

- Para poner en práctica el control de calidad, se tiene que racionalizar la organización.
- La organización es la aclaración de la responsabilidad y la autoridad; no siempre quiere decir establecer una jerarquía de secciones, subsecciones, etc. La autoridad se puede delegar pero no la responsabilidad (sección 1.5.2).
- Si se pone en práctica el control de calidad, quedan claros los deberes de los operarios de línea y del *staff*, se establecen los departamentos técnicos, se establece la tecnología real, y se hace posible la exportación de tecnología.
- Un técnico tiene que ser economista (sección 1.1.4).
- ¡Investigadores, técnicos y diseñadores! ¡Sean humildes! (Secciones 4.7.1 y 4.7.4).
- Las cosas mejoran cuando se hace lo contrario de lo que dicen los ingenieros que se debe hacer (sección 4.13).
- La confianza sin fundamento obstruye el progreso (sección 4.7.1).
- Los que tratan de hacerse un nombre tomando la delantera a otros no hacen más que daño (sección 4.7.1).

(3) Consumidores

- Los consumidores nos proporcionan trabajo.
- Cuando fabrique productos, póngase en el lugar del comprador; pase de un mercado de vendedores a un mercado de compradores.
- El cliente puede ser el rey, pero muchos reyes son ciegos; el *staff de ventas* está obligado a educarlo adecuadamente. ("Falta de conocimiento del producto"; sección 7.7).
- Los consumidores no son conejos de indias (sección 6.3).
- Los pasteles gustan a los que los cocinan, pero no siempre a los que los compran.
- Tragarse las ofensas no es una virtud.
- Comprar barato puede costar caro.
- Las primeras frutas de la temporada siempre son caras.
- Jamás compre productos nuevos (sección 6.3).
- Es la mujer la que desarrolla el control de calidad japonés.

(4) Calidad y Garantía de Calidad

- Mejorar continuamente la calidad siguiendo el ciclo PHCA (sección 1.6.1).
- El diseño de calidad racional es el primer paso del control de calidad.
- Descubrir lo que quiere el consumidor es el primer paso para alcanzar la calidad.
- Identificar lo que el consumidor ha de comprar es el primer paso del control de calidad.
- Una empresa que realiza la inspección del cien por cien es una empresa que hace productos defectuosos.
- El control de calidad orientado a la inspección es control de calidad anticuado.
- Incorporar la calidad durante el proceso (secciones 1.3 y 1.5.2).
- La calidad no se crea por medio de la inspección; se incorpora por medio del diseño y el proceso (secciones 1.3, 15.2 y 6.7).
- El control de calidad que no garantiza la calidad no es control de calidad (sección 6.15).
- La garantía de calidad es el fin y la esencia del CCT (secciones 1.3, 6.1 y 6.15).
- La garantía de calidad es responsabilidad del productor (vendedor, departamento de producción, puesto de trabajo, etc.), no del comprador ni del departamento de inspección (secciones 1.6.1 y 6.1).
- La calidad no se puede definir separada del precio.
- Cuando se inicia el control de calidad, se multiplican los defectos y las reclamaciones (sección 1.4.4).
- Si los jefes se enfadan cuando se producen unidades defectuosas, éstas se ocultan (sección 1.4.4).
- Se tarda años en construir la confianza pero se pierde en un día (sección 6.4).
- ¿A cuántos años equivalen los repuestos que su empresa almacena para el servicio post-venta? (Sección 1.6.2).
- ¡Suministros para toda la vida! (secciones 1.6.2, 6.1 y 6.4).

(5) Diseño y desarrollo de nuevos productos

- Algunas empresas están constituidas para tener éxito cuando introducen nuevos productos; otras no (sección 1.6.2).

- El CCT de una empresa ha llegado a la mayoría de edad si la empresa puede desarrollar nuevos productos y empezar la producción a gran escala a tiempo, si se alcanzan rápidamente y con fluidez los porcentajes de paso directo y los volúmenes de producción, y si las ventas aumentan con regularidad y no hay reclamaciones de los consumidores o están éstos insatisfechos (ver la sección 1.6.2).
- El control de calidad de una empresa ha llegado a la mayoría de edad si sus nuevos productos siempre tienen éxito y los consumidores están contentos y confiados cuando los compran.
- Sea el primero con los nuevos productos; un producto nuevo que no lleva la delantera no es más que una copia.
- Diseñe los productos desde el punto de vista del usuario (sección 7.4).
- No diga jamás: "No pensé que el producto se utilizara así" (sección 7.4).
- Compruebe cuidadosamente las condiciones bajo las que se pueden utilizar sus productos y téngalas presente cuando haga los diseños (sección 7.4).
- Aplique el control de calidad al proceso del diseño tratándolo como si fuera un proceso de producción de productos muy variados y de poco volumen, para producir los planos, que también son unos productos (sección 7.4).
- Fomente la normalización de diseños y el uso de piezas estándar (sección 7.4).
- Haga planos con los que se puedan fabricar los productos sin hacer ningún ajuste (sección 7.4).
- Destruya la actitud de algunos diseñadores satisfechos de sí mismos por ser artistas y de que, por tanto, su trabajo está por encima de toda crítica o sugerencia de los demás.
- No se puede producir un buen diseño sin saber cómo se va a fabricar el producto (sección 4.7.5).
- El diseño no es verdadero diseño a menos que tenga en cuenta el método de fabricación (sección 7.4).
- Dibujar planos hace aparecer errores e incrementa la variedad de piezas. Reduzca el número de horas-hombre gastadas en el diseño en un ochenta por cien (esto también vale para la preparación de programas de ordenador; sección 7.4).
- Se deben determinar estadísticamente las tolerancias y los factores de seguridad (sección 7.4).

- ¿Están de acuerdo los productos piloto con los planos? (Sección 1.6.2).
- El diseño no es diseño a menos que tenga en cuenta los costes (sección 7.4).
- Elija un material peor que otro mejor si da el mismo comportamiento y la misma fiabilidad (análisis del valor; sección 7.4).
- El secreto del éxito del desarrollo de nuevos productos consiste en eliminar rápidamente la escoria (sección 1.6.2).

(6) Normalización

- Normas innecesarias o ambiguas conducen a la normalización porque sí (sección 7.3).
- Las normas que no producen resultados son "normas de papel" solamente; las normas tienen que ser eficaces.
- Una norma que no se haya revisado en seis meses a partir de su preparación es una norma que no se está utilizando (secciones 1.5.2, 5.4.3, 5.4.6 y 7.3).
- Cuando no se revisan las normas, se ha detenido el progreso técnico (secciones 5.4.3 y 5.4.6).
- La normalización no es sólo para control de calidad. Las normas se preparan para asegurar una gestión eficaz y para hacer que el trabajo recompense a todos.
- Una empresa que sostiene que no puede normalizar y que tiene que depender de la experiencia es una empresa sin tecnología.
- La normalización permite que se delegue la autoridad. Esto, a su vez, deja tiempo libre a los directivos para que estudien los planes y políticas futuros, que es su responsabilidad más importante.
- El control de calidad saca lo mejor de las personas. Cuando una empresa lo pone en práctica, desaparecen las decepciones.
- La normalización es tarea de los técnicos. Los técnicos tienen que ser prácticos.
- La tecnología se tiene que normalizar, y se tiene que construir sistemáticamente un cuerpo tecnológico para la empresa (secciones 1.5.2 y 5.4.3).
- Cuando se están redactando las normas, se tienen que solicitar datos a tantas personas afectadas por ellas como sea posible. Es natural seguir las normas y reglamentos impuestos por uno mismo (sección 1.5.2).

- El propósito de la normalización es delegar la autoridad (sección 1.5.2).
- Cuando se planifique la construcción de una nueva fábrica, empezar el trabajo de la planificación del CC y de la normalización al mismo tiempo.
- Duda siempre de la validez de los estándares de los productos, los estándares de los materiales y las tolerancias, y no confíe jamás en los instrumentos de medida o los análisis químicos.
- No se pueden producir productos sin saber qué clase de producto está tratando uno de hacer (sección 1.4.4).
- ¿Está usted satisfecho con que sus productos cumplan las normas? (Sección 1.4.2.)
- ¿Se quejan los consumidores de los productos aunque cumplan las normas? (Sección 1.4.2.)
- ¿Recibe usted reclamaciones sobre puntos no tratados por las normas?
- Las normas de trabajo y los gráficos de control son las dos caras de una misma moneda.

(7) Control y control del proceso

- La única manera de aclarar lo que está sucediendo realmente en el puesto de trabajo es a través del control del proceso. Permitirá el comportamiento óptimo del proceso, establecerá la tecnología y hará que el proceso y el diseño mejoren (sección 1.5.2).
- Un proceso sólo puede alcanzar su comportamiento óptimo cuando está controlado.
- Sólo se puede conseguir una mejora importante cuando se realiza un control adecuado (sección 4.1).
- Las empresas, fábricas y procesos sobre los que no se ejerce ningún control están, sin ninguna duda, fuera de control.
- El control tiene que ser global (secciones 1.4.2 y 1.5.1).
- Siga el ciclo PHCA para mejorar la calidad de todo tipo de trabajo.
- Controle los procesos de todo tipo de trabajo.
- Siga el ciclo PHCA en todo tipo de trabajo.
- Al tratar de ejercer el control se producirán mejoras de forma natural, mientras que al tratar de producir mejoras se demostrará, de forma natural, la importancia del control (sección 1.7.1).
- No confunda la inspección con el control (secciones 1.5.2, 5.2 y 5.3.1).

- El control y la mejora son dos ruedas del mismo carro (sección 1.7.1).
- Comprenda la diferencia entre control y mejora (sección 5.2).
- Comprenda la distinción entre causa y efecto (sección 5.2.1).
- No confunda los medios con los fines (sección 1.9).
- Una empresa que dice: "No tenemos problemas" es la misma que otra que dice: "Tenemos muchos problemas"; ninguna de las dos sabe cuáles de sus problemas son graves (sección 4.3.1).
- El control no puede existir sin políticas, metas y objetivos (sección 7.12).
- La normalización no puede más que avanzar, y el control no puede más que ponerse en práctica cuando se ha decidido la política de dirección.
- Todos los líderes y los que ocupan puestos de responsabilidad tienen una política (sección 1.5.2).
- Sólo se pueden formular políticas correctas basándose en una información correcta.
- ¿Son concretos sus políticas y sus planes? ¿Se dispone de criterios de evaluación? (Sección 7.12.)
- ¿Son buenos sus métodos para desplegar las políticas, y los de comunicación? (Sección 7.12.)
- ¿Están adecuadamente conectadas las políticas de los superiores y las de los subordinados? ¿Es coherente la política desde lo más alto a lo más bajo de su organización? (Sección 7.12.)
- ¿Impregna la política todos los rincones de su organización? (Sección 7.12).
- ¿Se hace la política más específica y concreta cuanto más se baja por la organización? (Sección 7.12.)
- ¿Con cuánta rapidez puede usted actuar con precaución? (Secciones 1.5.2 y 4.2.2.)
- Los problemas graves son pocos, los insignificantes, muchos ("pocos vitales, muchos triviales"; secciones 1.4.4, 1.5.2 y 2.6).
- Usualmente, sólo dos o tres causas importantes afectan gravemente a un trabajo o proceso.
- Nuestro fin es la calidad; tenemos que utilizar tecnología intrínseca, técnicas estadísticas y técnicas de control para su gestión y para promover el CCT eficaz (sección 1.8).
- Una buena normalización y un buen control son imposibles sin una tecnología intrínseca.

- Practique el control prioritario (sección 1.5.2).
- Aclarar quién tiene que verificar qué.
- Los gráficos de control y otros gráficos deben estar a la vista de, y ser usados por, los directivos de todos los niveles.
- El control sin verificación es la forma ideal de control.
- El ámbito de control es de cien personas. Una persona puede controlar a otras cien (e.g., un director de orquesta; sección 1.5.2).
- El control que no comprueba los resultados de los planes, las órdenes y las acciones es un control incompleto.
- Piense siempre qué medida adoptar. El control sin la acción es sencillamente un pasatiempo.
- Cuando los accidentes suceden siempre por las mismas razones, es que no se está ejerciendo el control.
- No confunda la regulación y el ajuste con la eliminación de las causas de las anomalías (secciones 1.5.2 y 5.2).
- En vez de eliminar los síntomas sin más, dé prioridad a eliminar las causas inmediatas y las causas básicas, y en evitar que se repitan los síntomas.
- Errar es humano. Está mal enfadarse por las equivocaciones de los subordinados (sección 1.5.2).
- Cuando un operario comete una equivocación, usualmente tiene de un cuarto a un quinto de culpa, y la dirección tiene de tres cuartos a cuatro quintos de culpa (sección 1.5.2).

(8) Análisis y mejora

- Sin un análisis adecuado y unos conocimientos técnicos fiables, no se puede llevar a cabo la normalización ni las mejoras, no se puede efectuar un buen control y no se pueden preparar gráficos de control adecuados para el control (secciones 4.1 y 4.6.1).
- El buen control de calidad es imposible sin una tecnología intrínseca. Los motores que impulsan la búsqueda de las causas de los defectos son la investigación, la tecnología y la habilidad (i.e., experiencia y formación). Sin embargo, la tecnología mejorará espectacularmente cuando se realicen los análisis de calidad y de proceso según el enfoque del CC, utilizando métodos estadísticos (secciones 1.8 y 4.7.1).
- La buena normalización y el buen control son imposibles sin el análisis del proceso.

- Cuando usted cree que no tiene problemas, se detiene el avance y se empieza a ir marcha atrás (sección 1.7.1).
- No se puede resolver un problema si no se comprenden los puntos clave y los objetivos (sección 4.4).
- Cuando se comprenden los puntos y objetivos, el problema ya está medio resuelto (sección 4.4).
- Determinar los problemas prioritarios y atacarlos en masa.
- Los ingenieros deben acometer los problemas cuya solución vaya a ahorrar por lo menos un millón de dólares anuales (como en 1987).
- Rendirse es el enemigo de la mejora y de los progresos.
- Antes de pensar en las causas, identifique primero los hechos. Este es el primer paso de la puesta en práctica del control de calidad.
- Un buen control del proceso es imposible sin un análisis sólido del proceso (sección 5.1).
- Si no se pueden utilizar gráficos de control, es porque faltan la tecnología real y el análisis del proceso (sección 4.1).

(9) Datos y métodos estadísticos

- Es imposible un buen control de calidad sin conocer los métodos estadísticos.
- La dispersión existe en todos los tipos de trabajo.
- La base del control son unos datos y una información exactos. ¡Abolir los datos falsos!
- Los datos son para usarlos y actuar sobre ellos. No recoja datos sin que vayan acompañados de la acción.
- De ahora en adelante los métodos estadísticos son una parte esencial de los conocimientos de todos los técnicos.
- La discusión basada únicamente en la tecnología intrínseca y la experiencia es como ir de Tokio a Kioto en un palanquín. El uso de los métodos estadísticos conjuntamente con éstos es como hacer el mismo viaje en el tren de alta velocidad.
- Son imposibles una buena normalización y un buen control sin técnicas estadísticas.
- El noventa y cinco por cien de los problemas de una empresa se pueden resolver utilizando métodos estadísticos sencillos.
- Casi todos los problemas se pueden resolver con gráficos de Pareto y diagramas de causa y efecto.

- El control y el análisis buenos son imposibles sin una buena estratificación (secciones 1.5.2 y 2.2).
- Cuando emergen datos falsos del puesto de trabajo, es culpa de los que están a su cargo.

(10) Gráficos de control y capacidad del proceso

- El control de calidad empieza y termina con los gráficos de control.
- Los gráficos de control no se deben utilizar para examinar a las personas. Deben utilizarse para ayudar a las personas en su trabajo y hacer que éste vaya mejor (sección 5.6.2).
- El control conduce a la predecibilidad y la fiabilidad (sección 6.5).
- El estado del control estadístico mismo es el problema básico de la fiabilidad (sección 6.5).
- La investigación de la capacidad del proceso (calidad) es el fundamento del control de calidad (sección 4.7.6).
- ¿Cómo puede ponerse en práctica el control de calidad si no se conoce la capacidad del proceso? (Sección 4.7.6.)
- ¿Cómo se puede diseñar un producto sin conocer la capacidad del proceso? (Secciones 4.7.6, 5.2 y 7.4.)
- ¿Cómo se pueden establecer estándares de materiales sin conocer la capacidad del proceso?
- Las capacidades de los procesos mejoran muchísimo cuando se investigan adecuadamente (sección 1.6.4).

(11) Actividades de los círculos de CC

- El control de calidad sólo tiene éxito cuando los encargados y los operarios de línea se responsabilizan de sus procesos.
- Las actividades de los círculos de CC no se pueden mantener vivas a menos que sean promovidas como parte integral del CCT.
- Un malentendido corriente es que llevar a cabo actividades de los círculos de calidad es lo mismo que poner en práctica el CCT (secciones 1.1.3 y 1.10).
- Un malentendido corriente es que las campañas de CC consisten en actividades de los círculos de CC (secciones 1.1.3 y 1.10).
- Un malentendido corriente es que las actividades de los círculos de CC son un modo de dirigir a la mano de obra (sección 1.10).

- Las actividades de los círculos de CC y las de los equipos de CC son diferentes (sección 4.5.2).

(12) Ventas y otras actividades

- Las ventas son la puerta de entrada y de salida del CCT (secciones 1.6.2 y 7.7).
- Una empresa cuyas actividades de venta no desarrollan la conciencia del CC no crecerá.
- ¿Ha tenido éxito su empresa en el desarrollo de varios nuevos productos a partir de las sugerencias hechas por el departamento de ventas? (Sección 1.6.2.)
- Si usted piensa que las ventas no tienen relación con el CCT, usted no comprende el CCT ni el CC.
- Para vender cosas baratas no hacen falta actividades de ventas. Venda por la calidad (sección 7.7).
- Los vendedores jamás deben decir cosas como: "Este producto es absolutamente seguro" (sección 6.6).
- Si se lleva a cabo un control de costes adecuado, el efecto del control de calidad mejorará rápidamente.
- Si el control de calidad se hace bien, el control de costes se convertirá en un control de costes real.
- Una empresa bien controlada es aquella en la que no se revisan los planes de producción.
- Cuando se lleva a cabo el control de calidad, el control de la mano de obra va bien. Cuando mejora el control de la mano de obra, el control de calidad va bien. ¿Cómo se puede hacer el control de calidad sin conocer las cifras verdaderas?
- Antes de introducir máquinas y equipos nuevos, utilice las capacidades completas de lo que ya tiene (sección 1.6.4).
- CCT quiere decir usar las capacidades de las maquinarias y equipos viejos, cualitativa y cuantitativamente (sección 1.6.4).
- Tecnología quiere decir usar materiales malos para hacer buenos productos (sección 5.2.1).
- ¿Qué dicen los buenos vendedores?

El enfoque estadístico y algunas herramientas estadísticas sencillas

2.1 Métodos estadísticos utilizados en el Control de Calidad

Empecé a estudiar los métodos estadísticos en 1948 porque creía que las personas que tienen que emitir juicios basándose en los datos debían dominar los métodos y la filosofía estadísticos. Desde entonces, he obtenido resultados excelentes con mis esfuerzos por difundir ampliamente el uso de los métodos estadísticos, no sólo para el control de calidad sino también para la gestión empresarial. Como consecuencia de la enorme experiencia que he adquirido haciendo esto, generalmente me es más fácil enseñar los métodos estadísticos bajo los siguientes encabezamientos:

- 1) El enfoque estadístico (ver la sección 2.2).
- 2) La teoría estadística.
- 3) El uso de los métodos estadísticos (introductorio, intermedio y avanzado).

Ya que es esencial la comprensión del enfoque estadístico, se tiene que enseñar a todo el mundo, y todo el mundo tiene que adquirir un mínimo de conocimientos sobre estadística. La teoría estadística no se debe enseñar en la etapa introductoria, y sólo deben tocarse unos pocos de los aspectos más básicos en la etapa intermedia. Acometo la teoría con un poco más de detalle en la etapa avanzada. Las personas que trabajan en empresas o en la sociedad en general no tienen que convertirse en estadísticos especialistas; es suficiente con que sean capaces de utilizar con habilidad las herramientas conocidas como "métodos estadísticos". Pasa lo mismo con las herramientas conocidas co-

mo "instrumentos de medida"; hasta los operarios corrientes son perfectamente capaces de utilizarlos en las fábricas, sin conocer la teoría de la metrología. Sin embargo, las personas que están a cargo de planificar la instalación del equipo de medidas tiene que conocer algo de la teoría metrológica, mientras que las personas que investigan, diseñan y desarrollan los instrumentos de medida tienen que estudiar metrología en profundidad.

Hay que tener precaución, ya que las personas quieren a menudo estudiar la teoría estadística cuando empiezan a estudiar los métodos estadísticos, pero los aficionados que se quedan fascinados con el estudio de la teoría estadística acaban por no ser ni buenos teóricos ni buenos practicantes. Los métodos estadísticos son su meta, pero se olvidan de utilizarlos como herramientas o son incapaces de utilizarlos adecuadamente, y al mismo tiempo suelen dejar que la teoría y los métodos dicten sus acciones en vez de ser al revés.

