cálculo de los límites de control

La determinación de los límites de control se basa en conceptos y resultados estadísticos: Sabemos (por el TCL) que, para un tamaño muestral n grande, la distribución de las medias muestrales será aproximadamente normal con media igual a μ y desviación estándar igual a σ/\sqrt{n} . De este hecho se deduce que aproximadamente el 99,73% de las medias muestrales estarán contenidas en el intervalo $\mu \pm (3 \times \sigma/\sqrt{n})$, intervalo que viene definido por los límites de control. Este sencillo razonamiento es la base para la construcción de todos los gráficos de control.

$$LCS_R = D_4 \cdot \bar{R}$$

$$LCI_R = D_3 \cdot \bar{R}$$

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}$$

$$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}$$

$A_2 \cdot \bar{R}$ equivale a $3 \times \sigma/\sqrt{n}$ y, por lo tanto la desviación típica σ de la población será $(A_2 \cdot \bar{R} \times \sqrt{n} / 3)$.

Para un tamaño de muestra $n=5$; $A_2 = 0,577$ por lo que $\sigma = (0,577 \times \bar{R} \times \sqrt{5}) / 3 = \bar{R} / 2,33$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_4	3,27	2,57	2,28	2,11	2	1,92	1,86	1,82	1,78
D_3	/	/	/	/	/	0,08	0,14	0,18	0,22
A_2	1,88	1,02	0,73	0,58	0,48	0,42	0,37	0,34	0,31

En el cálculo de los límites de control de los gráficos de variables se utilizan constantes que difieren según el tamaño de la muestra (n).

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Cálculo de los límites de control

Estudio del caso de la tapa de plástico (pag. 7).

Característica a controlar: Peso en moldeo // Especificación: 36,85 gr. ÷ 37,45 gr.

Hora	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	Media
X_1	37,16	37,13	37,18	37,21	37,17	37,11	37,12	37,18	37,1	37,18	
X_2	37,13	37,18	37,18	37,15	37,16	37,17	37,11	37,11	37,12	37,12	
X_3	37,13	37,15	37,22	37,19	37,1	37,19	37,17	37,13	37,1	37,18	
Recorrido	0,03	0,05	0,04	0,06	0,07	0,08	0,06	0,07	0,02	0,06	0,054
Media	37,14	37,15	37,19	37,18	37,14	37,16	37,13	37,14	37,11	37,16	37,15

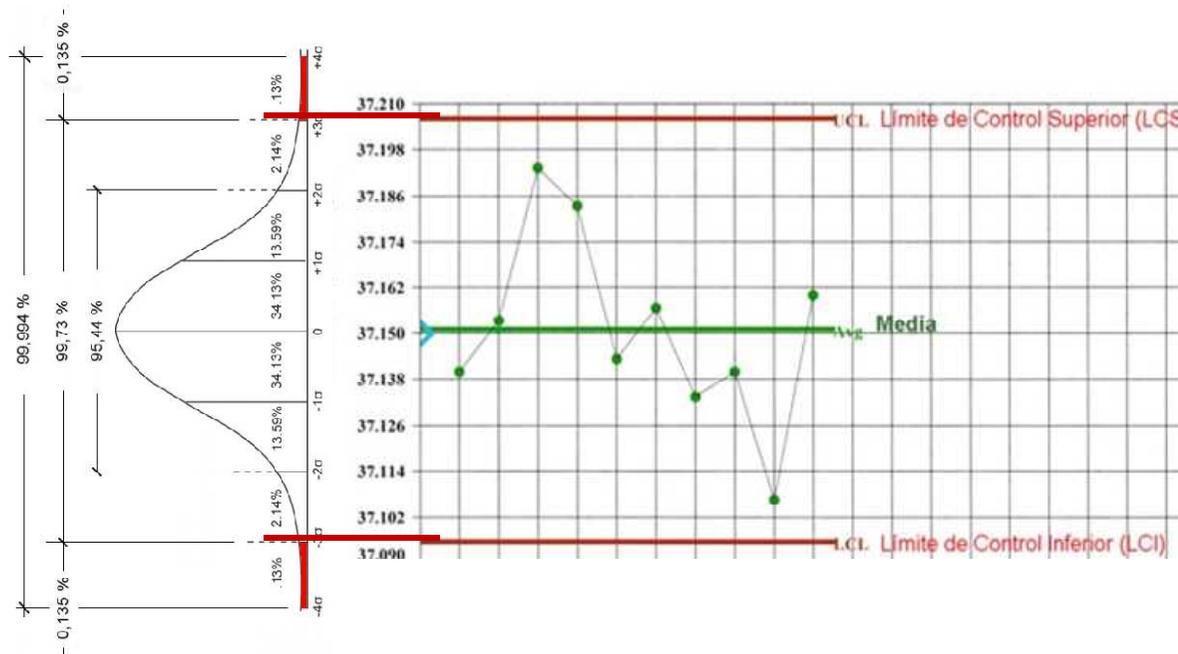
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_4	3,27	2,57	2,28	2,11	2	1,92	1,86	1,82	1,78
D_3	/	/	/	/	/	0,08	0,14	0,18	0,22
A_2	1,88	1,02	0,73	0,58	0,48	0,42	0,37	0,34	0,31

$LCS_R = D_4 \cdot \bar{R}$	=	2,57	x	0,054	=	0,139		
$LCI_R = D_3 \cdot \bar{R}$	=	0	x	0,054	=	0		
$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}$	=	37,15	+	1,02	x	0,054	=	37,206
$LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}$	=	37,15	-	1,02	x	0,054	=	37,096

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Interpretación para el control del proceso

Si la variabilidad pieza a pieza del proceso y la media del proceso permanecieran constantes respecto a sus niveles actuales (estimados por \bar{R} y \bar{X} , respectivamente), los recorridos (R) y medias (\bar{X}) de cada subgrupo variarían sólo de forma fortuita, pero raras veces sobrepasarían los límites de control (0,27% de las veces para los límites calculados); es decir, los límites de control representan los extremos de un rango de variación $\pm 3\sigma$ de la distribución normal representativa del proceso.



La constante A_2 transforma el valor del recorrido medio \bar{R} en el valor 3σ .

Los límites de control no son los límites de especificación o tolerancia de la característica en estudio.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

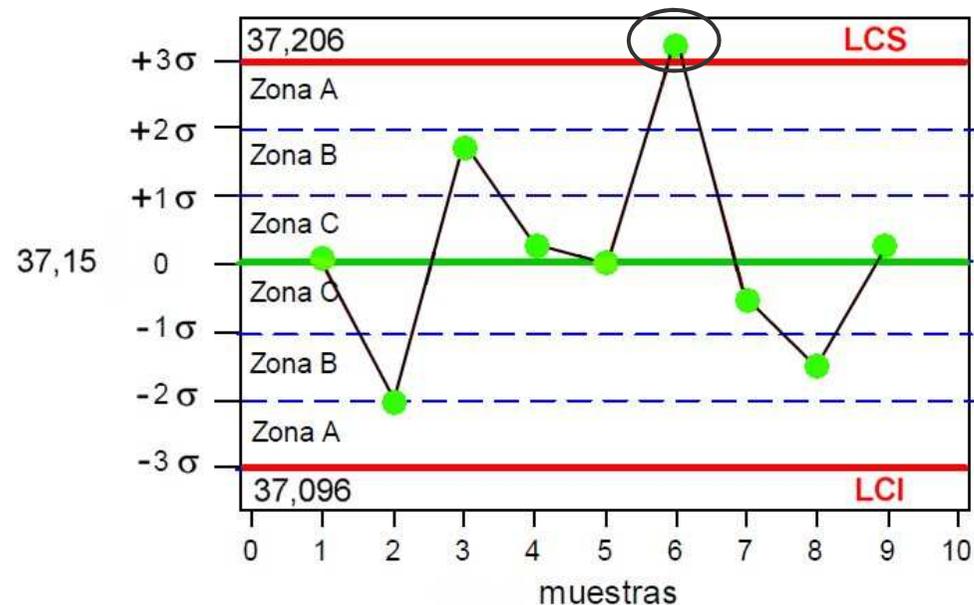
Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Interpretación para el control del proceso