(1) Herramientas estadísticas

La estadística y los métodos estadísticos siguen haciendo grandes progresos, pero no es necesario saberlo todo para promover el control de calidad y la gestión empresarial. Por el contrario, de hecho, puede ser perjudicial enseñar demasiadas cosas y los cursos de métodos estadísticos deben dividirse en tres grados, introductorio, intermedio y avanzado, para acomodarse al nivel de los estudiantes, teniendo en cuenta las condiciones reales de los puestos de trabajo en los que los métodos se vayan a utilizar. Este libro sólo trata los métodos introductorios y algunos intermedios; aquellas personas que deseen estudiar los demás métodos deben consultar trabajos más especializados.

Las herramientas estadísticas introductorias (dirigidas a todos los empleados, desde la alta dirección hasta los operarios de base, pasando por los directivos medios) abarcan:

- 1) Los diagramas de Pareto (ver la sección 2.5).
- 2) Los diagramas de causa y efecto (no son estrictamente una herramienta estadística).
- 3) La idea de estratificación (mencionada en todos los capítulos).
- 4) Hojas de comprobación (ver la sección 2.6).
- 5) Histogramas y distribuciones de frecuencia (ver las secciones 2.5, 2A.2 y 2A.3).
- 6) Diagramas de dispersión (ver las secciones 2.8 y 4A.8) (los conceptos de correlación y regresión).
- 7) Gráficos y gráficos de control (ver la sección 2.7 y el Capítulo 3).

La característica que tienen en común las Siete Herramientas del CC anteriores es que todas son visuales, que tienen forma de gráficos o diagramas. Se

les llamó las Siete Herramientas del CC en memoria de las famosas siete armas del guerrero-sacerdote japonés de la era Kamakura, Benkei, que le permitieron triunfar en las batallas; así también, las Siete Herramientas del CC, si se utilizan hábilmente, permitirán que se resuelva el noventa y cinco por cien de los problemas de los puestos de trabajo. En otras palabras, las herramientas estadísticas intermedias y avanzadas se necesitan sólo en un cinco por cien de los casos.

Igualmente, cuando uno está enseñando las siete herramientas, es demasiado tratar de enseñarlas todas al mismo tiempo. Se debe enseñar primero las herramientas de la 1 a la 4 o 5, y las demás se pueden enseñar cuando los estudiantes hayan aprendido a utilizar aquellas adecuadamente y quieran aprender más. Es erróneo tratar de enseñar demasiadas herramientas desde el principio.

Además de los métodos introductorios, deben enseñarse los métodos intermedios (dirigidos a los ingenieros en general y a los supervisores jóvenes) siguientes:

- 1) Distribución de los estadísticos, estimación estadística y pruebas estadísticas.
- 2) Estimación del muestreo, teoría del error estadístico, y aditividad de la varianza.
- 3) Inspección por muestreo estadístico.
- 4) El uso del papel probabilístico binomial.
- 5) Una introducción al diseño de experimentos (uso simple de la disposición ortogonal incluyendo las tablas de contingencia; análisis de la varianza).
- 6) Correlación simple y análisis de regresión.
- 7) Técnicas sencillas de fiabilidad.
- 8) Métodos sencillos de ensayos sensoriales.

Considero que, de ahora en adelante, los métodos anteriores serán conocimientos esenciales para los ingenieros. Sin embargo, dependiendo de los estudiantes, se pueden dejar fuera algunos de los ocho métodos anteriores. Cuando una persona pueda utilizar todos los métodos anteriores con soltura, se habrá convertido en un ingeniero hecho y derecho, y será capaz de resolver muchos problemas.

Para el nivel avanzado (dirigido a ingenieros especialistas y a algunos ingenieros de control de calidad), se deben enseñar los métodos siguientes además de los métodos introductorios y los intermedios:

- 1) Diseño avanzado de experimentos.
- 2) Análisis multivariante.
- 3) Técnicas avanzadas de fiabilidad.

- 4) Métodos avanzados de ensayos sensoriales.
- 5) Análisis de series temporales, métodos de investigación operativa
- 6) Otros métodos.

Los métodos anteriores deben enseñarse a personas seleccionadas, conforme sea menester. También deben enseñarse junto con el uso de los ordenadores.

(2) ¿Dónde se utilizan las herramientas estadísticas?

En el control de calidad por toda la empresa al estilo japonés, las herramientas estadísticas se usan ampliamente en una gran variedad de campos y en todos los niveles organizativos. Los japoneses son los mejores del mundo en esto, y es una de las razones principales por la que los productos japoneses dominan ahora los mercados mundiales. Por medio del uso amplio de las herramientas del nivel introductorio en combinación con la tecnología específica, en todos los departamentos y en todos los niveles organizativos, así como el uso de herramientas más avanzadas en combinación con los ordenadores y la tecnología específica, se realizan diversos análisis y se obtienen resultados excelentes. Por sí mismas, las herramientas estadísticas son inútiles; sólo pueden dar resultados significativos cuando se utilizan en combinación con la tecnología específica, i.e., la teoría, la tecnología y la experiencia concerniente al trabajo que se está realizando.

En el control de calidad y la gestión empresarial, se utilizan las herramientas estadísticas en las siguientes áreas:

- 1) Estudios: estudios de mercado, estudios de métodos de medida.
- 2) Establecimiento de políticas y de objetivos.
- 3) Análisis y mejora: análisis de procesos y análisis de calidad.
- 4) Control y gestión: control de procesos, gestión del trabajo, gestión empresarial.
- 5) Garantía de calidad e inspección: garantía de calidad (incluyendo la garantía de la fiabilidad), inspección por muestreo estadístico, control de la inspección.

2.2 El enfoque estadístico

La ciencia estadística ha hecho enormes progresos recientemente y todavía sigue avanzando. Es un campo de estudio bastante prohibitivo pero no tenemos que conocer la teoría para poner en práctica el control de calidad; es bastante si comprendemos la filosofía así como los métodos. Como mínimo, de-

bemos comprender la filosofía. Si vamos detrás de la teoría y los métodos sin comprender el enfoque estadístico básico, no estaremos más que jugando con números y fórmulas.

En esta sección me gustaría centrarme en el enfoque estadístico desde el punto de vista del control de calidad y en la aplicación de los métodos estadísticos a las empresas corrientes.

2.2.1 El enfoque estadístico

Para empezar, debemos comprender las cuatro cosas siguientes sobre el enfoque estadístico:

1) Los resultados de cualquier trabajo que hagamos siempre contienen variación, y su distribución sigue un cierto patrón. El trabajo humano y los procesos industriales están afectados por un número casi infinito de factores diferentes, y el muestreo, las medidas, los ensayos y los estudios también están todos sujetos a error. Esto quiere decir que, inevitablemente, los datos contienen dispersión y que la distribución de los resultados del trabajo y de los procesos que producen los datos siguen un cierto patrón. Se tiene que tener en cuenta este patrón de la distribución cuando se emitan juicios sobre un proceso que forma parte del control del proceso, por ejemplo, ya que todos los procesos tienen sus propios patrones de distribución.

2) El error es un concepto básico; los datos producidos por las empresas y las organizaciones de la sociedad incluyen datos contaminados, valores anómalos y datos falsos.

3) Los datos siempre se recogen con la intención de acometer acciones. La estadística moderna se puede llamar "ciencia de acción" desde un punto de vista, ya que apunta a obtener datos exactos adecuados al fin, analizarlos estadísticamente y acometer acciones (el objeto del ejercicio).

4) La estratificación es otro concepto básico; todo debe pensarse de manera estratificada, y todo tiene que estar estratificado (i.e., segregado en ramas o grupos significativos) para recoger y analizar los datos. La estratificación de los datos individuales y básicos de varias maneras puede revelar esta dispersión y sus causas.

En esta sección me gustaría centrarme en la primera y la tercera de las cuatro ideas anteriores.

(1) La meta de la recogida de datos es entrar en acción

Cuando se recogen datos, siempre hemos de tener algún fin en mente; siempre hemos de tener la intención de examinarlos y entrar en acción. En

otras palabras, no tenemos que recoger datos que no se vayan a utilizar. El fin de recoger datos debe ser usualmente uno de los siguientes:

- a) para el análisis o el estudio;
- b) para el control:
 - i) para establecer políticas,
 - ii) para efectuar ajustes,
 - iii) para comprobar;
- c) para la inspección.

Por ejemplo, cuando medimos la humedad y ajustamos una válvula, comprobamos la calidad de un producto para ver si el diseño y la producción avanzan con fluidez, o comprobamos la calidad, las cantidades vendidas, los porcentajes de beneficios, etc., para ver si un negocio se está gestionando con habilidad, tenemos que recoger datos. Sin embargo, las oficinas y las fábricas japonesas tienen hoy un montón de datos cuyo propósito no está claro y que no están acompañados de ninguna acción. Antiguamente, gran parte de los datos recogidos eran simplemente para estar más seguros, para los historiales, para preparar la contabilidad o para la inspección.

Lo primero que debemos hacer es mirar todos los datos que estamos recogiendo y volver a examinar el propósito de su recogida. Uno de los primeros pasos del enfoque estadístico es que recordemos bien que no recogemos datos por sí mismos sino para utilizarlos y entrar en acción. El simple hecho de reflexionar sobre este punto cambiará completamente la forma en que se recogen los datos. Usualmente se acumulan grandes cantidades de datos innecesarios, gran parte de ellos simplemente con el propósito de que la gente se quede tranquila. Debemos revisar nuestros sistemas de responsabilidad y autoridad para recoger datos y abolir, en la medida de lo posible, la recogida de datos detallados.

El paso siguiente del enfoque estadístico es recoger "datos de las acciones" de este modo en varios campos y examinar cómo crear una red para recoger información, proveer retroalimentación y utilizar los datos con vistas a las acciones. Estos puntos deben examinarse junto con los sistemas de información.

(2) Hay una relación entre los datos, la muestra y la población (el fin de la acción)

No recogemos datos para adquirir conocimientos sobre las muestras y actuar con respecto a ellas; lo hacemos para obtener información sobre la población de la que se han tomado las muestras y actuar con respecto a ella.

Algunas cuestiones sobre la toma de muestras de productos acabados o semiacabados, y las mediciones hechas con esas muestras son las siguientes:

- (a) Sacamos una muestra de un producto con el objeto de descubrir cosas sobre el lote y actuar con respecto a ese lote. Obviamente, no acometemos acciones ni realizamos experimentos simplemente para adquirir conocimientos sobre una muestra.
- (b) Jamás se pueden eliminar completamente las omisiones en la inspección ni los errores de medida. Esto quiere decir que los datos obtenidos de una muestra jamás representarán los valores verdaderos del lote, aunque el lote se someta a una inspección del cien por cien. Por ejemplo, trate de contar las letras "d" que hay en una página de éste libro en cinco minutos. Ahora trate de contarlas otra vez. No es probable que obtenga el mismo número. Hasta la inspección del cien por cien está siempre sometida a error. Así pues, estamos tratando de descubrir cosas sobre los lotes y procesos, y de entrar en acción con respecto a los mismos a través de un velo de errores de medida, de muestreo, experimentales y otros.
- (c) Ensayar los productos producidos por un proceso quiere decir recoger datos con objeto de descubrir el estado del proceso.
- (d) Recopilar números con los resultados diarios o mensuales quiere decir recoger datos con objeto de comprobar si el proceso de gestión de una empresa o una fábrica va bien, y entrar en acción si es menester.
- (e) Cuando se realiza un experimento para obtener datos también se pretende no solamente obtener los datos de ese experimento, sino recoger los datos con objeto de descubrir los valores reales bajo condiciones

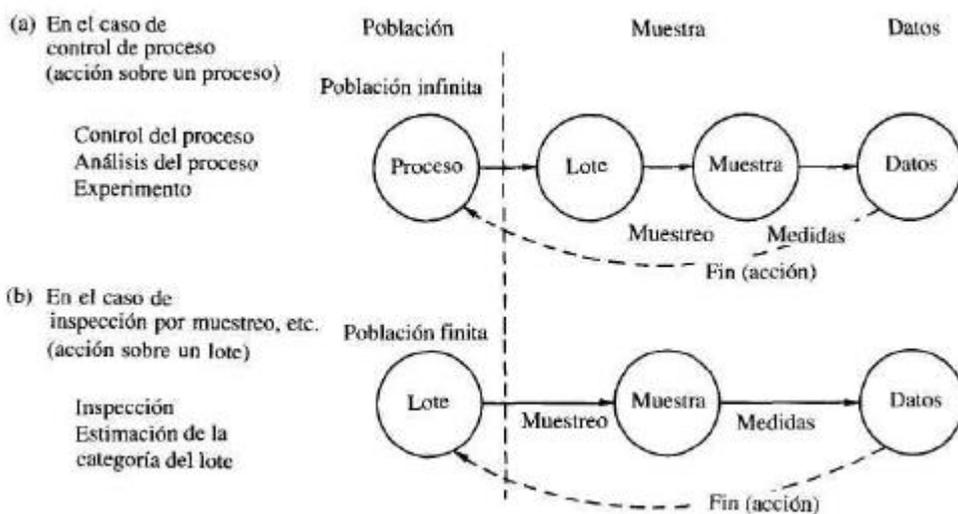


Figura 2.1: Poblaciones y muestras

tales como las experimentales y decidir si se pueden usar o no esos valores.

Nuestro fin es, así pues, obtener información sobre lotes de producto acabado o inacabado, sobre el estado de un trabajo o proceso, o sobre los valores reales bajo ciertas condiciones experimentales, y realizar la acción adecuada. Éstas son las entidades en las que estamos interesados; en estadística se llaman "poblaciones" o "universos". En resumen, sacamos muestras y tomamos medidas con objeto de descubrir cosas sobre las poblaciones y actuar con respecto a ellas. La relación entre los datos, la muestra y la población está dibujada en la Figura 2.1.

En el control del proceso, tratamos de controlar un proceso con objeto de producir productos buenos; por tanto, siempre tenemos que pensar en el proceso como si fuera la población. Cogemos un lote o parte de un lote (i.e., cualquier cosa que pasemos de nuestra área de responsabilidad a la siguiente persona responsable) como muestra de la población que nosotros llamamos "proceso", y medimos sus características con objeto de comprobar si el proceso (la población, i.e., la forma como estamos llevando a cabo nuestro trabajo) va bien o no. Luego tratamos de actuar racionalmente con respecto al proceso. Tratamos de llevar la población, que llamamos "proceso", a un estado controlado y mantenerla así antes de que produzca productos malos, para que produzca productos buenos. Igualmente, cuando se realiza un experimento y se alteran las condiciones deliberadamente, los datos estarán dispersos como consecuencia de los diversos errores presentes. Puede que la población tenga una distribución diferente para dos conjuntos diferentes de condiciones experimentales, y se realiza el experimento con objeto de descubrir la diferencia entre las dos distribuciones de la población y seleccionar el mejor conjunto de condiciones. Igualmente, en la inspección por muestreo, se sacan muestras de una población llamada "lote" con objeto de decidir si ese lote se debe aceptar o rechazar.

Como indica el diagrama, una población puede ser o bien una "población finita", que se considera que consiste en un número finito de elementos, o una "población infinita", que se considera que consiste en un número infinito de elementos. En el control del proceso o en los experimentos, lo que se conoce como "proceso", i.e., el trabajo realizado bajo unas normas operativas establecidas, es lo que se considera como población. Ya que semejante proceso es teóricamente el origen de un número infinito de productos, se trata estadísticamente como si fuera una población infinita, y los lotes de producto que diariamente surgen de él se consideran como muestras de esta población.

(3) Todos los datos son dispersos

Los datos que obtenemos siempre están dispersados y nunca tienen un único valor constante. Si en un grupo de datos, todos tuvieran el mismo valor, en la mayoría de los casos sería falso; de hecho, los datos que no están dispersados son inútiles. Por ejemplo, si sacáramos muestras de un producto determinado y midiéramos su resistencia, los resultados que obtendríamos estarían dispersados, e.g., 25, 20, 28, 30, 32 kg/cm². Antiguamente, hubiéramos sacado la media de estos valores, 27,0 kg/cm², y hubiéramos basado nuestros juicios en ella. En otras palabras, nuestros pensamientos estaban confinados al mundo de las medias. Hoy en día también tenemos en cuenta la dispersión. En otras palabras, entramos en el mundo de la dispersión cuando estimamos la calidad de un lote y decidimos si aceptarlo o rechazarlo o cuando juzgamos si hay una anomalía presente o no en un proceso o trabajo. En la terminología estadística, a esto se le llama "probar o contrastar hipótesis".

El número de factores que causan la dispersión en cualquier proceso industrial es teóricamente infinito. Puesto que sólo podemos controlar una pequeñísima fracción de éstos por medio de la tecnología, inevitablemente habrá dispersión en las características de los productos de nuestros procesos. El muestreo y las mediciones también están sometidas a error, y los resultados siempre estarán dispersos incluso si se mide la misma cosa varias veces. ¿Qué sucede si simplemente aceptamos esta dispersión tal como resulta?

(a) Identificar una distribución

Cuando los datos están dispersos, la dispersión sigue un cierto patrón. En otras palabras, la población (e.g., un proceso) de la cual proceden los datos también tiene una distribución. Si medimos el grosor de doscientas planchas de acero laminado, por ejemplo, obtendremos la clase de resultados mostrada en la Tabla 2.1.

Estos datos no nos dicen nada por sí mismos, pero si los dividimos en clases o "celdas" de 0,03 mm de anchura, e.g., 3,695-3,725 mm, 3,725-3,755 mm, etc., y contamos el número de medidas en cada celda, obtenemos la Tabla 2.2. Ésta se llama "tabla de distribución de frecuencias". Ordenando los datos como en esta tabla, se aclara la forma en que los datos están dispersos, i.e., la forma de su distribución. Normalmente, es posible ver la forma general de una distribución si se recogen cien o más valores y se prepara una tabla de distribución de frecuencias con diez o veinte celdas.

La distribución se puede ver aún con mayor claridad en forma de diagrama (Figura 2.2¹). Esta clase de diagrama de datos se llama histograma.

¹

Ver los detalles de cómo preparar la distribución de frecuencias en la sección 2A. 1.

Tabla 2.1: Espesor de las planchas de acero (unidad: mm)

3,88	3,88	3,84	3,82	3,83	3,93	3,86	3,84	3,90	3,97
3,84	3,85	3,90	3,87	3,94	3,89	3,87	3,87	3,86	3,87
3,84	3,84	3,85	3,88	3,89	3,96	3,84	3,79	3,81	3,84
3,88	3,83	3,84	3,85	3,93	3,81	3,87	3,83	3,89	3,87
3,81	3,91	3,90	3,86	3,83	3,90	3,87	3,90	3,86	3,86
3,78	3,92	3,98	3,74	3,88	3,81	3,94	3,91	3,97	3,75
3,88	3,94	3,90	3,88	3,85	3,87	3,90	3,78	3,86	3,87
3,88	3,79	3,80	3,80	3,79	3,82	3,86	3,84	3,92	3,83
3,90	3,90	3,83	3,84	3,95	3,84	3,97	3,89	3,86	3,90
3,84	3,81	3,84	3,98	3,99	3,86	3,85	3,79	3,87	3,78
3,93	3,84	3,88	3,85	3,91	3,89	3,84	3,88	3,89	3,97
3,83	3,90	3,93	3,87	3,90	3,92	3,91	3,70	3,79	3,73
3,97	3,89	3,78	3,83	3,87	3,90	3,84	3,76	3,81	3,82
3,85	3,83	3,81	3,83	3,76	3,77	3,90	3,79	3,83	3,90
3,89	3,86	3,84	3,89	3,83	3,80	3,86	3,80	3,89	3,83
3,90	3,77	3,79	3,83	3,85	3,85	3,89	3,84	3,83	3,95
3,88	3,87	3,81	3,91	3,89	3,84	3,79	3,86	3,78	3,89
3,81	3,77	3,73	3,85	3,80	3,77	3,78	3,83	3,75	3,83
3,94	3,90	3,75	3,77	3,83	3,79	3,86	3,89	3,84	3,99
3,83	3,94	3,84	3,93	3,85	3,79	3,84	3,88	3,83	3,80

Tabla 2.2: Tabla de la distribución de frecuencias

Núm. celda	Fronteras celda	Punto medio celda	Recuento	Frecuencia	Frecuencia relativa %	Frecuencia acumulada
1	3,395–3,725	3,710	/	1	0,5	1
2	3,725–3,755	3,740	///	6	3,0	7
3	3,755–3,785	3,770	/// //	13	6,5	20
4	3,785–3,815	3,800	/// // // //	25	12,5	45
5	3,815–3,845	3,830	/// // // // // // // //	45	22,5	90
6	3,845–3,875	3,860	/// // // // // // // // //	37	18,5	127
7	3,875–3,905	3,890	/// // // // // // // // //	43	21,5	170
8	3,905–3,935	3,920	/// // //	13	6,5	183
9	3,935–3,965	3,950	/// //	8	4,0	191
10	3,965–3,995	3,980	/// //	9	4,5	200
				200	100,0	200

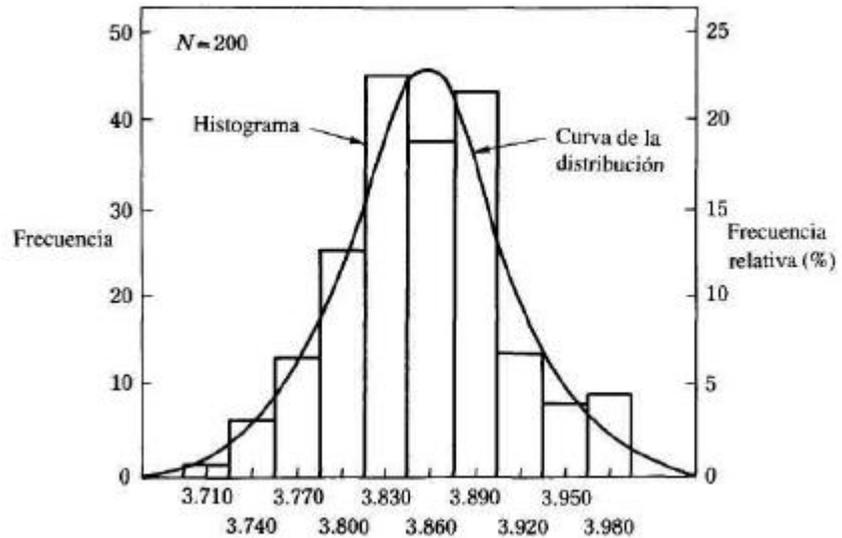


Figura 2.2: Histograma del espesor de las planchas de acero

El histograma muestra claramente que el grosor de las láminas de acero sigue una distribución. Siendo así, ¿qué clase de población es el proceso que hizo las láminas? Podemos considerar que tiene la clase de distribución que se obtendría si se tomara un número infinito de estas medidas; por ejemplo, la clase de distribución mostrada por la curva de la Figura 2.2. La cuestión es que la población sigue cierta distribución. Cuando juzgamos si nuestro trabajo se está haciendo bien o no, siempre debemos recordar que la población -el proceso- y, por tanto, los productos que surgen de ese proceso, siguen una distribución.