Cuando alguno de los estadísticos muestrales (punto del gráfico X o R)) cae fuera de los límites de control, hay razones para pensar que el proceso está fuera de control. Además, también es importante estudiar la posible existencia de patrones no aleatorios en la representación de dichos estadísticos muestrales, ya que tales patrones suelen ser un síntoma de que los parámetros del proceso están cambiando.

Test 1: un punto situado más allá de los límites de control

A tal efecto se utilizan los **tests** para causas especiales o asignables.

Al igual que los límites de control, los tests para detectar causas especiales de variación tienen también un fundamento estadístico.



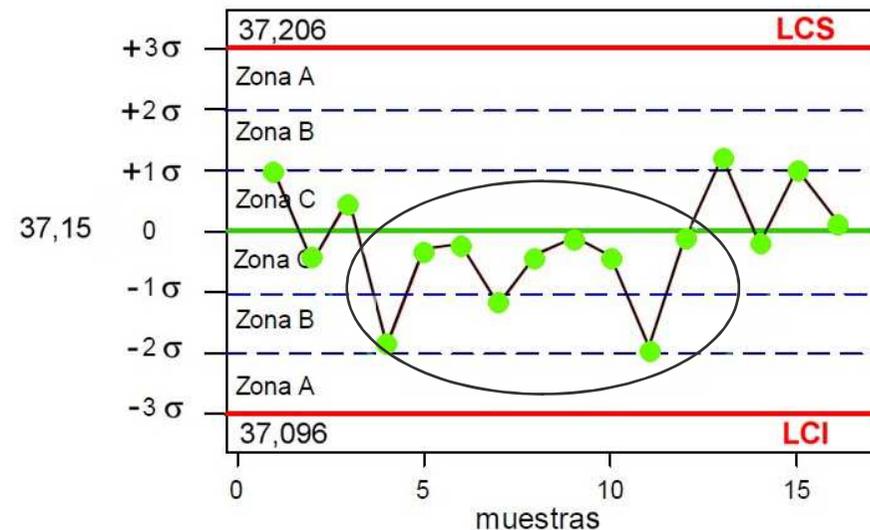
EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Interpretación para el control del proceso

La probabilidad de que un estadístico muestral caiga por encima de la línea central será de 0,5 ⁽¹⁾. Por tanto, en tales condiciones, la probabilidad de que dos estadísticos consecutivos caigan por encima de la línea central será de $0,5 \cdot 0,5 = 0,25$.

La probabilidad de que 9 estadísticos consecutivos caigan en el mismo lado de la línea central será de $0,5^9 = 0,00195$. Este último valor se aproxima mucho a la probabilidad de un estadístico muestral caiga más allá de los límites de control de 3 sigma, por lo que la existencia de estos 9 estadísticos podría interpretarse como otro indicativo de que el proceso está fuera de control.

Test 2: nueve puntos consecutivos en el mismo lado



(1) Siempre que el proceso esté bajo control, que estadísticos muestrales consecutivos sean independientes, y que la distribución de los estadísticos muestrales sea aproximadamente normal.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

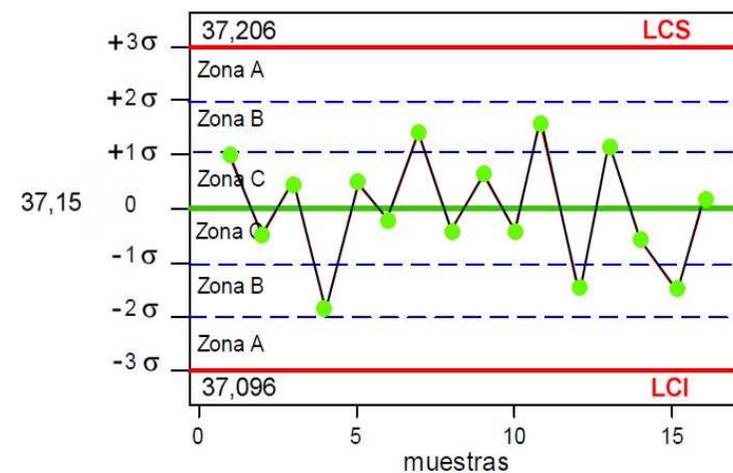
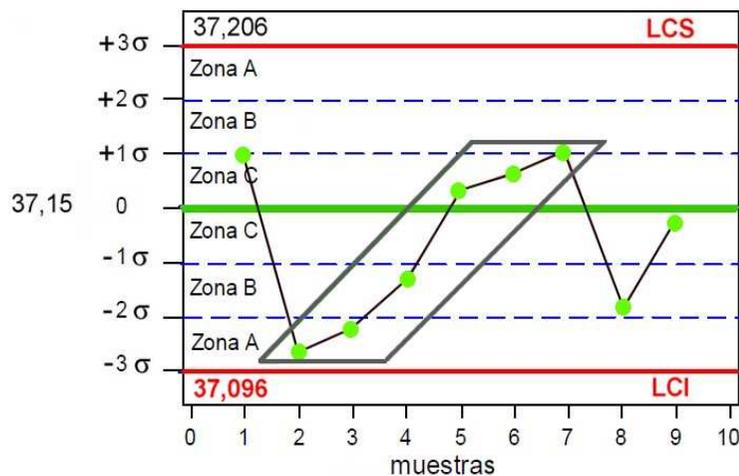
Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Interpretación para el control del proceso

Cada uno de los *tests* detecta un determinado comportamiento no aleatorio en los datos. Cuando alguno de los *tests* resulta positivo entonces hay indicios de que la variabilidad de las observaciones se debe a causas especiales, las cuales deberán investigarse.

Es importante notar que para realizar estos *tests* todas las muestras han de ser del mismo tamaño.

Test 3: seis puntos consecutivos ascendentes o descendentes

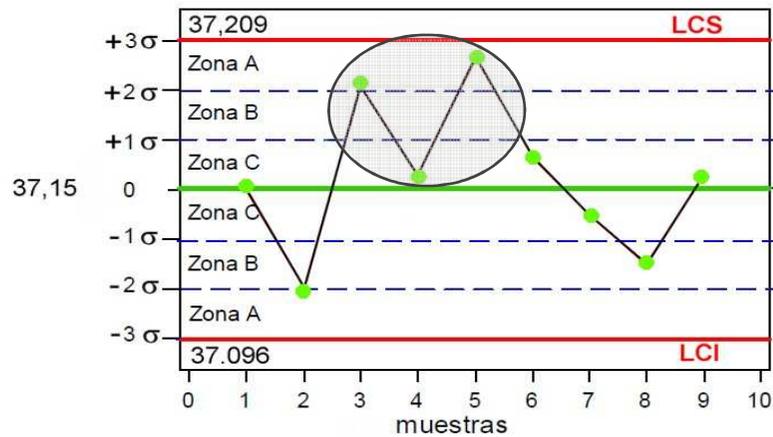
Test 4: catorce puntos consecutivos alternando arriba y abajo



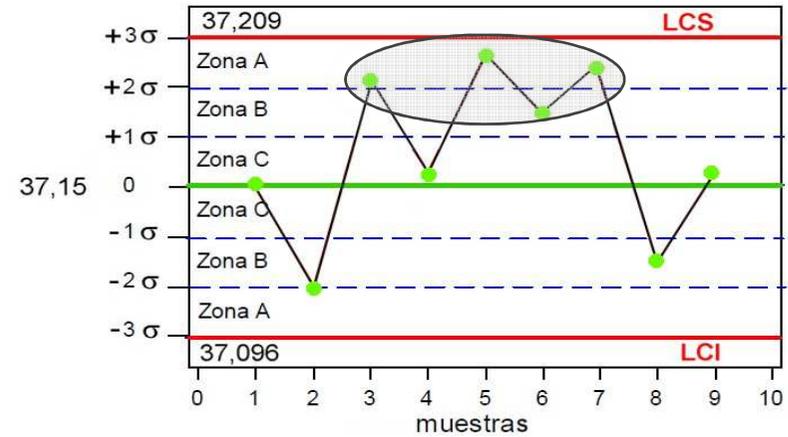
EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Interpretación para el control del proceso