(b) La expresión cuantitativa de las distribuciones

Para la expresión cuantitativa se usan medidas tales como la media, el recorrido, la desviación estándar, la varianza, etc. (Ver las secciones 2.3 y 2A.2.)

(4) Muestreo aleatorio

El que una población tenga una distribución quiere decir que tenemos que tener cuidado en sacar las muestras al azar. Por ejemplo, si la superficie de un producto pulido tiene áreas buenas y áreas malas, que los operarios experimentados pueden distinguir, el operario probablemente quiera elegir de muestra las áreas buenas. Los inspectores, por otra parte, prefieren las áreas malas. Tales muestras no son aleatorias y no se puede decir que representen fielmen-

te el proceso del cual se sacan. Elegir deliberadamente muestras buenas o malas no es un muestreo aleatorio.

Sacamos muestras con objeto de descubrir el estado de un proceso; por tanto, generalmente es insatisfactorio dejar que las personas elijan las muestras; es mejor sacar las muestras al azar. Además, la teoría estadística nos dice qué clase de valores y distribuciones deben tener la media, el recorrido, la desviación estándar y otros estadísticos de la muestra cuando se realiza el muestreo aleatorio (ver la sección 2A.3, Distribución de los estadísticos), y realizamos un muestreo aleatorio y evaluamos los datos con arreglo a los principios de la distribución de los estadísticos.

El muestreo aleatorio es fácil de entender pero no tan fácil de llevar a cabo; en la práctica, sin embargo, sacar muestras de un producto a unos intervalos de tiempo fijos es, generalmente, una buena aproximación al muestreo aleatorio.

El muestreo aleatorio es el factor más importante de la puesta en práctica del control de calidad u otros tipos de control que utilicen métodos estadísticos. Si no se hace correctamente, los resultados obtenidos no tendrán prácticamente ningún significado, independientemente de que posteriormente se hagan muchos análisis estadísticos con los datos.

(5) Los dos tipos de causas de dispersión en los procesos

Hay dos tipos de causas que afectan a los procesos y ocasionan la variación del producto, y también hay, por tanto, dos tipos de variación. Un tipo de causas es el que hace aparecer la variación en el producto (el resultado del proceso) aunque todas las personas relacionadas con el proceso trabajen siempre en él exactamente igual, y todo el mundo trabaje correctamente, *Le.*, de acuerdo con la norma.

Éstas son las causas que todavía no están bajo control técnico, pero están presentes teóricamente en un número casi infinito. Se llaman causas inevitables o "causas de azar", y la variación producida por ellas se llama "variabilidad controlada". Como directivos, no podemos culpar de ellas a nuestros trabajadores basándonos en las normas de trabajo o los planos actuales.

Por el contrario, el otro tipo de causas es el que produce alguna anomalía en el proceso y origina una variación particularmente grande, *e.g.*, cuando sucede algo que no está previsto por las normas de trabajo o no se siguen éstas. Tales causas se pueden eliminar por medio de la tecnología si todo el mundo implicado hace un esfuerzo cooperativo; se llaman causas evitables o "causas asignables", y la variación debida a ellas se llama "variabilidad incontrolada". Si las normas de trabajo y otras normas fueran perfectas, la presencia de la variabilidad incontrolada querría decir que los operarios no estaban haciendo lo

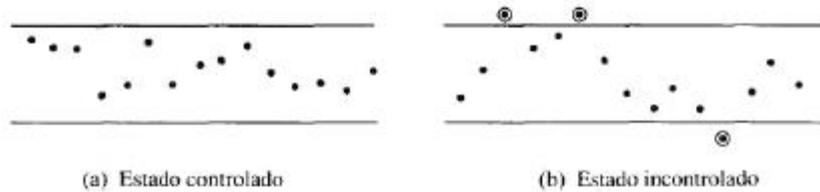


Figura 2.3: Dos tipos de dispersión en los productos producidos por un proceso

que se les había dicho. Este tipo de variabilidad indica que están entrando en el proceso materiales fuera de estándar, que los calibres y las herramientas están desgastados, que los instrumentos de medida no están calibrados, etc. Cuando aparece la variabilidad incontrolada, los directivos son responsables de reprender a los operarios y acometer acciones para asegurarse de que el trabajo se realiza de acuerdo con las normas internas. Sin embargo, estas normas generalmente son imperfectas, y estas causas usualmente exigen la acción de los directivos y del *staff*.

Como se mencionó más arriba, estos dos tipos de causas producen dos tipos de variación en los resultados de los procesos (i.e., productos, etc.). Cuando el trabajo avanza según las normas internas, se realiza el muestreo aleatorio, y se toman medidas controladas, generalmente se verá que la variación de la calidad del producto debida a las causas de azar tiene una distribución fija, usualmente la distribución normal. Esta situación se conoce como "variabilidad controlada". El estado de un proceso que produce resultados en los cuales la única dispersión es la variabilidad controlada, se llama "estado controlado" (e.g., el estado mostrado en la Figura 2.3(a)).

En contraste con esto, cuando surge una causa asignable, e.g., cuando aparece una anomalía en un proceso, la dispersión de los resultados del proceso (i.e., en el producto) es anormalmente grande. Esta dispersión anormalmente grande se llama "variabilidad incontrolada" y el estado de un proceso que produce resultados que tienen tal dispersión se llama "estado incontrolado". Por ejemplo, cuando un proceso está en un estado como el mostrado en la Figura 2.3(b), con puntos por fuera de los límites de control y que forman un patrón determinado, se dice que el proceso está "fuera de control".

Estas ideas no se limitan a la calidad; se pueden aplicar exactamente de la misma forma al rendimiento, los costes de producción, los costes unitarios, los volúmenes de ventas y otras cantidades, todas las cuales son el resultado de un proceso.

Antiguamente, los procesos eran controlados por medio de la intuición y la experiencia para distinguir entre los dos tipos de variación. Ahora, sin embargo, utilizamos herramientas estadísticas para entrar en el mundo de la dispersión, distinguir objetiva y económicamente entre los dos tipos de variación, y

desterrar las causas asignables de nuestros procesos. Para hacer esta distinción, usamos las "líneas de los límites de control" en los "gráficos de control". El par de líneas rectas de la Figura 2.3 equivalen a aquellas. El estudio del uso de los gráficos de control se centra principalmente en cómo calcular estas líneas de los límites de control para que se puedan utilizar tan eficiente, económica y fácilmente como sea posible, y en cómo se deberían utilizar para el control.

Hasta el momento he estado explicando los dos tipos de causas, principalmente en función de si se están observando o no las normas de trabajo. Sin embargo, cuando no hay normas de trabajo razonables, es imposible clasificar los dos tipos de causas de este modo solamente. En tal caso, podríamos empezar por clasificarlas según si el trabajo se estuvo realizando como antes o si se introdujo algún cambio. También podríamos clasificar las causas en aquellas que producen una variación relativamente grande y las que sólo producen una pequeña variación. En este caso, si elimináramos las causas asignables más importantes, podríamos luego separar las variaciones relativamente grandes de las que hasta entonces se habían considerado relativamente poco importantes. En otras palabras, podríamos separar las causas según el orden del tamaño de la variación que producían y eliminarlas una a una, empezando por la más grande.

(6) Juicio estadístico

Cuando los datos están dispersados y queremos distinguir entre dos distribuciones diferentes con objeto de entrar en acción, tenemos que comprender los conceptos de probabilidad y de errores del tipo I y del tipo II.

La probabilidad puede sonar difícil, pero hacer juicios y actuar de acuerdo con la probabilidad es, en realidad, exactamente lo que siempre hemos hecho, Le., decidir y actuar de acuerdo con el sentido común. Esto se ilustra fácilmente con un ejemplo.

Imaginemos que usted y yo estamos lanzando un dado y estamos apostando. Decidimos que yo gano si sale un número par y que usted gana si sale un número impar, y nos ponemos a jugar. Lanzo el dado cinco veces y digo que he sacado cinco números pares seguidos. ¿Qué pensaría usted si le dijera que he ganado cinco veces jugando así? La mayoría de las personas me dirían probablemente que debo estar haciendo trampas. Analicemos el proceso mental que hay detrás de esto. Si yo lanzara el dado honradamente, la probabilidad de sacar un número par en un lanzamiento del dado sería de $1/2$. La probabilidad de sacar cinco números pares seguidos sería por tanto de

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{32}$$

Sacar cinco números pares en cinco lanzamientos del dado es, en consecuencia, un acontecimiento que sucederá sólo unas tres veces entre cien, de media. Probablemente usted piense que es raro que suceda un acontecimiento con una probabilidad tan pequeña como ésta y, por tanto, sacará la conclusión de que la probabilidad de sacar un número par en un lanzamiento de este dado concreto no es igual a $1/2$ como debería ser. Usted hace un juicio intuitivo de que yo estoy haciendo trampas de un modo u otro.

Ordinariamente, la mayoría de las personas utilizarían el sentido común para inferir que yo estaba haciendo trampas sin hacer realmente el cálculo anterior. La única diferencia entre esta clase de proceso mental y la estadística es que la segunda trata de hacer juicios basándose en probabilidades calculadas con exactitud; en otros aspectos, es exactamente lo mismo que el juicio a través del sentido común basado en la experiencia. Las herramientas estadísticas se utilizan para esta clase de cálculos de probabilidad.

Similarmente, si se toman aleatoriamente muestras de datos de una distribución, podemos esperar que muchos de los valores de las muestras estén cerca de la media o del pico de la distribución y que pocos de ellos estén cerca de las colas. En otras palabras, la probabilidad de obtener valores que caigan por fuera de ciertos límites es muy pequeña. Así pues, si de hecho obtenemos estos valores que tienen una probabilidad baja, podemos pensar que no proceden de esta distribución particular sino de cualquier otra distribución. Cuando una distribución tiene una variabilidad controlada, no se puede considerar que los valores que tienen una probabilidad baja y que están en los extremos de las

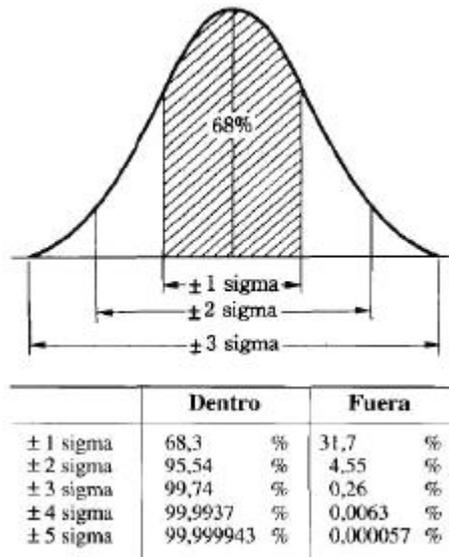


Figura 2.4: La distribución normal con sus probabilidades

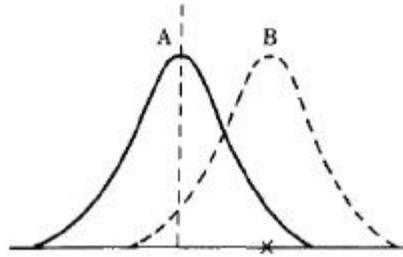


Figura 2.5: Se juzgó que hay dos distribuciones

colas o por fuera de las colas formen parte de esta distribución, y se tiene que considerar que indican una variabilidad incontrolada. En otras palabras, se juzga, basándose en la probabilidad, que son datos que no proceden de la distribución controlada sino de un proceso o distribución diferentes.

La mayoría de las distribuciones con que nos encontramos normalmente se aproximan a la forma de campana mostrada en la Figura 2.4 -la distribución normal. Si usamos la desviación estándar (sigma) para dividir el área que hay debajo la curva, tal como se indica en la figura, podemos calcular las áreas de cada zona como porcentaje del área total que hay debajo de la curva. Este porcentaje es la probabilidad de obtener valores comprendidos entre los extremos superior e inferior de cada zona de la distribución cuando se sacan muestras al azar de una población que tiene esta clase de distribución. Como indica la figura, la probabilidad de encontrar un valor dentro de una sigma a cada lado de la media es aproximadamente del sesenta y ocho por cien, mientras que la probabilidad de obtener un valor por fuera de estos límites es aproximadamente del treinta y dos por cien. Similarmente, la probabilidad de que los valores caigan fuera de los límites ± 3 -sigma es pequeñísima; sólo del 0,3 por cien o del tres por mil. Puesto que un acontecimiento que tenga esta probabilidad tan baja sucede muy raramente, usualmente cuando los datos caen fuera de los límites 3-sigma sacamos la conclusión de que la distribución ha cambiado, que el proceso ha cambiado, y que hay alguna anomalía en el proceso.

Volviendo al ejemplo del dado, si usted me acusara de hacer trampas todas las veces que yo dijera haber sacado cinco números pares seguidos, ¿tendría usted razón siempre? Hay una posibilidad entre treinta y dos, por término medio, de sacar cinco números pares seguidos en cinco lanzamientos incluso cuando el dado se lanza sin trampas. En otras palabras, si usted me acusa de hacer trampas, usted tiene una posibilidad de uno entre treinta y dos de equivocarse, por tanto no siempre tendrá razón. En estadística, este tipo de error se llama "error del tipo I". Por otra parte, ¿qué pasaría si yo dijera que he sacado tres números pares seguidos y usted me dijera nada más, "¡Qué suerte! ¿no?",

sin acusarme de hacer trampas? En realidad podría haber estado haciendo trampas sin que usted se diera cuenta. En estadística, este tipo de error se llama "error del tipo II". El hecho de que siempre que emitimos un juicio existe la posibilidad de que cometamos estos dos tipos de errores es la base de las pruebas estadísticas de hipótesis (contraste).

Consideremos lo que ocurre cuando estamos pensando en actuar respecto a un proceso que está mostrando una dispersión. Si obtenemos algunos datos que caen en las colas de una distribución controlada A -e.g., el valor indicado por la cruz de la figura 2.5-, a partir de la probabilidad tan baja que tiene de aparecer tal valor, podríamos sacar la conclusión de que había aparecido en el proceso algún factor que dio lugar a una distribución anormal. Sin embargo, esto podría ser un error del tipo I en el cual sacamos la conclusión errónea de que la distribución es incontrolada (B), aunque realmente es controlada (A). Sin embargo, no podemos usar de excusa esta posibilidad para decir que el proceso está en estado controlado (A). Si hiciéramos esto, podríamos estar cometiendo el error de tipo II y no darnos cuenta de que había aparecido alguna anomalía en el proceso y que la media de la distribución se había desplazado a B. Si aceptamos que habrá algo de variación en nuestros productos, aunque estemos trabajando como siempre, también tenemos que aceptar que las personas que son responsables de controlar el proceso no pueden eliminar completamente la posibilidad de cometer estos dos tipos de errores.

Si nuestra única preocupación es no dejar que una sola anomalía se deslice por un proceso sin que nos demos cuenta, y decidimos que algo está mal en el proceso, incluso cuando los datos de él no indiquen más que una ligera variación, estaremos exagerando el error de tipo I. Aunque no haya ninguna anomalía en el trabajo o en el proceso y se esté llevando a cabo de acuerdo con las normas, iremos corriendo de acá para allá buscando vanamente las causas de las anomalías. Por esta razón, también podríamos llamar a este tipo de error un tipo de error "impulsivo". Para evitar cometerlo, podríamos dejar las cosas tal como están y no hacer nada absolutamente, por dispersos que estuviesen los datos. Pero esto querría decir que no se habría acometido ninguna acción incluso si hubiesen respondido realmente a una anomalía. Esto exageraría el error del tipo II y podría ser desastroso para el proceso. Podríamos llamar a este tipo de error el tipo de error de "despiste".

Muchos japoneses, especialmente los ejecutivos, los directivos y los supervisores no son sensibles a la dispersión. Se ponen nerviosos con facilidad y van corriendo desconcertados de un sitio a otro, un instante están encantados y al momento están deprimidos, siempre que hay una pequeña variación en los datos. Por ejemplo, protestan a voz en grito cuando las ventas disminuyen ligeramente y se ponen a regañar a la gente si los rendimientos disminuyen un poco. Todo lo que consigue este comportamiento es fomentar que los puestos de trabajo den datos falsificados.

Al controlar un proceso, tendremos problemas si somos demasiado impulsivos, y si reaccionamos demasiado lentamente o demasiado rápidamente. Las líneas de los límites de control de un gráfico de control tienen en cuenta la posibilidad de cometer los dos tipos de errores, y se dibujan para distinguir empíricamente dos distribuciones diferentes. Las utilizamos para emitir juicios. Las líneas se dibujan en los puntos ± 3 -sigma de la variación que hay dentro del subgrupo; en otras palabras, se dibujan para hacer que la probabilidad de cometer un error del tipo I sea aproximadamente 0,003, o del 0,3 por cien. Así pues, lo mismo que también nos dice el sentido común antes mencionado sobre la probabilidad, una variación que sobrepasa los límites (en el ejemplo del dado esto sería lo mismo que sacar siete u ocho números pares seguidos) indica que probablemente haya algo mal en el proceso. En tal caso, podremos, por tanto, descargar nuestras responsabilidades de control con confianza (estadística), y buscar y eliminar las causas de la anomalía por medio de las técnicas de la ingeniería y estadísticas. Las líneas de los límites de control son, pues, una forma de establecer reglas para la acción, y su uso permite que cualquier persona pueda emitir juicios objetivamente.

Si los directores cometen el tipo de error "impulsivo" y riñen a sus subordinados incluso cuando hacen bien su trabajo, el efecto sobre lo que suceda después es malísimo, y surgen datos falsos de todos los puestos de trabajo. Por esto el gráfico de control sitúa la probabilidad de cometer este tipo de error en el 0,3 por cien, un valor bajísimo.

En las pruebas estadísticas generales de las hipótesis en situaciones no controladas, la probabilidad de cometer un error del tipo I se sitúa usualmente en el cinco o el uno por cien. En estadística, esta probabilidad se llama "nivel de significación".

(7) Entrar en acción con respecto a la población

Cuando hemos actuado como se describe más arriba y hemos tomado una decisión basada en los datos de la muestra, luego tenemos que acometer acciones con respecto a nuestro objetivo básico, la población. En el control del proceso, ya que podemos decir con confianza que en el proceso ha sucedido una anomalía, esto quiere decir buscar las causas, eliminarlas y evitar que vuelva a aparecer la anomalía. Como se dijo antes, desde cierto punto de vista la estadística podría llamarse "ciencia de la acción". Sólo cumplimos el propósito de la recogida de datos tal como se describe más arriba cuando acometemos una acción determinada basada en las conclusiones estadísticas.

Lo anterior no es más que un esbozo aproximado del enfoque estadístico. Utilizamos esta clase de enfoque para tratar de racionalizar nuestras organizaciones controlando estadísticamente la gestión, la calidad y otros factores.

2.2.2 Precauciones desde el punto de vista del control

Desde el punto de vista del control hay varias consideraciones importantes que se refieren al enfoque estadístico.

(1) La fiabilidad de los datos

Tanto para el control, la inspección o el análisis, los datos falsos, deliberadamente amañados o que no son fiables por cualquier otra razón y que salen del puesto de trabajo, son peor que si fueran inútiles. En las empresas tradicionales, especialmente las que tienen una burocracia más centralizada, más "directores artesanos" y más "directores de departamentos artesanos", y valoran peor la variación estadística, salen más datos falsos de los puestos de trabajo, y más lejos están estos datos de los hechos verdaderos. Esto sucedía igual en la era de la economía dirigida. Con la dirección que está basada en la postura de que los seres humanos son malos básicamente, disminuye la fiabilidad de los datos.

Podríamos utilizar toda clase de métodos estadísticos para analizar estos datos falsos o pasar horas discutiendo los detalles de los errores de muestreo y de medida, pero hacerlo no tendría sentido. Antes de aplicar los métodos estadísticos, tenemos que asegurarnos de que de los puestos de trabajo salgan datos verdaderos, y para ello hace falta lo siguiente:

- (a) Todo el mundo, especialmente los directivos de alto nivel, tiene que reconocer que todos los datos contienen dispersión.
- (b) La discusión tiene que ser objetiva, y reflexionar detenidamente sobre las pruebas y estimaciones estadísticas.
- (c) Se tiene que delegar la autoridad.
- (d) Los directivos de alto nivel no deben preocuparse demasiado de la letra pequeña. Los directivos y directores de departamento tienen que actuar como ejecutivos, no como artesanos.

Especialmente cuando se están manejando grandes cantidades de elementos (e.g., grandes cantidades de botellas o de piezas), el control del volumen de producción y de los costes, y no digamos el control de la calidad, es, obviamente, imposible si no se pueden identificar correctamente las cantidades.

Dicho de otro modo, la emisión de órdenes irrazonables, ponerse nervioso, el control dictatorial, el control excesivo por parte de la oficina central, las manifestaciones confusas por parte de los superiores, la falta de comprensión de la dispersión por parte de los superiores, las normas de trabajo y métodos de evaluación malos, y una comprobación insuficiente fomentan la producción de datos falsos. Cuando el control de calidad se pone en práctica hábil-

mente en toda una empresa, desaparecen los datos falsos y todo el mundo puede decir libremente lo que piensa.

(2) Indicar claramente la historia de los datos y de los lotes de productos - Estratificación

Tal como ha dejado claro la explicación anterior, el enfoque estadístico es, en efecto, un proceso para examinar los hechos, emitir juicios, trazar las causas de las anomalías y entrar en acción. Por ejemplo, quiere decir mirar la manera en que están dispersos los resultados de un proceso (i.e., la calidad del producto), buscando las causas asignables entre los muchos factores que afectan al proceso y entrando en acción.

Así pues, si la historia de los datos (en otras palabras, la historia de los lotes de producto) no está clara, nos resultará difícil identificar las causas de variación del proceso. En control de calidad es absolutamente esencial aclarar la historia de los datos y de los lotes de producto, y, por tanto, tenemos que hacer lo siguiente:

- (a) Definir claramente lo que queremos decir por lote.
- (b) Estratificar los lotes de producto.
- (c) Registrar quién hizo el muestreo y tomó las medidas.

Esto se puede hacer con relativa facilidad ideando alguna clase de sistema de tarjetas y disponiendo de recipientes y mecanismos de transporte adecuados. Si no se hace aceptar enérgicamente, aunque en el sistema haya algunas tensiones al principio, el control de calidad no avanzará y los datos que se recojan no serán muy útiles. Sin la estratificación el control de calidad se quedará en el camino.

(3) Estimar un proceso controlado

Para identificar qué clase de ente es un proceso cuando está bajo control, tenemos que estimar la distribución de ese proceso (i.e., la distribución de la población).

Si un proceso ha estado controlado durante mucho tiempo, la variación de los resultados del proceso (i.e., el producto) también tiene que estar bajo control. Así pues, si la variación de los resultados de un proceso ha seguido en el estado controlado durante mucho tiempo, podemos estimar la distribución para el futuro. Esto es importantísimo para el control del proceso, ya que quiere decir que podemos suponer que, si en el futuro seguimos controlando un proceso del mismo modo, la distribución de los resultados del proceso (i.e., el producto del futuro proceso controlado) también será la misma. En otras palabras, si tomamos las líneas de los límites de control calculadas por el análisis

de los datos del pasado y las proyectamos hacia el futuro sin modificación, la variación del proceso seguirá entre los límites, siempre que el proceso siga bajo control. Esto quiere decir que también podemos estimar la forma futura de la distribución de los resultados del proceso y utilizar esta estimación para garantizar la calidad y la fiabilidad futuras.

De este modo se puede garantizar la calidad, incluso sin inspección, si un proceso se mantiene en un estado bien controlado, y podremos predecir con seguridad qué clase de producto se producirá. Inversamente, si en el futuro las características del producto caen entre las líneas de los límites, esto indica que estamos justificados para asumir que el proceso está bajo control. También quiere decir que si aparecen valores por fuera de las líneas, podremos asumir que han sucedido algunos cambios en el proceso. Así pues, si en el futuro los datos cruzan los límites, tendremos que investigar inmediatamente la anomalía del proceso y entrar en acción.

El fin del control de los procesos cuando se utilizan de este modo los gráficos de control es mantener realmente a los procesos bajo control en el futuro, y poder así proveer a la sociedad de productos fiables.

2.3 Los diferentes tipos de datos

Las medidas que tomamos son de dos tipos: métricas y enumerables. Por ejemplo, medidas tales como "tres tornillos defectuosos entre cien", "cinco taras en un tejido" o "x paradas en un mes en la fábrica" se dan en forma de números enteros (i.e., "un tornillo", "dos tornillos", "una tara", "dos taras", "una parada", "dos paradas"), no en forma de fracciones o decimales tales como "1,6 paradas". Las medidas que pasan así de un número entero al siguiente se llaman "discretas" o "discontinuas", y los valores discretos como los anteriores se llaman "atributos". Igualmente, cuando, por ejemplo, se encuentran tres láminas defectuosas de un producto en doscientas, se puede expresar como $(3/200) \times 100 = 1,5\%$, i.e., un porcentaje de unidades defectuosas del 1,5%. Porcentajes como éstos no son enteros como en los ejemplos anteriores, pero pasan (de 1 a 1,5 a 2 a 2,5 en este caso) sin valores intermedios (tales como 1,1, 1,2, etc.) y por tanto no son continuos. Por tanto, los porcentajes de defectos de este tipo son también atributos.

En contraste con esto, las medidas de, por ejemplo, el espesor (mm), el peso (g) o las horas de trabajo (h) son valores continuos. En una serie de medidas tal como 1,50 mm, 1,51 mm, etc., a primera vista puede parecer que saltan de un número al siguiente, pero todo lo que realmente queremos decir con 1,50 mm es que, debido a la precisión limitada de la medida, hemos redondeado todas las lecturas de 1,495 a 1,505 mm a la centésima parte de milímetro más próxima. El objeto real que estamos midiendo puede tener un intervalo

infinito de valores y las medidas que pueden adoptar un intervalo continuo de valores así se llaman "variables".

La naturaleza estadística de los atributos y las variables es diferente y, con frecuencia, requieren el uso de herramientas estadísticas y gráficos de control diferentes. Los atributos también forman distribuciones discretas, mientras que las variables forman distribuciones continuas.

Los atributos con que nos encontramos normalmente en control de calidad también son de dos tipos: las distribuciones del número de unidades defectuosas y de la fracción de unidades defectuosas. Las distribuciones obtenidas al clasificar los productos en conformes y no conformes con las especificaciones son estadísticamente diferentes de las distribuciones del número de defectos por muestra y del número de defectos por unidad, obtenidos al contar el número de defectos en un solo producto.

Hablando estadísticamente, las distribuciones de los números de unidades defectuosas y de las fracciones de unidades defectuosas forman distribuciones binomiales. Si el producto se clasifica en tres o más clases (e.g., primera clase, segunda clase, tercera clase, etc.), la distribución será multinomial. Por el contrario, las distribuciones de los números de defectos por muestra y de los números de defectos por unidad siguen la distribución de Poisson.

Nota: En Control de Calidad, los términos "aceptación", "rechazo", "unidad defectuosa", y "defecto" tienen unas definiciones estrictas. "Aceptación" y "rechazo" se utilizan para la aceptación y el rechazo de lotes de producto, mientras que "unidad defectuosa" y "unidad no defectuosa" se utilizan para evaluar las unidades individuales de inspección. Un "defecto" es un área o elemento de una unidad de inspección que no cumple las especificaciones o los requisitos.

2.4 Expresión cuantitativa de las distribuciones²

El hecho de que los datos de las muestras y las poblaciones estén distribuidos estadísticamente se mencionó en la sección 2.1. Las formas aproximadas de tales distribuciones pueden verse si los datos se indican en forma de tablas o diagramas tales como la Tabla 2.2 y la Figura 2.2, pero a menudo también es conveniente expresarlos cuantitativamente.

Una distribución está determinada por su posición (o "tendencia central"), su extensión (o "dispersión"), y su forma; en otras palabras, si su pico está desplazado hacia la izquierda o la derecha ("asimetría"), o es agudo ("apuntamiento" o "curtosis"), o plano ("aplastamiento"). Generalmente es suficiente

²

Ver la sección 2A.2.

con expresar cuantitativamente la tendencia central y la dispersión de una distribución, e indicar su forma (i.e., su asimetría y apuntamiento) en un histograma o un diagrama similar. A estos valores cuantitativos se les llama "medidas".

(1) Medidas de la tendencia central

Normalmente se utiliza la media aritmética (también llamada "promedio") o la mediana para medir la tendencia central.

Promedio, \bar{x} (que se lee "x barra"): si, por ejemplo, cogemos los cinco primeros valores de los datos indicados en la Tabla 2.1 (3,88, 3,88, 3,84, 3,82, 3,83), su promedio viene dado por

$$\bar{x} = (1/5) (3,88 + 3,88 + 3,84 + 3,82 + 3,83) = 3,850$$

El promedio se puede expresar con la siguiente fórmula general:

Mediana, \tilde{x} : este es el valor central cuando los datos se disponen en orden de magnitud. Por ejemplo, la mediana de los valores anteriores (3,88, 3,88, 3,84, 3,83, 3,82) es 3,84. Cuando hay un número par de valores, la mediana es el promedio de los dos valores centrales.

Moda: es el valor correspondiente al pico de la distribución. Algunas distribuciones pueden tener más de una moda.

(2) Medidas de la dispersión

Recorrido, R : es la diferencia entre el valor más alto, x_{\max} , y el más bajo, x_{\min} . En el ejemplo anterior,

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 3,88 - 3,82 = 0,06$$

Generalmente se utiliza R cuando el número de puntos es de diez o inferior.

Suma de los cuadrados de las desviaciones, S : una "desviación" es la diferencia entre un valor determinado y la media, y la suma de los cuadrados de estas diferencias se llama suma de los cuadrados de las desviaciones.

$$\begin{aligned} S &= (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \\ &= \sum (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n \end{aligned}$$

El segundo término de la expresión anterior se llama "término de corrección" (TC).

Varianza de la muestra, o la estimación insesgada de la varianza de la población, V : es la suma de los cuadrados de las desviaciones dividida por $n-1$, donde n es el número de datos.

$$V = S/(n-1)$$

Desviación estándar, S O $\hat{\sigma}$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza.

$$s = \sqrt{V} = \sqrt{S/(n-1)}$$

Cuando el número de datos es grande, si se divide por n en vez de $n-1$ dará aproximadamente el mismo resultado.

2.5 Interpretación y uso de las distribuciones de frecuencias³

Las distribuciones de frecuencias son la herramienta más sencilla, más utilizada y eficaz. Aquel que no sepa ni siquiera utilizar las distribuciones de frecuencias seguro que no podrá utilizar los métodos estadísticos más avanzados.

Estamos rodeados de montones de datos, pero no nos dicen nada si no hacemos más que enumerarlos como en la Tabla 2.1. Si los expresamos en forma de una distribución de frecuencias como en la Tabla 2.2 o la Figura 2.2, nos dan diversas ideas. Puesto que las distribuciones de frecuencias se utilizan muy a menudo en el control de calidad, las empresas deben preparar impresos en blanco para las mismas en las que también haya espacio para notas, hacer cálculos y anotar los promedios, las desviaciones estándar, etc.

(1) El fin de la preparación de las distribuciones de frecuencias

El fin principal de la preparación de una distribución de frecuencias es, usualmente, uno de los siguientes:

- (i) Dejar bien visible el estado de una distribución, i.e., identificar la forma de la distribución,
- (ii) Identificar la capacidad del proceso,
- (iii) Para el análisis y el control del proceso,
- (iv) Para determinar el promedio, la desviación estándar y otras medidas de una distribución,
- (v) Para probar a qué tipo de distribución matemática se puede acoplar estadísticamente una distribución empírica.

3

Ver los métodos para preparar las distribuciones de frecuencias y los métodos de cálculo en la sección 2A. 1.

Puesto que las distribuciones de frecuencias facilitan que todo el mundo vea y comprenda intuitivamente la forma de una distribución y el estado de un proceso, se utilizan especialmente con el objetivo (i) nombrado anteriormente. Tienen un amplio rango de aplicaciones: por ejemplo, para informar de los resultados diarios, semanales, mensuales o anuales a los superiores en un formato fácilmente comprensible, o para analizar las causas de dispersión.

Las distribuciones de frecuencias y los histogramas se interpretan más fácilmente si se incluyen valores tales como la desviación estándar, el valor de referencia, el valor especificado, $\bar{x} \pm 3R/d_2$ calculado con los gráficos de control, o $\bar{x} \pm 3s$ obtenido con el histograma.

(2) Interpretación de las distribuciones de frecuencias

Cuando se miran las distribuciones de frecuencias, se tiene que prestar atención a los puntos siguientes:

- (i) ¿Está la distribución (i.e., su promedio) en la posición adecuada?
- (ii) ¿Cómo es la extensión (i.e., la dispersión) de la distribución?
- (iii) ¿Cuál es la relación entre valores tales como la desviación estándar, el valor de referencia, y el valor especificado?
- (iv) ¿Caen algunos valores por fuera de las líneas $\bar{x} \pm 3R/d_2$ o $\bar{x} \pm 3s$?
- (v) ¿Hay algunos huecos, como dientes que faltan, o subidas o bajadas repentinas como las púas de un peine, en la distribución?
- (vi) ¿Hay algunos puntos aislados fuera del cuerpo principal de la distribución?
- (vii) ¿Son aceptables los valores máximo y mínimo de la distribución?
- (viii) ¿Es asimétrica la distribución, con un extremo mucho más largo que el otro, o es simétrica?
- (ix) ¿Tiene aspecto de acantilado la parte izquierda o la derecha de la distribución?
- (x) ¿Tiene más de un pico la distribución?
- (xi) ¿Es demasiado agudo o demasiado chato el pico de la distribución?

Si se preparan varios histogramas estratificados con los mismos datos y se comparan los puntos anteriores, se puede obtener más información. Los lectores deben estudiar la interpretación de las distribuciones de frecuencias utilizando las Figuras 2.6-2.9 de más abajo.

(3) Cómo utilizar las distribuciones de frecuencias

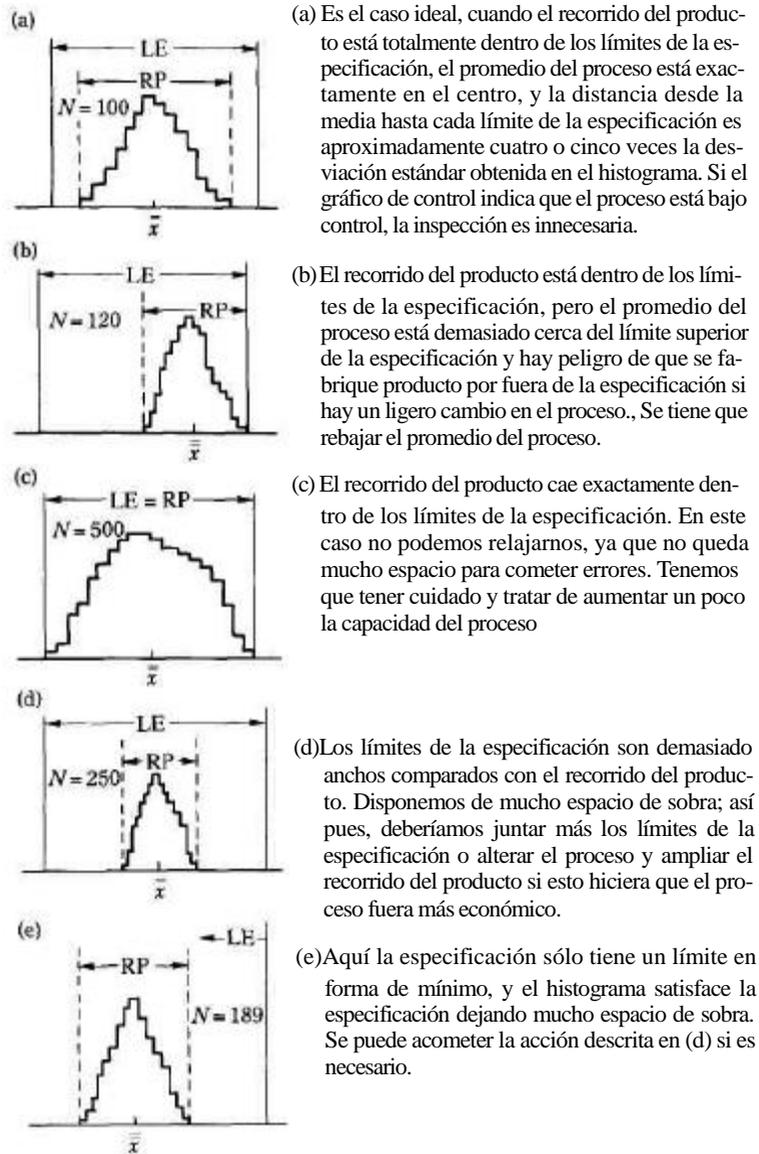
Las distribuciones de frecuencias se utilizan para descubrir la forma de una distribución o el estado de un proceso cuando se interpretan de la forma descrita más arriba. Tienen las siguientes aplicaciones:

- (1) Para preparar informes: si los informes mensuales de la calidad y otros informes se presentan no simplemente como una ordenación de los datos sino en forma de histograma, y se añade el número de valores N y su promedio y desviación estándar, pueden ser comprendidos fácilmente por cualquier persona.
- (2) Para análisis: si se separan las distribuciones de frecuencia estratificadas con arreglo a las posibles causas asignables (e.g., operario, máquina, materia prima, mes/día, etc.), como se muestra en las Figuras 2.9 y 2.10, se puede identificar inmediatamente las diferencias. La estratificación es el secreto de la preparación de buenas distribuciones de frecuencias, y su interpretación según se describe en la Figura 2.8 puede hacer que se descubran las causas de los datos distantes. También hace que se identifique rápidamente las relaciones entre las especificaciones, los valores estándar y los valores de referencia.
- (3) Para estudios de la capacidad de proceso y de la capacidad de equipo: las distribuciones de frecuencias se utilizan frecuentemente para mostrar las capacidades de los procesos, la maquinaria y el equipo, tanto cualitativa como cuantitativamente.
- (4) Para control: al exponer las distribuciones de frecuencias en el puesto de trabajo (y en algunos casos estratificándolas y actualizándolas diariamente) transmite el concepto de dispersión a los encargados de la planta y a los operarios de base, y les ayuda a ser más conscientes del control. Igualmente, si se dibujan las líneas $\bar{x} \pm 3 \bar{R} / d_2 = \bar{x} + E_2 \bar{R}$ en las distribuciones de frecuencias (ver la sección 3A.2), se pueden utilizar para el control del mismo modo que las líneas de control en un gráfico de control.

(4) Los inconvenientes de las distribuciones de frecuencias

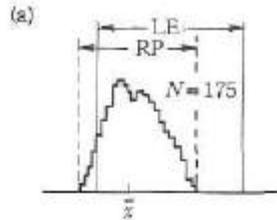
Como se explicó más arriba, la variedad de aplicaciones de las distribuciones de frecuencias es amplísimo, y son muy eficaces. Sin embargo, sí que tienen las desventajas siguientes:

- (a) No indican los cambios con el tiempo. Puesto que para hacer una distribución de frecuencias, se juntan todos los datos de un mismo lote, mes, etc., éste método no se puede utilizar para identificar las causas

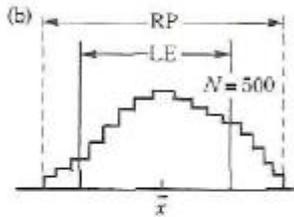


LE: Límites de la especificación RP: Recorrido del producto

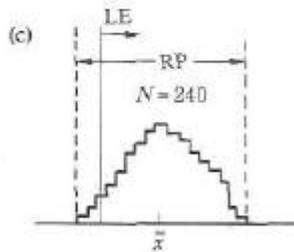
**Figura 2.6: Comparación entre la especificación y el histograma
(en un caso en que se cumplen las especificaciones)**



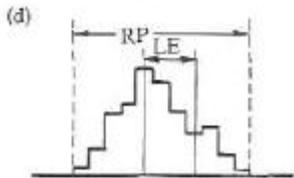
(a) El promedio del proceso se ha desplazado demasiado hacia la izquierda. Cuando sea un problema sencillo de ingeniería cambiar el promedio del proceso, se debe cambiar para que coincida con el punto medio de los límites de la especificación.



(b) La dispersión del proceso es demasiado grande. O se tiene que cambiar el proceso o se tiene que cambiar los límites de la especificación. Es necesario un cribado del cien por cien del producto.