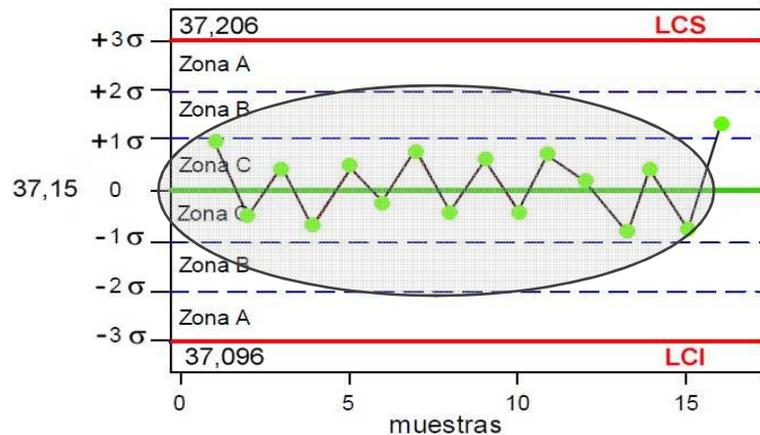
Test 5: dos de tres puntos consecutivos situados más allá de 2 sigmas (mismo lado)



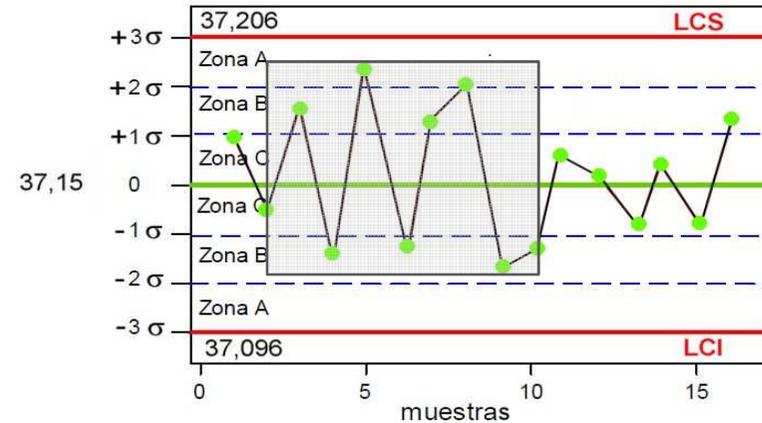
Test 6: cuatro de cinco puntos consecutivos situados a más de un sigma (mismo lado)



Test 7: quince puntos consecutivos situados a menos de un sigma (ambos lados)



Test 8: ocho puntos consecutivos situados a más de un sigma (ambos lados)



EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Capacidad del proceso

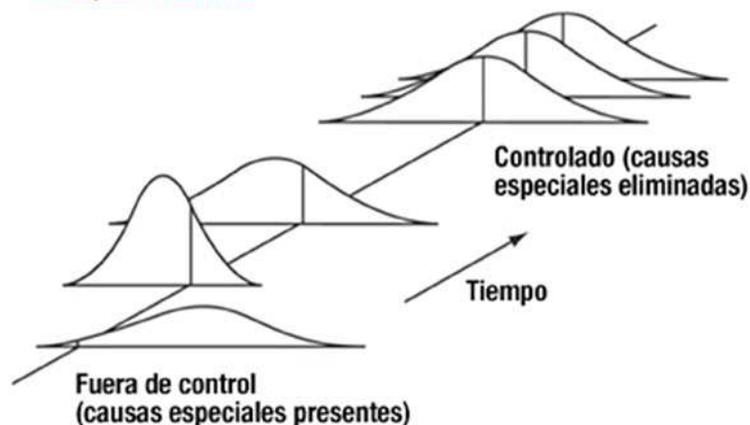
La evaluación de la capacidad del proceso comienza después de la identificación y corrección de las causas especiales (asignables) y cuando los gráficos de control demuestran que el proceso está bajo control estadístico.