(c) En este caso, la especificación está en forma de un máximo, e.g., por lo menos x kg/cm². Se tiene que aumentar el promedio del proceso .v. reducir la dispersión o hacer otros cambios.



(d) Aquí la capacidad de proceso es totalmente inadecuada para cumplir la tolerancia de la especificación o el proceso, se tiene que estratificar el producto de varias maneras y realizar un cribado del cien por cien para seleccionar el producto aceptable.

Figura 2.7: Comparación entre la especificación y el histograma (en un caso en que no se cumplen las especificaciones)

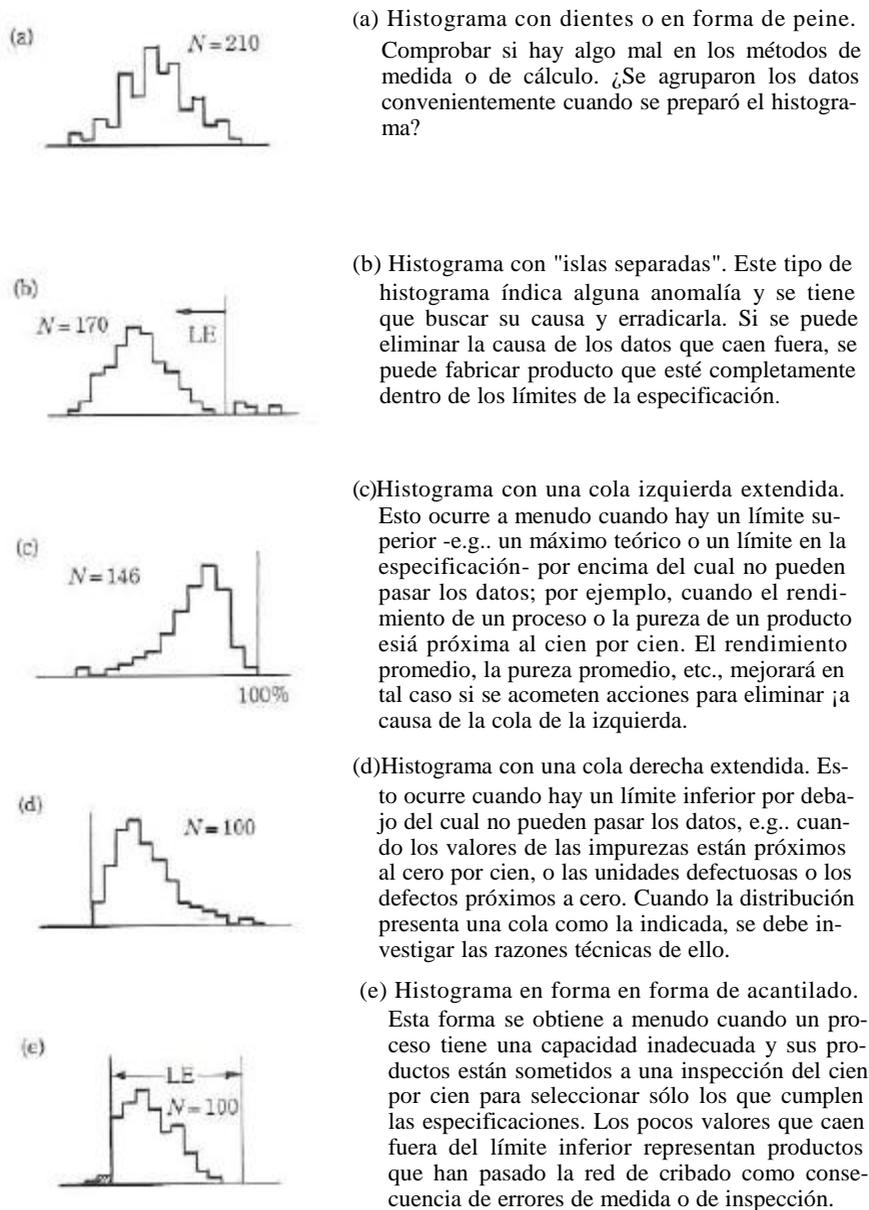


Figura 2.8: Varias formas de histogramas

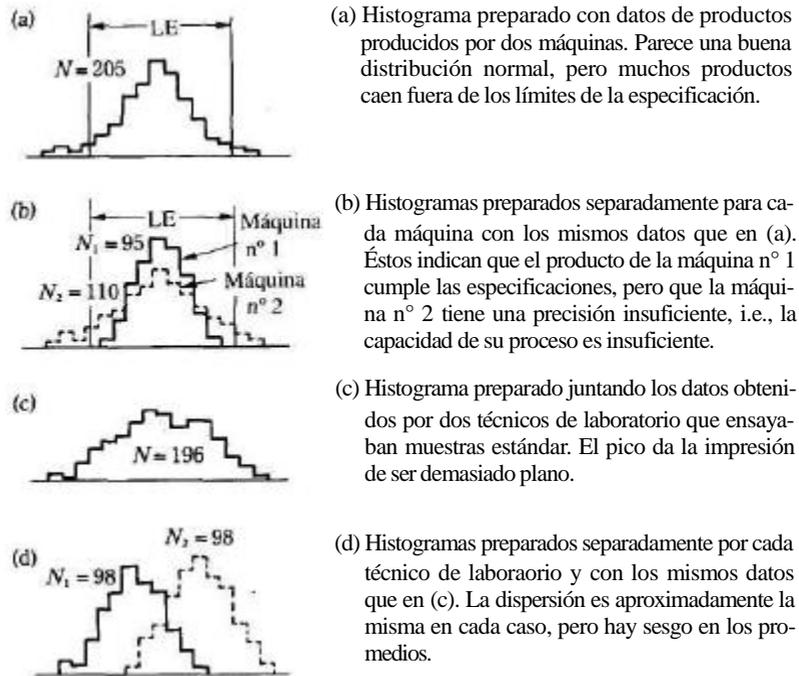


Figura 2.9: Histogramas estratificados

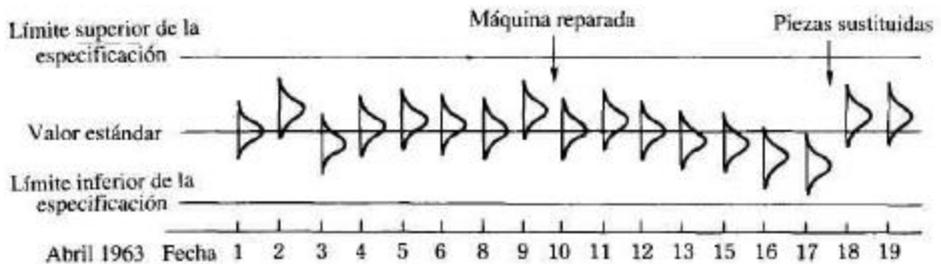


Figura 2.10: Distribuciones de frecuencias ordenadas en secuencia temporal, que indican claramente las tendencias de la media y la dispersión

de variación dentro de cada lote o cada mes. Para superar esta limitación podemos estratificar los datos por tiempos todo lo posible cuando se preparen las distribuciones de frecuencias y hojas de comprobación, o podemos usar otros métodos (tales como los gráficos de control descritos más adelante) para comprobar el estado de control al mismo tiempo.

- (b) Para expresar la limitación anterior (a) en términos un poco más estadísticos, utilizando la terminología de los gráficos de control, podemos decir que las distribuciones de frecuencias no dan mucha idea de la variación dentro de un grupo o entre grupos.
- (c) Para preparar una distribución de frecuencias e identificar su forma hacen falta muchos datos -por lo menos cincuenta valores y, si es posible, más de cien. Esto es inevitable si queremos identificar la forma de la distribución y otros factores esenciales.

A pesar de estas desventajas, las distribuciones de frecuencias son utilísimas si empleamos la estratificación y otros mecanismos, y si hacemos bien su preparación y su interpretación y las aplicamos sensatamente.

2.6 Diagramas de Pareto y curvas de Pareto

(1) ¿Qué es un diagrama de Pareto?

El diagrama de Pareto es un tipo de distribución de frecuencias. Se prepara recogiendo datos de, por ejemplo, el número de diferentes tipos de defectos, reprocesos, desechos y reclamaciones, o de pérdidas en dinero y pérdidas en porcentajes, junto con sus varias causas, y luego se representan por orden decreciente de frecuencia, como se muestra en la Figura 2.11.

Cuando ordenamos así los datos y representamos los totales acumulados como indica la línea continua de la figura, vemos a menudo que los dos o tres primeros tipos de defectos, por ejemplo, suponen como mínimo el setenta u ochenta por cien del total. Está claro que si eliminamos estos defectos concretos, habremos eliminado la mayoría de los defectos, y la fracción de unidades defectuosas disminuirá espectacularmente. Aunque generalmente en las empresas hay una enorme variedad de defectos, pérdidas, accidentes y otros problemas, que tienen una multitud de causas diferentes, la mayor parte de los efectos indeseables se debe a menudo, con mucha diferencia, a sólo dos o tres problemas o causas principales. Esto se llama principio de Pareto ("pocos vitales, muchos triviales"), que dice que hay muchos problemas sin importancia frente a sólo unos pocos graves. Los diagramas de Pareto nos

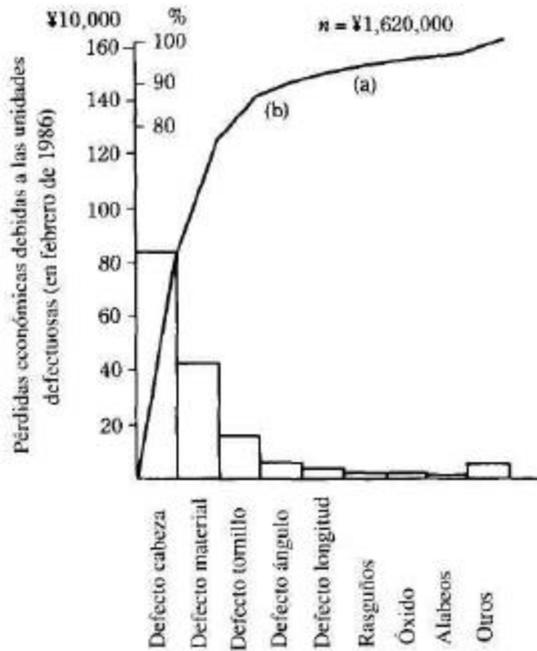


Figura 2.11: Diagrama de Pareto

permiten identificar objetivamente los problemas graves que tenemos delante actualmente, y acometer los verdaderamente importantes como cuestión de política.

La identificación y eliminación de estos problemas nos permite alcanzar enormes beneficios. Si no identificamos así los problemas verdaderamente importantes, malgastaremos mucho esfuerzo; por ejemplo, si decimos que nuestro problema es el quinto elemento de la Figura 2.11 (defectos de longitud) y hacemos grandes esfuerzos para resolverlo, sólo ahorraremos unos cincuenta mil yenes (cuatrocientos dólares) al mes aunque tengamos éxito. Este tipo de esfuerzo es un "esfuerzo quisquilloso". Se pueden alcanzar resultados incomparablemente mejores si todos los departamentos cooperan para eliminar los problemas más grandes. Desgraciadamente, a menudo se eluden los problemas más grandes porque implican a un número elevado de departamentos y se considera que son demasiado problemáticos, mientras que los problemas pequeños se acometen con gusto. En control de calidad es importante construir un sistema de cooperación en el cual todos trabajen juntos para eliminar los problemas y sus causas por orden, empezando por los mayores.

(2) Algunas cuestiones que se deben observar cuando se preparan los diagramas de Pareto

- (a) Registrar siempre el número total de elementos, cantidades de dinero y las fechas o las horas en que se recogieron los datos.
- (b) En la medida de lo posible, estratificar los datos según diferentes causas, tipos de defectos, etc. El método de estratificación dependerá del propósito de la recogida de datos.
- (c) Si es posible, expresar las pérdidas en términos monetarios en vez de en números, cantidades, porcentajes de defectos, etc. Según el problema, la dispersión a la que contribuye cada causa también se puede expresar en términos de la varianza (en forma de un porcentaje de contribución).
- (d) Pensar en el propósito de la preparación del diagrama cuando se decida el periodo para el cual se van a recoger los datos. Este periodo no debe ser demasiado corto ni debe ser tan largo que incluya los resultados de varias acciones correctoras.
- (e) Si se ejerce alguna acción, dibujar los diagramas de Pareto antes y después con objeto de comprobar los resultados.
- (f) En la medida de lo posible, estratificar los diagramas de Pareto por horas, máquinas, etc.
- (g) Desglosar los problemas mayores con más detalle y preparar diagramas de Pareto individuales para ellos.

(3) Algunas cuestiones que se deben observar cuando se interpretan y usan los diagramas de Pareto

- (a) Empezar siempre con el problema que vaya a traer los mayores beneficios de ser resuelto.
- (b) Formar equipos de personas de todos los departamentos pertinentes, hacer que cada departamento discuta las propuestas para resolver el problema, y hacer que cooperen para encontrar una solución.
- (c) Preparar diagramas de Pareto para cada mes y cada periodo contable.
 - (i) Si los defectos o las pérdidas más frecuentes decrecen súbitamente, esto indica que o bien ha tenido éxito el esfuerzo cooperativo o que el proceso u otros factores han cambiado súbitamente aunque nada se haya hecho al respecto.
 - (ii) Si diferentes tipos de defectos o pérdidas decrecen de una forma aproximadamente uniforme, esto indica generalmente que el control ha mejorado.
 - (iii) Si el defecto o la pérdida más frecuente cambia todos los meses pero no disminuye mucho el porcentaje global del defecto o de la

pérdida (en otras palabras, si el diagrama de Pareto es inestable), esto indica falta de control.

El diagrama de Pareto es una herramienta sencilla pero potentísima. Por esta razón, debe utilizarse ampliamente, no sólo en control de calidad sino en toda situación posible.

2.7 Hojas de comprobación

(1) ¿Qué son las hojas de comprobación?

Registrar los números uno a uno es una tarea pesada cuando se recogen los datos en el puesto de trabajo, y estratificar y recoger los datos durante la inspección afecta negativamente a la eficiencia de la inspección. En la práctica es difícil recoger los datos sobre los daños estratificados según su situación, por ejemplo. Las hojas de comprobación son utilísimas en tales casos, especialmente cuando se estratifican los datos. Hacen que los datos se separen y recojan por grupos tan sólo marcando unas señales.

(2) Cómo preparar una hoja de comprobación

- (a) Distribuciones de frecuencias. Incluso con datos continuos, recoger una gran cantidad de datos y utilizarlos luego para preparar una distribución de frecuencias, es duplicar el esfuerzo. En tales casos, a menudo no se necesitan realmente los valores individuales, y es suficiente con saber la forma de la distribución y si cumple la norma. Por tanto, podemos registrar los valores de antemano en un impreso en blanco para la distribución de frecuencias y hacer que los operarios pongan trazos tal como se indica en la Tabla 2.2. Esto simplifica el registro de datos y produce una distribución de frecuencias, terminada una vez se hayan completado las mediciones. Este impreso es también una especie de lista de comprobación. Cuando no se toma más que un pequeño número de valores cada vez, hacer que los operarios los tomen a intervalos determinados de tiempo es también una forma adecuada de ver los cambios temporales.
- (b) Distribuciones de frecuencias para los defectos individuales. Cuando hay varios tipos de defectos, si sólo se conoce el número global de defectos, ello no nos da ninguna pista para actuar. Sin embargo, si se enumeran los diferentes tipos de defectos o causas en unas hojas de inspección en blanco y los inspectores ponen trazos en las casillas

adecuadas, esta estratificación de los datos de los defectos será útil tanto para el análisis como para la planificación de las modificaciones. En tales casos, si se encuentran unidades defectuosas con más de un tipo de defectos, se debe realizar la inspección analítica, comprobándose todas las características del elemento que se está comprobando a efectos del análisis. También es bueno disponer que los defectos se anoten con arreglo a la hora de producción.

- (c) Hojas de comprobación de posición. Cuando el problema es que hay arañazos, grietas y otras imperfecciones, si se conoce la posición del daño a menudo se simplifica el trazado de las causas y la adopción de medidas correctoras. En este tipo de situación, se deben preparar esquemas o diagramas de desarrollo del producto y dividirlos en varias zonas. Los inspectores deben registrar los resultados directamente en estos diagramas por medio de códigos de colores y otros símbolos. Cuando se hace esto, las zonas deben tener, en la medida de lo posible, áreas iguales. Cuando se sumen los trazos podremos ver fácilmente si los defectos están concentrados en unas posiciones determinadas, en productos determinados, o en horas determinadas, o si se encuentran repartidos al azar, y entonces podremos entrar en acción adecuadamente.
- (d) Hoja de comprobación del diagrama de causa y efecto. Se puede preparar un diagrama de causa y efecto que indique las causas asignables, los diferentes tipos de defectos, etc., que sea fácilmente comprendido por las personas que están en planta. Este se hace llegar a planta, donde se dice a los trabajadores que pongan una señal junto a la flecha pertinente siempre que se encuentren con una causa o situación determinadas. Esto nos indica pronto qué causas debemos controlar.

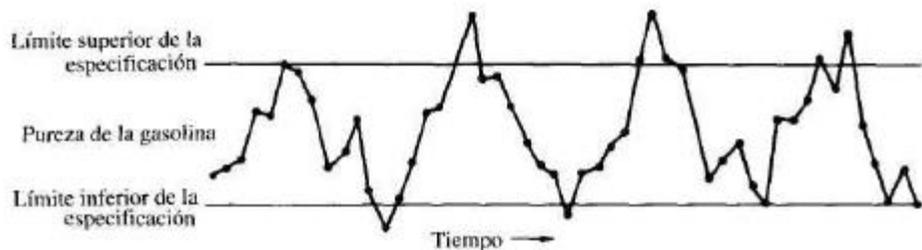
Los anteriores no son más que unos pocos ejemplos de los muchos tipos posibles de hojas de comprobación. Si se preparan unas hojas de comprobación bien meditadas, de acuerdo con las condiciones de cada puesto de trabajo, es posible obtener los datos estratificados con facilidad y preparar los diagramas de Pareto. Las hojas de comprobación son una herramienta utilísima cuyo amplio uso recomiendo. El uso hábil de las hojas de comprobación junto con las herramientas tales como las distribuciones de frecuencias, los diagramas de Pareto y los diagramas de causa y efecto permite la resolución del ochenta al noventa por cien de los problemas de los puestos de trabajo.

2.8 Diagramas de la capacidad de los procesos

Los diagramas de las capacidades de proceso indican la capacidad de un proceso con respecto a la calidad. En el caso de la maquinaria y los equipos, utilizamos el término "capacidad de la máquina". La cuestión de la capacidad del proceso es un problema importante del control de calidad y se explica con detalle en la sección 4.7.7. Aquí sólo me gustaría mencionar el método para preparar los diagramas de capacidad del proceso y señalar algunas cuestiones a tener presente en su preparación. Los tres métodos enumerados más abajo se utilizan con frecuencia para ilustrar las capacidades de procesos por medio de un diagrama. Tratamos de identificar la capacidad real de la calidad de un proceso por medio de estos diagramas.

- (a) Distribuciones de frecuencias.
- (b) Gráficos de control.
- (d) Gráficos que muestran valores especificados (ver las Figuras 2.12 y 2.13).

Las distribuciones de frecuencias indican claramente la distribución de la capacidad y permiten que se calcule fácilmente su promedio y su desviación estándar, pero no indican cómo cambia con el tiempo. Puesto que los datos se anotan en los gráficos de control y otros gráficos por orden de producción, indican claramente los cambios temporales, pero no indican claramente cómo está distribuida la capacidad del proceso. Sin embargo, se pueden alcanzar estos dos objetivos si se traza una distribución de frecuencias en un extremo del



Cuando se toman medidas a intervalos fijos de tiempo, hay una periodicidad muy estable en el proceso, que indica que la capacidad del proceso es insatisfactoria. El diagrama indica que la capacidad del proceso sería bastante buena si se controlara esta periodicidad.

Figura 2.12: Gráfico de la capacidad de un proceso (1) para mostrar los cambios temporales

gráfico como se indica en la Figura 2.13. Se dice que un proceso manifiesta toda su capacidad si un gráfico de control correctamente trazado indica que está en estado controlado.

Cuando utilizamos (a), (b) o (c) para encontrar la capacidad de un proceso, tenemos que utilizar los datos obtenidos después que el proceso haya sido totalmente analizado y esté bien controlado, y cuando el proceso o el equipo esté ejerciendo su capacidad óptima. No se puede decir que la capacidad de un proceso calculada sólo a partir de datos de un proceso que no está en el estado controlado sea la verdadera capacidad del proceso.

La capacidad del proceso se expresa por medio del índice de la capacidad del proceso, C_p (ver la sección 4.7.7).

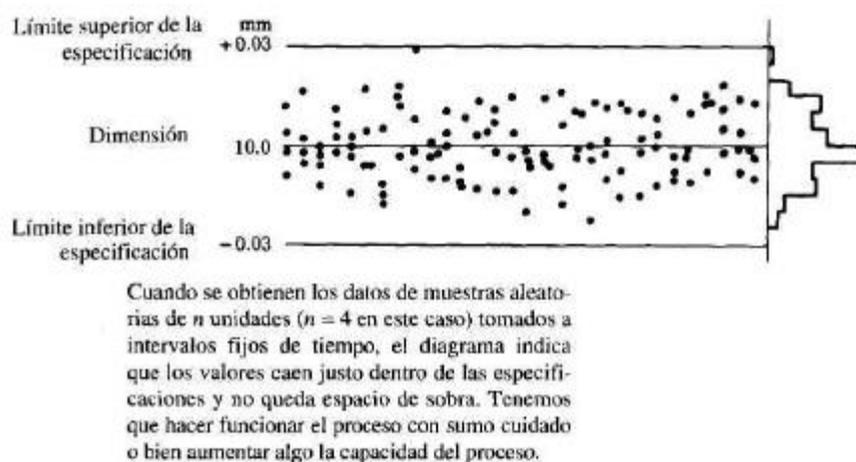


Figura 2.13: Gráfico de la capacidad de un proceso (2) para mostrar los cambios temporales

2.9 Diagramas de dispersión (diagramas de correlación)

Los métodos tales como dibujar las distribuciones de frecuencias nos permiten identificar la forma aproximada de la distribución de un conjunto de datos de un tipo, pero no indican la relación entre dos conjuntos diferentes de datos. Para identificar la relación entre dos conjuntos de datos podemos utilizar el diagrama de dispersión. Por ejemplo, los diagramas de dispersión pueden utilizarse para conjuntos "correspondientes" de medidas tales como la temperatura y el rendimiento, las dimensiones antes y después del procesado, la composición de la materia prima y la fracción de unidades defectuosas, la dureza y la resistencia a la tracción del producto, etc. Cuando se hace esto, es

importante recoger los datos por parejas (a esto se le llama "correspondencia"); si tenemos datos sobre la composición de la materia prima y la fracción de unidades defectuosas, por ejemplo, ello no nos permitirá dibujar los diagramas de dispersión descritos más abajo y realizar el análisis a menos que conozcamos qué fracción de unidades defectuosas aparecieron cuando se utilizaba el material de una composición determinada. Como ya he mencionado con frecuencia, para ello es indispensable la estratificación de los lotes.

Si disponemos de datos así emparejados, podremos dibujar los diagramas de dispersión y las tablas de correlación por medio de los métodos descritos más abajo.

La Tabla 2.3 es una tabla de los valores de la dureza de un producto de acero y de los porcentajes de cierto componente de la materia prima utilizada. Los datos se obtuvieron midiendo la dureza media del producto correspondiente a unos lotes determinados de materia prima. Cuando se anotan los valores en un gráfico, aparecen como indica la Figura 2.14, que indica claramente que la dureza media aumenta conforme aumenta el porcentaje del componente de la materia prima. El gráfico de la Figura 2.14 es un diagrama de dispersión. Aunque la composición de la materia prima afecta claramente a la dureza del producto, también la afectan otros diversos factores, incluso con la misma composición. Por ello es por lo que la misma composición no siempre da la misma dureza. No obstante, dibujar los datos en un diagrama como éste nos dice varias cosas y nos da más información de la que podríamos obtener de una lista de valores como la de los datos de la Tabla 2.3.

(1) Algunas cuestiones que se deben observar al preparar los diagramas de dispersión

- (a) Cuando se investiga la correlación, cuantos más pares de datos, mejor. Debería haber por lo menos cincuenta pares y, si es posible, más de cien.
- (b) Los datos que se crea que son la causa, deben dibujarse sobre el eje horizontal (x), en una escala que aumente de valor de izquierda a derecha.
- (c) Los datos que se crea que son el efecto, deben dibujarse sobre el eje vertical (y), en una escala que aumente de valor de abajo a arriba.
- (d) Se deben elegir las escalas x e y de forma que den una dispersión aproximadamente igual de ancha para los datos x e y . Los datos que se crea que son anómalos deben aislarse y considerarse por separado. Los datos deben estar todo lo estratificados que sea posible, y los datos procedentes de diferentes fuentes se deben dibujar sobre diagramas de dispersión separados, o sobre el mismo diagrama pero con colores diferentes.

Tabla 2.3: Ingrediente de la materia prima (en porcentaje) frente a la dureza del producto (N = 100)

Porcentaje del ingrediente	Dureza media										
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0,52	26,2	0,45	23,5	0,70	27,2	0,99	29,4	0,35	23,8	0,36	23,1
0,58	25,4	0,73	28,4	0,41	23,3	0,07	19,8	1,10	30,7	0,62	29,2
0,66	24,2	0,28	23,6	0,40	26,4	0,93	27,7	0,18	22,7	0,65	26,3
0,18	22,7	0,45	26,2	0,65	26,4	0,97	30,0	0,18	21,6	0,93	28,5
1,00	30,0	0,38	21,9	0,63	27,1	0,76	27,0	0,40	22,1	0,11	24,0
0,71	26,9	0,67	25,4	0,87	30,5	0,10	22,8	0,36	23,9	0,65	28,1
0,87	27,0	0,37	23,6	0,18	21,4	0,69	28,1	0,58	27,6	0,82	29,0
0,36	25,3	1,03	28,4	0,88	29,5	0,35	24,5	0,32	21,8	0,79	27,3
0,62	25,6	0,29	23,9	0,44	23,3	0,54	25,0	0,20	22,4	0,36	24,4
0,73	27,3	0,70	24,4	0,94	30,1	0,65	26,0	0,80	29,0	0,08	28,0
0,76	28,7	0,58	25,1	1,13	28,6	0,96	27,9	1,11	29,6	0,21	20,2
0,40	24,6	0,59	26,5	0,25	27,7	0,85	29,4	0,18	23,1	0,91	31,5
0,24	22,4	0,20	24,1	0,27	22,5	1,07	30,5	0,42	25,4	0,79	27,1
0,94	31,0	0,18	20,1	0,60	25,8	0,37	20,4	0,71	24,4	0,29	21,8
0,94	29,8	0,21	23,5	0,76	28,4	0,42	25,6	0,52	24,3	0,92	30,0
0,90	30,3	0,45	26,4	0,62	28,3	1,09	29,2	0,95	30,5	1,11	29,8
0,52	25,1	0,93	31,8	0,11	20,1	0,72	27,3				

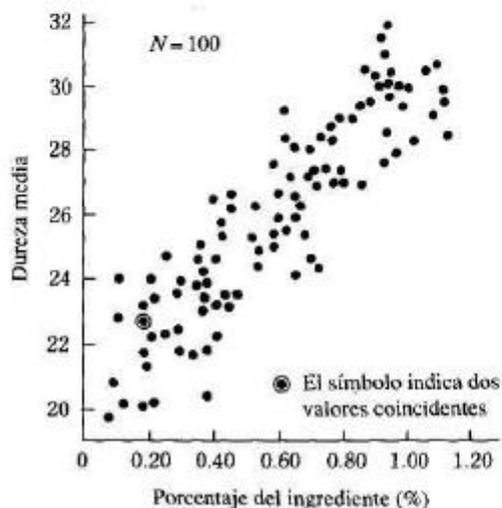


Figura 2.14: Ejemplo de diagrama de dispersión (diagrama de correlación): Relación entre el porcentaje del ingrediente en la materia prima y la dureza media del producto

(2) Tablas de correlación

Los diagramas de dispersión indican claramente la relación entre dos conjuntos de datos, pero las tablas de correlación (distribuciones de frecuencias en dos dimensiones), tales como la Tabla 2.4, pueden ser utilizadas con el mismo propósito. Cuando se dibuja una tabla de correlación con los datos de la Tabla 2.3, adopta la forma de la Tabla 2.4.

Los diagramas de dispersión mostrados en la Figura 2.15 ilustran varios tipos de correlación. Cuando los datos están bien alineados como en la Figura 2.15(a), inmediatamente vemos la relación entre ellos. Una relación como ésta en la que y aumenta cuando x aumenta se llama "correlación positiva", mientras que una relación en la que y disminuye cuando x aumenta (y viceversa) se llama "correlación negativa". En la Figura 2.15(c) los datos están dispersos pero indican una correlación positiva. La Figura 2.15(d) muestra una correlación negativa. Cuando los datos están tan dispersos como en la Figura 2.15(e), no está claro si podemos o no afirmar que haya una correlación positiva. De hecho, también tenemos que ser cautos en afirmar una correlación cuando los datos están tan dispersos como en (c) y (d). En tales casos cometeremos todo tipo de equivocaciones a menos que basemos nuestros juicios en pruebas estadísticas (ver la sección 4A.8).

**Tabla 2.4: Ejemplo de tabla de correlación.
Porcentaje del ingrediente (x)**

Número de celda Valores de las fronteras de la celda x		Número de celda Valores de las fronteras de la celda y											Frecuencia f_i
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		0	0.105	0.205	0.305	0.405	0.505	0.605	0.705	0.805	0.905	1.005	
		0.105	0.205	0.305	0.405	0.505	0.605	0.705	0.805	0.905	1.005	::	
12	30.05 -									//	///	//	9
11	29.05 - 30.05							/		///	////	///	13
10	28.05 - 29.05							//	//		//	//	10
9	27.05 - 28.05						/	/	///	/	/		10
8	26.05 - 27.05				/	//	//	//	/				9
7	25.05 - 26.05				/	//	///	///					10
6	24.05 - 25.05			//	//	/	/	/	//				9
5	23.05 - 24.05		//	///	///	///							12
4	22.05 - 23.05	/	//	///	/								7
3	21.05 - 22.05		//	/	//								5
2	20.05 - 21.05	/	//	/	/								5
1	19.05 - 20.05	/											1
Frecuencia f_i		3	8	10	12	8	7	13	12	8	12	7	100

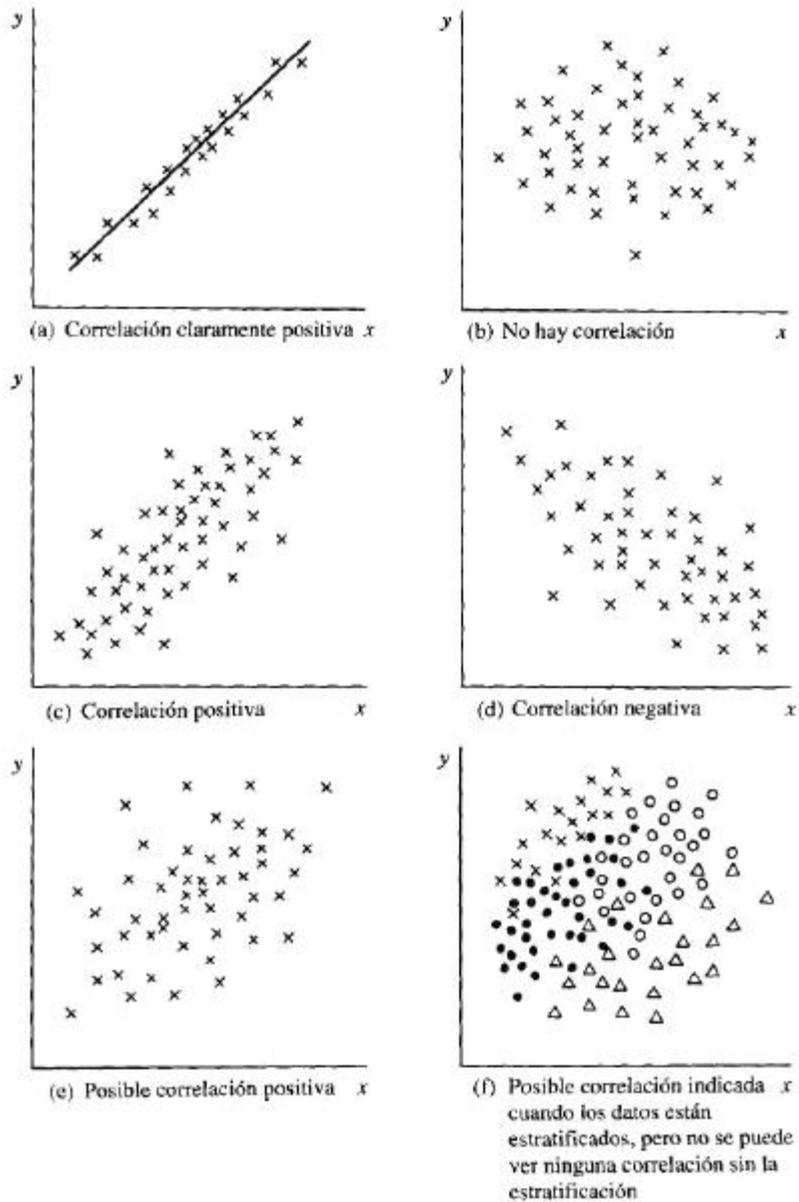


Figura 2.15: Diagramas de dispersión de diversas formas

Cuando se mira en conjunto, la Figura 2.15(f) parece no indicar ninguna correlación, pero cuando se dibujan las diferentes materias primas con símbolos diferentes, cada conjunto de datos muestra una correlación positiva. La preparación de los diagramas de dispersión requiere cuidado, ya que podemos pasar por alto una correlación si no estratificamos los datos de este modo.

2.10 ¿Qué es el error?

No hace falta decir que es ventajoso basar nuestras discusiones sobre diversas cuestiones en los datos, pero también es peligroso exagerar éstos. A continuación hay unos ejemplos de este peligro.

- (1) Si tomamos una muestra al azar de veinte artículos de un lote que contiene mil, y encontramos que ninguno de los artículos muestreados es defectuoso, ¿podemos decir que no hay unidades defectuosas en el lote?
- (2) Hasta el momento, la fracción de unidades defectuosas media era del diez por cien, pero hoy es del doce por cien. ¿Podemos decir que el resultado de hoy es especialmente malo?
- (3) Se analizó determinado producto químico y se encontró que tenía una pureza de 87,5%. ¿Podemos decir realmente que el producto tiene una pureza de 87,5%?
- (4) Un termómetro da una lectura de 850°C. ¿Podemos decir que la temperatura del horno del cual se tomó la lectura era realmente de 850°C?

La respuesta a todas las preguntas anteriores es "no" porque el proceso de obtención de datos introduce varios errores, tales como el error de muestreo, el error de medición, el error de cómputo, el error de redondeo, etc. Tenemos que tratar de identificar el verdadero estado de la cuestión a través de un velo de errores.

Convencionalmente, sin embargo, o bien se han ignorado totalmente estos errores o bien se ha jugueteado un poco con la palabra "error" y su significado ha sido extremadamente ambigua. De ahora en adelante tenemos que pensar en los errores bajo los siguientes nombres:

- (a) Errores de muestreo.
- (b) Errores de medida.
- (c) Errores de cómputo y otros.

Si nuestros métodos de muestreo son deficientes y no sabemos por qué estamos recogiendo datos, o si el error de muestreo es demasiado grande, las variaciones del proceso y otras variaciones estarán enmascaradas por los errores, y seguiremos sin conocerlas. Así pues, cuando se ponen en vigor diversos tipos de control en los que se hacen uso de datos numéricos, primero tenemos que racionalizar nuestros métodos de muestreo⁴. Se dice a menudo que las personas no son buenas con los números porque fácilmente se creen un conjunto de números cuando se les muestra, y se olvidan de los grandes errores de muestreo que hay en él. Especialmente cuando se pone en práctica el control de calidad, tenemos que racionalizar nuestros métodos de muestreo y preparar el terreno para recoger datos exactos.

Igualmente, a menudo los errores de análisis, de medida y experimentales son grandes. Estos errores son especialmente horriblos cuando los datos se toman en días diferentes, en diferentes lugares, por personas diferentes o en equipos diferentes. Cuando se pone en práctica el control, estos errores tienen que mantenerse pequeños. Para lograrlo, tenemos que realizar un control global de las medidas y un control del análisis en su sentido amplio.

Siempre que se estén manejando números, habrá equivocaciones de transcripción y de cálculo. Esto quiere decir que, al mismo tiempo que nos aseguramos de que se tenga mucho cuidado en la manipulación de los datos, tenemos que establecer sistemas que permitan la detección rápida de estas equivocaciones.

Los errores también pueden clasificarse en:

- (i) Errores de fiabilidad,
- (ii) errores de precisión, y
- (iii) errores de sesgo y de exactitud.

Este método de clasificación hace hincapié en que hay que acometer acciones correctoras para minimizar los errores de muestreo, los errores de medida y otros tipos de errores descritos más arriba. Primero, demos algunas definiciones:

El error es la diferencia entre un valor medido y el valor verdadero de la población de referencia.

La fiabilidad es el grado en que se puede confiar en los datos; en otras palabras, si se utilizara el mismo método de muestreo para todos los datos y si el trabajo analítico y el experimental estuviesen libres de causas asignables tales

⁴ Para más detalles, ver Kaoru Ishikawa, *Sanpuringu-ho Nyumon* (Introducción a los métodos de muestreo), JUSE Press (en japonés).

como las equivocaciones y las omisiones. La fiabilidad también puede considerarse con los nombres diferentes de fiabilidad de precisión y fiabilidad de exactitud. Cualquiera que sea el método de clasificación utilizado, asegurar la fiabilidad es una cuestión de controlar el trabajo de tomar las muestras y las medidas.

Observaciones tales como: "Hay algo raro en estos datos", "El muestreo no se hizo correctamente", "El análisis es malo", y "El cálculo está mal" indican la falta de fiabilidad y de control. Los datos no fiables no sirven de nada excepto para dar una falsa sensación de seguridad.

La precisión implica el grado de dispersión de los datos: si algo se mide un número infinito de veces con el mismo método, o se toma un número infinito de muestras del mismo lote y con el mismo método de muestreo, siempre habrá dispersión en los datos; el grado de esta dispersión (la anchura de la distribución) se llama precisión. La precisión se puede indicar de diversas maneras tales como la desviación estándar, la varianza, la desviación estándar multiplicada por dos, los límites de control del recorrido (R), el valor medio de R , etc. Afirmaciones escuchadas antiguamente como: "El error está alrededor de $\pm 0,5\%$ " están mal definidas y son, por tanto, extremadamente ambiguas, y no está nada claro lo que significan.

El sesgo, o la exactitud, es la diferencia entre un valor verdadero y la media de la distribución de los valores obtenidos en un número infinito de medidas con el mismo método. Por ejemplo, la afirmación: "Nuestros valores parecen ser, de media, $0,5 \text{ kg/cm}^2$ más altos que los de ellos" indica un sesgo.

Nota: Ya que hay cierta confusión sobre el uso de palabras tales como "error", "exactitud" y "precisión", surgirán malentendidos cuando se lea la bibliografía a menos que se preste mucha atención a sus definiciones.

Asegurar la precisión y la exactitud es principalmente un problema de las técnicas de medida y de muestreo y de los estudios estadísticos. Cuando se investiga el error, es mejor hacerlo en el orden de (i) a (iii) anterior, i.e., empezando con la fiabilidad, pasando a la precisión y finalmente al sesgo.

La clasificación y el análisis de los errores con los nombres anteriores, nos dice qué debemos hacer para minimizarlos. Cuando los datos no son fiables, puede que sea una cuestión de controlar la recogida de datos al formular unas buenas normas para los métodos de muestreo y asegurarse de que se ponen en práctica; cuando hay sesgo, tenemos que buscar la causa de la desviación de la media y acometer acciones correctoras; y cuando la precisión es deficiente, tenemos que acometer acciones para reducir la dispersión.

La relación entre los diferentes tipos de error se muestra con diagramas en la Figura 2.16 para que sea fácilmente comprensible.

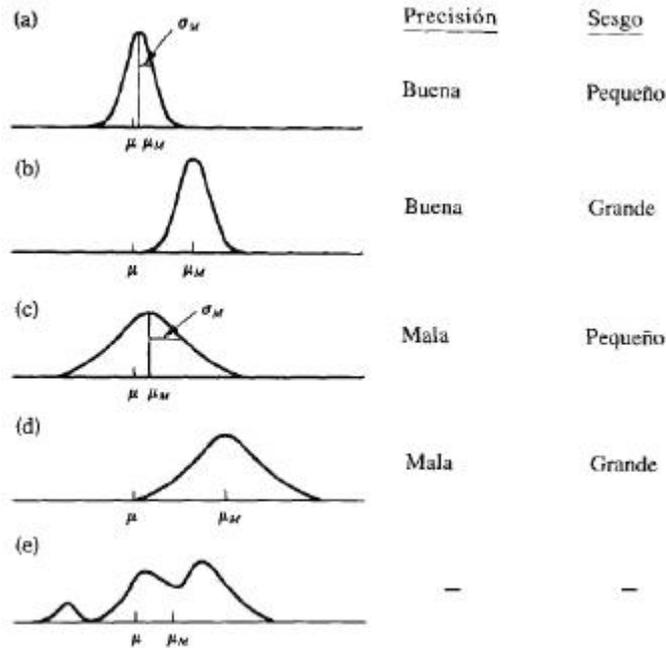


Figura 2.16: Tipos de errores

2A.1 Preparación de las distribuciones de frecuencias

Las tablas e histogramas de las distribuciones de frecuencias, como los gráficos de control, son unas herramientas importantes para organizar varias clases de datos, particularmente en control de calidad. Por tanto, explicaré brevemente cómo se preparan.

Cuando dibujamos las distribuciones de frecuencias, tenemos que considerar lo siguiente:

- (a) Cuántas celdas⁵ poner.
- (b) Cómo decidir el ancho de las celdas.
- (c) Cómo determinar las fronteras de las celdas.