A efectos del análisis estadístico, existe una diferencia entre máquinas y procesos:

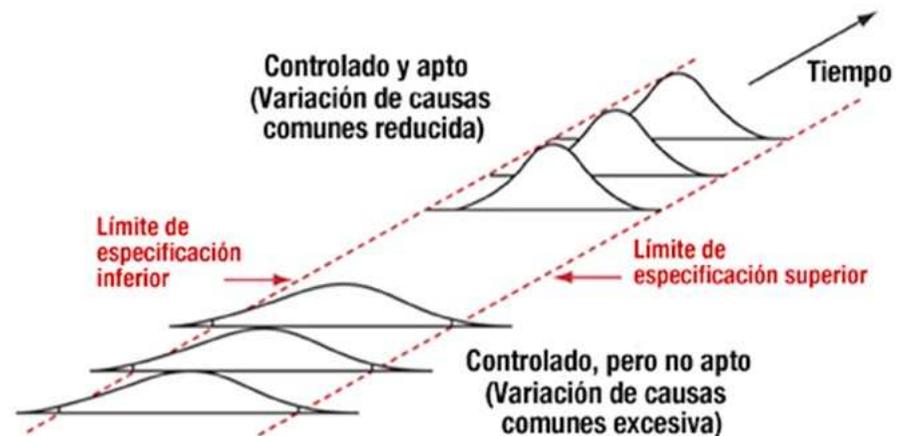
- Las máquinas son consideradas operaciones discretas (un torno, un taladro...)
- Los procesos contienen una combinación de personas, equipos, materiales etc.

Control del proceso

Importante: no hay referencias de especificaciones



Capacidad del proceso



“Control del proceso no es lo mismo que capacidad del proceso”

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Capacidad del proceso

La capacidad es una medida que relaciona el rendimiento de una máquina o proceso con el rendimiento especificado.

La capacidad de una máquina es una medida de las influencias a corto plazo que la máquina sola ejerce sobre la variabilidad del producto. Se requiere como mínimo que $\pm 4 \sigma$ estén contenidas dentro de los límites de especificación (significa que 99,994% de los valores están dentro de la tolerancia. Este requisito más estricto es necesario para asegurar el objetivo de 99,73% ($\pm 3 \sigma$) de la capacidad del proceso a largo plazo.

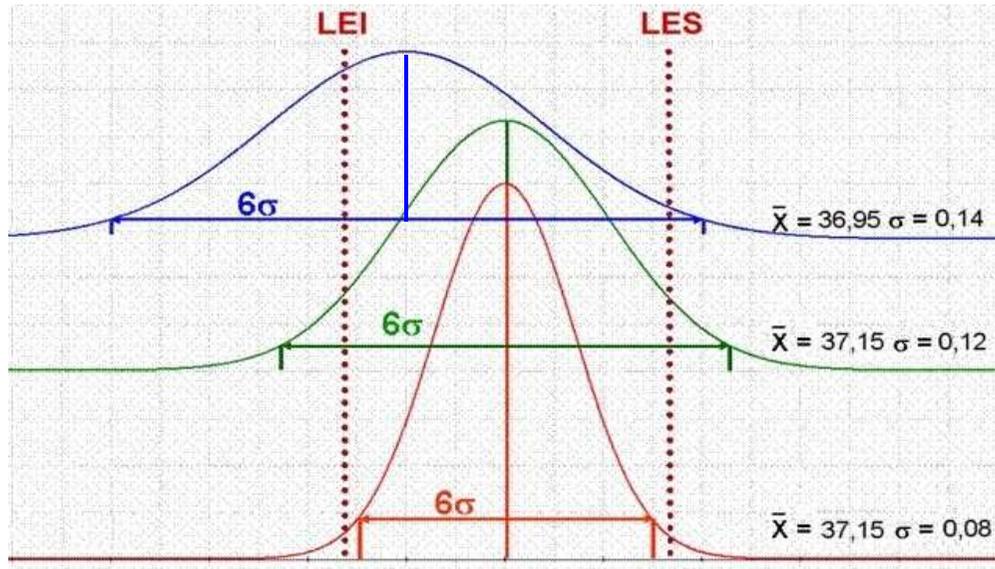
Los **índices de capacidad** son un medio utilizado para indicar la variabilidad de un proceso o máquina en relación a la tolerancia de sus componentes.