(1) Número de celdas

Para mostrar la forma de una distribución, se debe elegir el número de celdas como se indica en la Tabla 2A. 1. En la práctica, el número exacto estará

5

Sinónimos de celda: intervalo, clase, e intervalo de clase. (TV. de los T.)

determinado de forma natural si se decide el ancho y los límites de las celdas con referencia a esta tabla. Es mejor un número mayor de celdas para los cálculos estadísticos, pero los números aproximados indicados en la tabla 2A.1 son satisfactorios cuando se tiene en cuenta el error de muestreo.

Tabla 2A.1: Número recomendado de celdas para las distribuciones de frecuencias

Número de valores	Número de celdas
50-100	6-10
100-250	7-12
≥ 250	10-20

(2) Ancho de la celda

El ancho de la celda se determina como sigue:

Primer paso: Encontrar los valores máximo y mínimo de los datos, pero no incluir los datos anómalos extremos cuando se haga esto. Los valores máximo y mínimo de los datos de la Tabla 2.1 son 3,99 y 3,70.

Segundo paso: Dividir la diferencia entre los valores máximo y mínimo por el número de celdas. En este ejemplo, tenemos $(3,99 - 3,70)/10 = 0,029$.

Tercer paso: Fijar el ancho de la celda en un valor conveniente cercano al valor obtenido en el segundo paso y que sea un múltiplo entero de la unidad de medida más pequeña. En este ejemplo, la unidad de medida más pequeña es 0,01, por tanto establecemos el ancho de la casilla en 0,03.

(3) Fronteras⁶ de las celdas

Las fronteras de las celdas se determinan como sigue:

Primer paso: Tomar la mitad de la unidad de medida más pequeña como unidad para las fronteras de las celdas.

Segundo paso: Establecer los límites de las casillas para que los valores máximo y mínimo de los datos queden aproximadamente equidistantes de las fronteras de las respectivas celdas más extre-

6

La diferencia entre límite y frontera de clase se puede consultar en MINER, "Calidad Industrial, Glosario Terminológico", MINER 1986, pp. 62-63. (N. de los T.)

mas. Sin embargo, no hay necesidad de ser demasiado estricto con esto. En este ejemplo, si establecemos las fronteras de las celdas en 3,695-3,725,... 3,965-3,995, tenemos $3,70-3,695=0,005$ y $3,995-3,99=0,005$.

Nota: cuando queramos hacer comparaciones con los estándares u otros valores, es conveniente establecer las fronteras de las celdas para que coincidan aproximadamente con estos valores.

(4) Preparación de la tabla

Una vez se haya decidido el número, al ancho y la posición de las celdas tal como se ha descrito antes, dispondremos los datos en una tabla. Como en las dos columnas de la izquierda de la Tabla 2.2, se anotan los números de las celdas y las fronteras de las mismas en orden creciente, desde la parte superior a la inferior de la tabla. Los puntos medios de las celdas⁷, que representan los valores de las mismas, se toman como los promedios de las fronteras de las celdas. En este ejemplo tenemos $(3,695+3,725)/2=3,710$, etc.

Si todo lo que hacemos es preparar una tabla de la distribución de frecuencias, sólo tenemos que llegar hasta las columnas del recuento y de las frecuencias (con las frecuencias relativas y las frecuencias acumuladas, si es necesario). Si estamos calculando la media, la desviación estándar u otros valores, tenemos que incluir también las columnas extra mostradas en la Tabla 2A.2.

(5) Recuento

El recuento consiste en tomar secuencialmente los datos tal como se obtienen y poner trazos en la columna correspondiente. Los trazos se hacen como sigue: /, //, ///, ////, #####. Puesto que es fácil cometer equivocaciones cuando se hace esta operación de recuento, siempre se debe hacer dos veces. La Tabla 2.2 se preparó según el procedimiento anterior.

7

Marcas de clase. (*N. de los T.*)

2A.2 Métodos para calcular los estadísticos⁸

Tabla 2A.2: Cálculo de \bar{x} y s a partir de la tabla de distribución de frecuencias

Número de celda	Punto medio de la celda	Frecuencia f_i	u_i	$f u_i$	$f u_i^2$	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada relativa (%)
1	3,710	1	-5	-5	25	1	0,5
2	3,740	6	-4	-24	96	7	3,5
3	3,770	13	-3	-39	117	20	10,0
4	3,800	25	-2	-50	100	45	22,5
5	3,830	45	-1	-45	45	90	45,0
6	3,860= a	37	0	(-163)	0	127	63,5
7	3,690	43	1	43	43	170	85,0
8	3,920	13	2	26	52	183	91,5
9	3,950	8	3	24	72	191	95,5
10	3,980	9	4	36	144	200	100,0
Total	-	200	-	(129)	694	-	-
				-34			
Media	Dividir por 200			-0,170	3,470		

(1) Métodos para calcular la media

La media se puede calcular de la forma usual, sumando los valores de los datos y dividiendo por el número de valores. Aunque esto es bastante fácil, se puede simplificar más eligiendo una de las siguientes fórmulas:

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i \quad (2A.1)$$

$$= a + (1/n) \sum (x_i - a) \quad (2A.2)$$

$$= a + (h/n) \sum (x_i - a)/h \quad (2A.3)$$

donde a y h son las constantes pertinentes.

⁸

Los cálculos descritos más abajo pueden hacerse fácilmente hoy en día utilizando los microordenadores, miniordenadores o las calculadoras de bolsillo.

Ejemplo:

Fórmula 2A.1	Fórmula 2A.2	Fórmula 2A.3 $\left(\begin{matrix} a = 184 \\ h = 1/10 \end{matrix} \right)$
x_i	$x_i - 184$	$(x_i - 184) \times 10$
184,2	0,2	2
183,8	-0,2	-2
185,1	1,1	11
184,7	0,7	7
185,3	1,3	13
<hr/>	<hr/>	<hr/>
$n=5) \frac{923,1}{184,62}$	$n=5) \frac{3,1}{0,62}$	$n=5) \frac{31}{6,2}$
$\bar{x}=184,62$	$\bar{x}=184+0,62$ $=184,62$	$\bar{x}=184+6,2 (1/10)$ $=184,62$

Cuando los cálculos se realizan manualmente, las fórmulas 2A.2 y 2A.3 los simplifican mucho y reducen el tamaño del error si se comete una equivocación en el cómputo.

(2) Métodos para calcular la dispersión

Se utilizan diversos estadísticos para expresar la dispersión, y que incluyen. e.g., el recorrido (R), la suma de los cuadrados de las desviaciones (S), la varianza (s^2), la estimación insesgada de la varianza de la población (V), la desviación estándar de la muestra (s), y la raíz cuadrada de la estimación insesgada de la varianza de la población (\sqrt{V}). Aquí se explican brevemente algunos métodos de cálculo.

- (a) Recorrido, R : $R = \text{valor máximo} - \text{valor mínimo}$
 $= X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$

Ejemplo: para el conjunto de valores 8,8, 8,2, 8,4, 8,8, 8,3, $R = 8,8 - 8,2 = 0,6$.

(b) Suma de los cuadrados de las desviaciones, S (conocida también simplemente como "suma de cuadrados")- Este cálculo es el más largo pero puede simplificarse muchísimo si se elige un método de cálculo adecuado.

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2A.4)$$

$$= \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} = \sum x_i^2 - \left(\frac{T^2}{n} \right) = \sum x_i^2 - TC \quad (2A.5)$$

donde $T = \sum x_i$ = total de todos los valores de los datos. El término TC está dado por $TC = T^2/n$ y se llama "término de corrección".

$$S = \sum (x_i - a)^2 - \frac{(\sum (x_i - a))^2}{n} = \sum (x_i - a)^2/n - T^2/n \quad (2A.6)$$

donde $T = \sum (x_i - a)$.

$$S = h^2 [\sum ((x_i - a)/h)^2 - (\sum (x_i - a)/h)^2/n] \quad (2A.7)$$

Si se utiliza la fórmula 2A.4 en el ejemplo anterior, tenemos

$$\begin{aligned} S &= (8,8 - 8,50)^2 + (8,2 - 8,50)^2 + (8,4 - 8,50)^2 + (8,8 - 8,50)^2 + (8,3 - 8,50)^2 \\ &= 0,30^2 + 0,30^2 + 0,10^2 + 0,30^2 + 0,20^2 = 0,32 \end{aligned}$$

Cuando se calcula a mano, el cálculo es tanto más pesado cuanto mayor sea la cantidad de cifras significativas de x ; un miniordenador simplifica muchísimo éste cálculo.

En el caso de la fórmula 2A.5,

$$\begin{aligned} S &= 8,8^2 + 8,2^2 + 8,4^2 + 8,8^2 + 8,3^2 - 42,5^2/5 \\ &= 361,57 - 1.806,25/5 = 361,57 - 361,25 = 0,32 \end{aligned}$$

Este cálculo es bastante pesado.

En el caso de la fórmula 2A.6, podemos simplificar considerablemente el cálculo si tomamos $a = 8$:

$$\begin{aligned} S &= 0,8^2 + 0,2^2 + 0,4^2 + 0,8^2 + 0,3^2 - 2,5^2/5 \\ &= 1,57 - 1,25 = 0,32 \end{aligned}$$

En el caso de la fórmula 2A.7, tomando $a = 8$ y $h = 1/10$:

$$\begin{aligned} S &= 1/10^2 (8^2 + 2^2 + 4^2 + 8^2 + 3^2 - 25^2/5) \\ &= 32/100 = 0,32 \end{aligned}$$

(c) Varianza de la muestra V^2

$$\begin{aligned} V^2 &= [1/(n-1)] \sum (x_i - \bar{x})^2 \\ &= S/(n-1) \end{aligned}$$

En el ejemplo anterior, $V = 0,32/4 = 0,08$. Cuando n es grande, se puede hacer la aproximación de tomar n en vez de $n - 1$.

(d) Desviación estándar de la muestra s

$$s = \sqrt{V} = \sqrt{[1/(n-1)] \sum (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{S/(n-1)}$$

En el ejemplo anterior, $\sqrt{V} = \sqrt{0,08} = 0,283$

(3) Método para calcular la media y la desviación estándar a partir de las tablas de distribuciones de frecuencias

El procedimiento de este método de cálculo, para el cálculo manual, es:

Primer paso: Preparar una tabla como la Tabla 2A.2.

Segundo paso: En la columna «-», darle el valor 0 al valor que se crea que es aproximadamente igual a la media, y dar los valores -1, -2, -3, etc., a los valores por encima de éste, y los valores 1, 2, 3, etc., a los que están por debajo.

Tercer paso: Multiplicar la frecuencia f_i por u_i de cada casilla y anotar el resultado en la columna $f_i u_i$. Dejar en blanco la fila $u_i = 0$. En este ejemplo, el valor de $f_i u_i$ de la casilla número 1 es $1 \times (-5) = -5$.

Cuarto paso: Sumar todos los números (negativos) por encima de la línea correspondiente a $u = 0$, y anotar el total en el espacio $u_i = 0$. Sumar todos los valores (positivos) por debajo de la línea $u_i = 0$, y anotar el resultado como se muestra en la tabla. Sumar los dos totales y anotar el resultado en el espacio apropiado de la fila de "totales". En este ejemplo, tenemos $-163 + 129 = -34$.

Quinto paso: Dividir el valor obtenido en el cuarto paso por el número total de valores (la suma de los números de la columna f_i) y llamar

$$E_1 = (1/n) \sum (f_i u_i) / h$$

$$= (1/n) \sum (f_i u_i)$$

$$= -34/200 = -0,170$$

Sexto paso: Calcular la media a partir de la fórmula siguiente (ver la fórmula 2A.3):

$$\bar{x} = a + hE_1$$

donde a es el punto medio de la casilla $u_i = 0$ ($a = 3,860$ en este ejemplo), h es el ancho de las casillas ($h = 0,03$ en este ejemplo), y E_1 es el valor obtenido en el quinto paso ($E_1 = -0,170$ en este ejemplo):

$$\bar{x} = 3,860 + (0,03)(-0,170) = 3,860 - 0,0051 = 3,8549$$

Séptimo paso: Para cada casilla, multiplicar $f_i u_i$ por u_i , y anotar los resultados en la columna $f_i u_i^2$. Todos estos valores serán cero o positivos.

Octavo paso: Sumar todos los valores $f_i u_i^2$. En este ejemplo, el total es 694.

Noveno paso: Dividir el valor obtenido en el octavo paso por el número de valores y llamar al resultado E_2 .

$$E_2 = \left\{ \frac{1}{n} \sum (f_i u_i^2) \right\} / h^2$$

$$= (1/n) \sum f_i u_i^2$$

$$= 694/200 = 3,470$$

cuando $n = 200$ como en este ejemplo, podemos dividir por n en vez de $n - 1$.

Décimo paso: Calcular las desviaciones estándar a partir de la fórmula siguiente (ver la fórmula 2A.7):

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{\frac{\sum E^2}{n} - \frac{E_1^2}{n^2}} \\ &= 0,03 \sqrt{3,470 - (0,170)^2} = 0,03 \sqrt{3,441} \\ &= 0,03 \times 1,855 = 0,0556 \end{aligned}$$

Debe observarse que el cálculo anterior es un método simplificado que supone que todos los valores dentro de cada casilla son iguales al punto medio de la casilla, Le., es lo mismo que redondear. Sin embargo, el método es aceptable en la práctica.

Son pertinentes unas pocas observaciones referentes a estos cálculos. Primero, al calcular cada frecuencia como porcentaje del total como en la Tabla 2.2. y mostrar una distribución en función de las "frecuencias relativas" resultantes nos permite ver fácilmente la forma de la distribución, y es especialmente conveniente para comparar varias distribuciones preparadas con diferentes datos numéricos.

Segundo, los totales arrastrados de los datos numéricos por encima de cierto valor (valor frontera), como en la penúltima columna de la Tabla 2A.2, se llaman "frecuencias acumuladas". Son convenientes para hacer comparaciones con las especificaciones y para calcular estadísticamente las curvas de distribución. El porcentaje de las frecuencias acumuladas respecto del total se muestran en la columna del extremo derecho; se llaman "frecuencias acumuladas relativas". En algunos casos, es más conveniente calcular éstas partiendo de un valor más grande y desplazándose hacia arriba por la tabla, e.g., cuando una especificación se da en la forma de un valor máximo permisible.

Y tercero, cuando el cálculo se hace con un ordenador, en el segundo paso se debe dar a w , el valor de cero para la casilla número 1, y a las restantes casillas se deben asignar los valores 1, 2, 3, etc. hacia abajo de la tabla.

2A.3 Distribuciones de los estadísticos

Cuando se sacan muestras al azar de una población, los datos de la muestra estarán dispersados. Por tanto, los valores de la media, el recorrido, la fracción de unidades defectuosas y otros estadísticos de las muestras también estarán dispersados. Esta distribución de los estadísticos sigue ciertas leyes.

Estas distribuciones están determinadas por su media (esperanza $E()$) y dispersión (desviación estándar $D()$) o varianza $V()$ junto con su forma. Esto se muestra en las Tablas 2A.3 y 2A.4.

Tabla 2A.3: Distribuciones de los estadísticos (para variables).

Población infinita (media de la población μ , varianza de la población σ^2)

Estadístico	Símbolo	Hipótesis	Media $E()$	Desviación estándar $D()$	Varianza $V()$	Forma de la distribución
Media	\bar{x}	Ninguna	μ	σ/\sqrt{n}	σ^2/n	Se aproxima a la distribución normal al aumentar n
Varianza	V	Distribución normal	σ^2	$\sqrt{\frac{2}{n-1}} \sigma^2$	$\frac{2}{n-1} \sigma^4$	La cola se extiende hacia el lado del valor más alto
Desviación estándar	s	"	$c_2 * \sigma$	$c_3 * \sigma$	$(c_3 * \sigma)^2$	"
Recorrido	R	"	$d_2 \sigma$	$d_3 \sigma$	$(d_3 \sigma)^2$	"

C_2^* , C_3^* , d_2 y d_3 son coeficientes para la distribución normal cuyos valores varían con n . Se obtienen en tablas (ver la Tabla 2A.5 y la Tabla 3.3). Sus valores no cambian mucho aunque la distribución de la población no sea exactamente normal.

Tabla 2A.4: Distribuciones de los estadísticos (para enumerables)

Estadístico	Símbolo	Población	Media	Desviación estándar $D()$	Distribución	Forma de la distribución
Proporción de unidades defectuosas	p	P	P	$\sqrt{P(1-P)/n}$	Binomial	La cola se extiende hacia la derecha
Número de unidades defectuosas	$r = pn$	P	nP	$\sqrt{nP(1-P)}$	Binomial	
Número de defectos por unidad	$\mu = c/n$	U	U	$\sqrt{U/n}$	Poisson	Se aproxima a la distribución normal al aumentar n
Número de defectos	c	C	C	\sqrt{C}	Poisson	

Esta distribución de los estadísticos es una de las características básicas importantes de las herramientas estadísticas.

Tabla 2A.5: Coeficientes para la distribución de la desviación estándar

Tamaño de la muestra	Media C_2^*	Desviación estándar C_3^*	Tamaño de la muestra	Media C_2^*	Desviación estándar C_3^*
2	0,798	0,603	10	0,973	0,232
3	0,886	0,463	15	0,982	0,187
4	0,291	0,839	20	0,987	0,161
5	0,940	0,341	30	0,991	0,113
6	0,952	0,308	40	0,994	0,113
7	0,959	0,282	50	0,995	0,101
8	0,965	0,262	100	$1-1/4n$	$1/\sqrt{2n}$
9	0,969	0,246			

Preparación y uso de los gráficos de control

3.1 ¿Qué son los gráficos de control?

En sentido amplio, los gráficos de control incluyen toda clase de gráficos utilizados con fines de control. Se han usado durante mucho tiempo, desde que el Dr. W. A. Shewhart acuñó el término por primera vez en 1926. Definámoslo aquí como "una herramienta estadística utilizada con fines de control, que consiste en unos gráficos con unas líneas que son los límites de control calculadas estadísticamente". No nos preocuparemos aquí de una definición más exacta y llamaremos gráfico de control a cualquier gráfico obtenido según los métodos descritos más abajo. Sin embargo, tenemos que trazar una distinción clara entre los gráficos de ajuste y los de control, ya que a veces se confunde el uso de los primeros (descritos en la sección 3.9.1) con el de los segundos. Puesto que los gráficos de control se pueden utilizar para todos los tipos de control, es mejor evitar el término "gráfico de control de calidad".

El papel básico de los gráficos de control en el ciclo de control se mencionó en la sección 1.5. Sin embargo, también tienen otras diversas aplicaciones.

3.2 Tipos de gráficos de control

Hay muchas clases de gráficos de control que muestran varios estadísticos y datos, cuyos límites de control se calculan por medio de varios métodos estadísticos. Aquí hablaremos de los que emplean los límites de control 3-sigma,

ya que son el tipo más básico, práctico y ampliamente utilizado. Su uso hábil permite que casi todas las formas de control vayan bien.

Como se explicó en la sección 2.3, las variables y los atributos son estadísticamente diferentes. También hay diferencias incluso entre los atributos; los datos de la fracción de unidades defectuosas y del número de unidades defectuosas están distribuidos de forma diferente a los datos del número de defectos, y requieren diferentes tipos de gráficos de control. Los gráficos de control se pueden clasificar en los tres tipos principales descritos más abajo, de acuerdo con la naturaleza de los datos que representan.

(1) El gráfico \bar{x} - R , el gráfico x - R , y el gráfico x (ver las secciones 3.3, 3A.1 y 3A.2)

Estos tipos de gráficos de control se utilizan cuando la característica del proceso que se ha de controlar es una variable continua tal como la longitud, el peso, la resistencia, la pureza, el tiempo o el volumen de producción. Sin embargo, también se pueden utilizar para otros tipos de datos.

El gráfico \bar{x} se utiliza principalmente para observar los cambios en la media de una distribución. El gráfico x (mediana) se utiliza a veces en lugar del gráfico \bar{x} . El gráfico R se utiliza para observar los cambios en la dispersión, o la variación, de una distribución. El gráfico s (desviación estándar) se utiliza a veces en lugar del gráfico R en casos muy especiales, pero no se trata en este libro.

Los gráficos \bar{x} y R se utilizan juntos generalmente, ya que sólo su uso conjunto nos permite identificar el estado cambiante de un proceso en forma de distribución. De todos los tipos diferentes de gráficos de control, estos dos nos dan la máxima información técnica, lo que les hace utilísimos para el análisis técnico y los estudios de la capacidad de proceso. Cualquiera de ellos solo, sin embargo, no es suficiente para mostrar el cambio de una distribución, i.e., el cambio de la media y de la variación. El gráfico de control \bar{x} - R es la forma de gráfico de control más fundamental y útil, particularmente en las etapas iniciales del control de calidad. Los principiantes deben comenzar por utilizar este tipo de gráfico de control en diversas situaciones, con objeto de sentirse cómodos con la técnica del control de proceso.

El gráfico de control x se utiliza para trazar las variables individuales de datos sin más modificación, pero a menudo se utiliza incorrectamente, y se tiene que tener muchísimo cuidado en su uso.