Se utilizan los siguientes índices:

Índices de capacidad de proceso C_p y C_{pk}
Índices de capacidad de máquina C_m y C_{mk}

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Capacidad del proceso



El índice de capacidad del proceso C_{pk} indica tanto el ajuste del proceso como su dispersión.

El índice de capacidad del proceso C_p indica la dispersión inherente al proceso

$$C_p = \frac{\text{Tolerancia especificada total}}{6\hat{\sigma}}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

$$= \frac{\text{Límite de especificación superior} - \bar{X}}{3\hat{\sigma}}$$

$C_{pk} = \text{El menor de}$

$$= \frac{\bar{X} - \text{Límite de especificación inferior}}{3\hat{\sigma}}$$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,7	2,85	2,97	3,08
c_4	0,798	0,886	0,921	0,94	0,952	0,959	0,965	0,969	0,973

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Capacidad del proceso

Según los valores de proceso C_p o C_{pk} la capacidad de un proceso se clasifica según el siguiente criterio:

$C \leq 0,67$	Muy malo	
$0,67 < C \leq 1,00$	Malo	El proceso no es potencialmente capaz, la proporción de defectuosos es mayor a 27 en 10.000 (2.700 ppm).
$1,00 < C \leq 1,33$	Regular	El proceso es potencialmente capaz de producir dentro de los límites de especificación y genera un porcentaje de defectuosos menor del 0,27% y mayor que 63 ppm. (Entre $\pm 3 \sigma$ y $\pm 4 \sigma$)
$1,33 < C \leq 1,67$	Mejorable	El proceso es capaz de producir dentro de los límites de especificación y genera un porcentaje de defectuosos menor que 63 ppm. (Entre $\pm 4 \sigma$ y $\pm 5 \sigma$)
$1,67 < C \leq 2,00$	Bueno	(Entre $\pm 5 \sigma$ y $\pm 6 \sigma$)
$C > 2,00$	Muy bueno	Menos que dos unidades defectuosas por billón.

Estos indicadores, referidos a una dispersión de 6 veces la desviación típica ($\pm 3 \sigma$), están internacionalmente reconocidos y permiten así un lenguaje común.

EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LOS PROCESOS (SPC)

Gráficos de control de proceso. Gráficos \bar{X} -R. Caso práctico

PROCESS CAPABILITY ANALYSIS - \bar{X} AND R CHART ANÁLISIS CAPACIDAD DEL PROCESO - Gráfico \bar{X} -R

Part Number:	R621-704	REV	1
Part Description:	Cape Cover		

Comments:	
-----------	--

Nominal dim:	37,15
Lower tol:	-0,30
Upper tol:	+0,30

LSL	36,85
USL	37,15

CONTROL LIMIT FACTOR FOR X =	1,02
CONTROL LIMIT FACTOR FOR R =	2,57
DIVISOR FOR STDEV (d_2) =	1,693

\bar{X}	37,15	LCL _x	37,096
R	0,054	UCL _r	37,206
n	3	UCL _p	0,139

Cp		OK
Cpk L		OK
Cpk U		OK