(2) El gráfico p y el gráfico pn (ver las secciones 3.4 y 3.5)

Cuando se controla un proceso en el que la característica vital es un atributo tal como el número de unidades defectuosas en una muestra de un determi-

nado tamaño (e.g., "tres planchas de acero defectuosas de cien"), se utiliza o bien el gráfico de control p o el gráfico de control pn . Estos gráficos también se utilizan para representar los porcentajes de presencia, los datos obtenidos en lecturas instantáneas, el número de máquinas inservibles, etc. Sin embargo, ya que manejan datos expresados como conformidad o no conformidad, su uso requiere unos conocimientos técnicos del trabajo considerables.

El gráfico p se utiliza cuando el número de unidades defectuosas de una muestra se expresa como fracción de unidades defectuosas (p), mientras que el gráfico pn se utiliza cuando se expresa como número de unidades defectuosas (pn). Si el tamaño de la muestra (i.e., el número de productos de una muestra) se expresa por n , el gráfico pn se utiliza generalmente cuando n es constante, y el gráfico p cuando n varía. Estadísticamente, la fracción de unidades defectuosas (p) y el número de unidades defectuosas (pn) siguen la distribución binomial. Puesto que estos tipos de gráficos de control los comprende fácilmente cualquier persona, y los datos que requieren se recogen con facilidad, pueden ser utilizados por los operarios, los encargados de los puestos de trabajo, los directores de fábrica, etc.

Dos cuestiones tienen que señalarse concernientes a los gráficos p y pn . Primero, aun cuando se inspeccionen todos los productos producidos en un día, constituyen un lote que no es más que una muestra del proceso, y se debe utilizar un gráfico p o pn para controlar el proceso.

Segundo, incluso con datos expresados en porcentajes tales como las purezas o los rendimientos, se deben utilizar los gráficos \bar{x} - R o \bar{x} , no el gráfico p , cuando los porcentajes son continuos y los datos no pueden ser enumerados.

(3) El gráfico c y el gráfico u (ver las secciones 3.6 y 3.7)

Estos gráficos para atributos se utilizan cuando nos preocupa la variación del número de defectos de un único artículo o producto, e.g., el número de grietas, roturas, rasguños o manchas en la superficie de una sola plancha de acero, el número de motas en diez centímetros cuadrados de papel, el número de agujeros en una superficie pintada o niquelada, el número de defectos de un coche, etc.

Además de la calidad del producto, también se utilizan para investigar datos discretos tales como el número de personas lesionadas en una fábrica, el número de accidentes, el número de errores de cálculo, el número de errores al copiar en el diario, etc.

Los gráficos c y u se parecen mucho a los gráficos p y pn ; sin embargo, difieren en que los últimos, cuando r es el número de unidades defectuosas de una muestra de n unidades, r jamás puede ser superior a n , mientras que el número de defectos (c) en un gráfico de control c o u puede ser mayor que n . Estadísticamente se utilizan cuando los datos siguen la distribución de Poisson.

El gráfico de control c se utiliza cuando el tamaño de la muestra es fijo, e.g., cuando se toma como muestra una plancha de un área determinada (5 m de tejido, 1 televisor, etc.)- También se utiliza para trazar los números relativos a personas individuales, e.g., el número de errores de cálculo, el número de errores de copiado o el número de lápices u hojas de papel utilizados. En este aspecto, es muy similar al gráfico pn .

El gráfico de control u se utiliza para mostrar la variación del número de defectos por unidad cuando el tamaño de la muestra no es fijo, e.g., cuando el área de una plancha de acero o de hojas de papel tomados como muestra cambian con el tiempo. También se puede utilizar, por ejemplo, para el número de lesiones o el consumo de material de papelería en diferentes secciones de una fábrica cuando varía el tamaño de las secciones. En este aspecto, es muy similar al gráfico p .

Podemos decidir qué tipo de gráfico de control se debería utilizar al examinar la naturaleza de nuestras medidas y teniendo en cuenta las cuestiones anteriores.

3.3 Preparación de los gráficos de control de la media y el recorrido (\bar{x} - R)

Como se explicará más adelante en la sección 3.9, los gráficos de control tienen varias aplicaciones. Primero, sin embargo, me gustaría explicar el procedimiento para preparar los gráficos de control a partir de los datos existentes, i.e., los pasos para dibujar tales *gráficos con el propósito de analizar los datos del pasado*.

Explicaré cómo dibujar el tipo más importante de gráficos, el gráfico \bar{x} - R , pero la filosofía y el enfoque para hacerlo son exactamente los mismos que para los gráficos de control p , pn , c y u . Para preparar buenos gráficos de control hace falta mucho de ingenio y experiencia, pero primero y principal, uno tiene que conocer la manera básica de hacerlo.

(1) Recoger los datos

Es necesario recoger por lo menos cien elementos de datos relativamente recientes sobre las características del proceso (i.e., resultados) que suministrarán conocimientos técnicos y estadísticos importantes sobre el proceso desde el punto de vista del control. Los datos deben obtenerse bajo las mismas condiciones técnicas aproximadas que las probables previstas para el proceso en el futuro. Si los datos son escasos, cincuenta o incluso veinte valores serán suficientes, pero es mejor recoger cien o más si es posible. Los gráficos de con-

trol dibujados con datos escasos (e.g., con cincuenta o veinte elementos) siempre se deben volver a representar cuando haya más datos acumulados. Cuando se vuelvan a representar los gráficos, tendremos que, en la medida de lo posible, aclarar la historia de los datos y de los lotes de los que se tomaron. La calidad de los datos recogidos es tan importante como la cantidad.

(2) Estratificar los datos

Los datos se deben estratificar con arreglo a factores tales como la hora de la medición y el orden en que se produjeron los lotes y, si es posible, por proceso. Por ejemplo, la Tabla 3.1 muestra los datos sobre el espesor de unas planchas de acero. Se midieron cinco planchas cada hora; los datos están dispuestos, según el orden de la medición, en veinticinco grupos de izquierda a derecha, empezando por la esquina superior izquierda.

(3) Organizar los datos en subgrupos

Primero, los datos se disponen en subgrupos de tres a cinco elementos. En los gráficos de control, estos subgrupos también se conocen como "muestras". El número de datos puntuales de cada subgrupo se llama "*tamaño del subgrupo*" o "*tamaño de la muestra*" y usualmente se designa con la letra n . En la Tabla 3.2 los datos de la Tabla 3.1 han sido dispuestos por orden en subgrupos de tamaño $n = 5$. El *número total de subgrupos* obtenidos cuando los datos se disponen de este modo, llamado también "*número de muestras*" se designa con la letra k . En la Tabla 3.2, $k = 25$.

El paso siguiente es hacer los subgrupos (ver la sección 3.9.2) que, junto con la estratificación, es una operación vital que puede resultar útil o estropear un gráfico de control. En la mayoría de los casos, los subgrupos deben consistir en datos de cada día, turno, proceso, lote, etc., para que la variación dentro de los subgrupos debida a los factores técnicos sea relativamente pequeña, esto es, para que las causas que tengan el mayor efecto sobre el proceso aparezcan entre los subgrupos. En este ejemplo, puesto que se miden cinco planchas cada hora, hemos tomado las medidas horarias como subgrupos, con $n = 5$. Éste es el principio básico para hacer los subgrupos, pero los datos también se pueden agrupar según el orden de producción o el de medida si es difícil encontrar una base técnica para hacer los subgrupos. En la práctica se debe intentar hacer varios subgrupos basados en consideraciones técnicas, y se debe adoptar el método más conveniente para controlar el proceso.

El tamaño del subgrupo (n) debe ser el mismo, si es posible, para cada subgrupo. Por ejemplo, si un día se tomaron cuatro medidas, cinco otro, etc., los datos se deben dividir en subgrupos iguales (e.g., de cinco elementos), en secuencia temporal, siempre que no se piense que haya alguna diferencia partí-

Tabla 3.1: Espesor de las planchas (en milímetros)

(Número de datos puntuales (N) = 125)

2,1	1,9	1,9	2,2	2,0	2,3	1,7	1,8	1,9	2,1
2,1	2,1	2,2	2,1	2,2	2,0	1,9	1,9	2,3	2,0
2,1	2,2	2,0	2,0	2,1	2,1	1,7	1,8	1,7	2,2
1,8	1,8	2,0	1,9	2,0	2,2	2,2	1,9	2,0	1,9
2,0	1,8	2,0	1,9	2,0	1,8	1,7	2,0	2,0	1,7
1,8	1,9	1,9	3,4	2,1	1,9	2,2	2,0	2,0	2,0
2,2	1,9	1,6	1,9	1,8	2,0	2,0	2,1	2,1	1,8
1,9	1,8	2,1	2,1	2,0	1,6	1,8	1,9	2,0	2,0
2,1	2,2	2,1	2,0	1,8	1,8	1,8	1,6	2,1	2,2
2,4	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	1,9	1,9	1,9	1,9
2,0	1,9	1,9	2,0	2,2	2,0	2,0	2,3	2,2	1,8
2,2	2,2	2,0	1,8	2,2	1,9	1,9	2,0	2,4	2,0
1,7	2,1	2,1	1,8	1,9					

cular de un día a otro. Sin embargo, si hay razones técnicas para creer que el día supone una diferencia significativa, los datos se deben agrupar por días, con diferentes tamaños para los subgrupos ($n = 4$, $n = 5$, etc.). Puesto que, generalmente, la preparación y el uso de los gráficos de control se complican cuando los datos se disponen en subgrupos de tamaño diferente, el tamaño de los subgrupos debe mantenerse constante siempre que sea posible. Por ejemplo, si los datos del pasado caen de manera natural en subgrupos de tamaño $n = 5$ y $n = 4$, se puede eliminar un valor al azar de cada uno de los subgrupos de $n = 5$, lo que hace que el subgrupo tenga un tamaño constante de $n = 4$. Aquí sólo explicaré la situación cuando n es constante.

El tamaño del subgrupo se toma a veces como $n = 6 - 10$ en casos especiales, pero es mejor dividir los subgrupos más grandes como éstos en otros más pequeños de tamaño 5 o menor. El tamaño de $n = 2 - 5$ es el más utilizado para los subgrupos.

(4) Preparar hojas de datos (impresos para el registro de datos)

Es conveniente decidir desde el principio que los datos se registren en hojas de un formato especificado. Puesto que no sólo es una lata copiar los datos de los informes diarios y de otras fuentes, sino también antieconómico y hay tendencia a cometer errores, es mejor diseñar los impresos para los informes diarios como se muestra en la Tabla 3.2, que organiza los datos en subgrupos y permite que se hagan fácilmente diversos cálculos. Estos impresos deben dejar espacio para toda la información que sea posible relativa al proceso y a los datos a registrar.

Tabla 3.2: Ejemplo de hoja de datos para el gráfico de control $\bar{x} - R$

Para el gráfico de control $\bar{x} - R$		Registro de control de calidad N°. 0208		Director de fábrica	Director de departamento	Director de sección	Supervisor	Líder de grupo	Encargado	
Impreso N°. 1										
Nombre		Plancha			Fábrica					
Característica de calidad		Espesor			Sección					
Medidor		Taro Showa			Grupo de inspección					
Método de medida		Número de equipo: N°. 3			De:	Año	Mes	Día		
Unidad de medida		0,1 mm			A:	Año	Mes	Día		
Núm. de subgrupo	Día-Hora	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	\bar{x}	R	Iniciales inspector	
1	1-9	2,1	1,9	1,9	2,2	2,0	2,02	0,3		
2	10	2,3	1,7	1,8	1,9	2,1	1,96	0,6		
3	11	2,1	2,1	2,2	2,1	2,2	2,14	0,1		
4	12	2,0	1,9	1,9	2,3	2,0	2,02	0,4		
5	14	2,1	2,2	2,0	2,0	2,1	2,08	0,2		
6	15	2,1	1,7	1,8	1,7	2,2	1,90	0,5		
7	16	1,8	1,8	2,0	1,9	2,0	1,90	0,2		
8	2-9	2,2	2,2	1,9	2,0	1,9	2,04	0,3		
9	10	2,0	1,8	2,0	1,9	2,0	1,94	0,2		
10	11	1,8	1,7	2,0	2,0	1,7	1,84	0,3		
11	12	1,8	1,9	1,9	2,4	2,1	2,02	0,6		
12	14	1,9	2,2	2,0	2,0	2,0	2,02	0,3		
13	15	2,2	1,9	1,6	1,9	1,8	1,88	0,6		
14	16	2,0	2,0	2,1	2,1	1,8	2,00	0,3		
15	3-9	1,9	1,8	2,1	2,1	2,0	1,98	0,3		
16	10	1,6	1,8	1,9	2,0	2,0	1,86	0,4		
17	11	2,1	2,2	2,1	2,0	1,8	2,04	0,4		
18	12	1,8	1,8	1,6	2,1	2,2	1,90	0,6		
19	14	2,4	2,1	2,1	2,1	2,0	2,14	0,4		
20	15	2,1	1,9	1,9	1,9	1,9	1,94	0,2		
21	16	2,0	1,9	1,9	2,0	2,2	2,00	0,3		
22	4-9	2,0	2,0	2,3	2,2	1,8	2,06	0,5		
23	10	2,2	2,2	2,0	1,8	2,2	2,08	0,4		
24	11	1,9	1,9	2,0	2,4	2,0	2,04	0,5		
25	12	1,7	2,1	2,1	1,8	1,9	1,92	0,4		
Total							40,72	9,3		
Promedio							$\bar{\bar{x}} = 1,9888$	$\bar{R} = 0,372$		
Gráfico de control \bar{x} : (LC)		$\bar{\bar{x}} = 1,989$					$A_2 \bar{R} = 0,577 \times 0,372$			
(LCS)		$\bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 2,204$					$= 0,215$			
(LCI)		$\bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} = 1,774$								
Gráfico de control R : (LC)		$\bar{R} = 0,372$					Gráfico de control N°. AC103			
(LCS)		$D_4 \bar{R} = 2,115 \times 0,372 = 0,79$								
(LCI)		$D_3 \bar{R} = (\text{no aplicable})$								

(5) Calcular la media del subgrupo (\bar{x})

Se calcula la media (\bar{x}) de cada subgrupo. Para el grupo n° 1, el cálculo se realiza como se indica más abajo.

Aquí es pertinente una observación respecto al redondeo: en este cálculo, no es un problema grave cuando $n = 4$ o 5 , puesto que podemos dividir exactamente por estos números; pero no ocurre lo mismo en muchos casos, cuando $n = 3$ o 6 , que dan decimales periódicos. Para los gráficos de control, cuando se calculan las medias de los subgrupos, generalmente es suficiente calcular dos cifras significativas más que las medidas y redondear la última cifra. Por ejemplo, con estos datos, el cálculo es como sigue para los subgrupos de tamaño $n = 5$ y $n = 3$:

$$(2,1 + 1,9 + 1,9 + 2,2 + 2,0)/5 = 10,1/5 = 2,02$$

$$(2,1 + 1,9 + 1,9)/3 = 5,9/3 = 1,966 - 1,97$$

Para evitar introducir un sesgo cuando se calcula la media u otros estadísticos, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- (a) La cifra que se ha de redondear debe redondearse hacia abajo cuando es 4 o inferior a 4, y hacia arriba cuando es 6 o superior; así pues, $1,834 \rightarrow 1,83$; $1,976 \rightarrow 1,98$.
- (b) Cuando la cifra que se ha de redondear es 5, se debe redondear hacia arriba o hacia abajo dependiendo del valor de las cifras que le siguen:
 - i) Redondear hacia arriba cuando las cifras siguientes son mayores que 0, i.e.:
 $2,0451 \rightarrow 2,05$; $2,04501 \rightarrow 2,05$.
 - ii) Cuando la cifra siguiente es 0 o no hay más cifras, redondear hacia abajo cuando la cifra anterior a la que se va a redondear es par y hacia arriba cuando es impar, i.e.:
 $2,0250 \rightarrow 2,02$; $2,01500 \rightarrow 2,02$; $2,025 \rightarrow 2,02$; $2,015 \rightarrow 2,02$.
- (c) Redondear siempre de una vez para alcanzar el número de cifras requerido. Se puede obtener un resultado erróneo si se redondea en pasos sucesivos, e.g.:
 $2,5498 \rightarrow 2,550 \rightarrow 2,55 \rightarrow 2,5$ (correcto)
 $2,5498 \rightarrow 2,550 \rightarrow 2,6$ (incorrecto)
 $2,4502 \rightarrow 2,5$

(6) Calcular los recorridos de los subgrupos (R)

Se pueden calcular los recorridos (R) de cada subgrupo al restar el valor mínimo del subgrupo del valor máximo del mismo.

$$\text{Para el subgrupo n° 1, } R = 2,2 - 1,9 = 0,3$$

Obsérvese que R es siempre 0 o mayor y jamás tiene un valor negativo. Por ejemplo, en un grupo tal como $(-1, -3, -5, -4)$, $R = (-1) - (-5) = 4$

(7) Calcular el promedio general (\bar{x})

El promedio general (\bar{x}) se calcula con los promedios de cada subgrupo (\bar{x}) . Obsérvese que el promedio general (\bar{x}) debe calcularse normalmente con tres cifras significativas más que las medidas y redondearse a dos cifras significativas más que las mismas.

(8) Calcular el promedio de los recorridos de los subgrupos (\bar{R})

El recorrido promedio (\bar{R}) se calcula con los valores de R para todos los subgrupos. Es suficiente con calcular \bar{R} con dos cifras significativas más que las medidas. Cuando se registra su valor en un gráfico de control, es suficiente una exactitud de una cifra significativa más que las medidas.

(9) Calcular las líneas de control

El gráfico \bar{x} - R requiere *líneas de control* para \bar{x} y para R . Cada tipo de gráfico de control tiene las tres líneas de control siguientes:

- El límite de control superior, LCS
- La línea central, LC
- El límite de control inferior, LCI

El término *límite de control* se refiere a los límites de control superior e inferior. Si los puntos dibujados en un gráfico de control caen dentro de los límites, el gráfico indica un estado de control. Si algunos puntos caen por fuera de los límites, el gráfico indica que ha habido alguna anomalía en el proceso.

Las líneas de control se calculan de la siguiente forma (ver la Tabla 3.2):

(a) Líneas de control para el gráfico \bar{x}

- Línea central: $LC = \bar{\bar{x}}$
- Límite de control superior: $LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$
- Límite de control inferior: $LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$

A_2 es un coeficiente cuyo valor depende del tamaño del subgrupo, n .

La Tabla 3.3 da el valor de 0,577 para A_2 cuando $n = 5$.

$A_2 \bar{R}$ se tiene que calcular con el mismo número de cifras significativas que

Tabla 3.3: Coeficientes para los gráficos de control \bar{x} - R

Tamaño del subgrupo	Gráfico de control \bar{x}		Gráfico de control R				Relación entre $\hat{\sigma}$ y \bar{R} , $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$		
	A	A_2	D_1	D_2	D_3	D_4	d_2	$1/d_2$	d_3
2	2,121	1,880	—	3,686	—	3,267	1,128	0,886	0,853
3	1,732	1,023	—	4,358	—	2,575	1,693	1,591	0,888
4	1,500	0,729	—	4,698	—	2,282	2,059	0,486	0,880
5	1,342	0,577	—	4,918	—	2,115	2,326	0,430	0,864
6	1,225	0,483	—	5,078	—	2,004	2,534	0,395	0,848
7	1,134	0,419	0,205	5,203	0,076	1,924	2,704	0,270	0,883
8	1,061	0,373	0,387	5,307	0,136	1,864	2,847	0,351	0,820
9	1,000	0,337	0,546	5,394	0,184	1,816	2,970	0,337	0,808
10	0,949	0,308	0,687	5,469	0,223	1,777	3,078	0,325	0,797

\bar{x} , i.e., con dos cifras significativas más que las medidas. Obsérvese que los límites de control del gráfico \bar{x} dependen de R (la variación que hay dentro de los subgrupos).

(b) Líneas de control para el gráfico R

— Línea central: $LC = \bar{R}$

— Límite de control superior: $LCS = D_4 \bar{R}$

— Límite de control inferior: $LCI = D_3 \bar{R}$

D_4 , y D_3 , son coeficientes cuyos valores dependen del tamaño del subgrupo. Por ejemplo, si $n=5$, la Tabla 3.3 indica que $D_4=2,115$, mientras que D_3 no es aplicable.

La diferencia entre el gráfico de control R y el \bar{x} es que los LCS y LCI del primero se calculan multiplicando directamente \bar{R} por una constante, sin sumar ni restar nada. El límite de control inferior no es aplicable cuando $n \leq 6$.

$D_3 \bar{R}$ y $D_4 \bar{R}$ se deben calcular con el mismo número de cifras significativas que \bar{R} , i.e., una cifra significativa más que las medidas.

(10) Preparar los impresos de los gráficos de control

Los gráficos de control se dibujan sobre papel para gráficos; lo más fácil es utilizar papel con, por ejemplo, divisiones horizontales de 2-3 mm y divisio-

nes verticales de 1 mm. Las rayas del papel deben ser todo lo finas y tenues posible, ya que será difícil ver las líneas de control y los puntos si el rayado es demasiado grueso. Es conveniente que los impresos estén diseñados para que se puedan sacar copias fácilmente una vez hayan sido rellenas las hojas.

Los gráficos de control \bar{x} y R se representan uno encima del otro, y usualmente es suficiente una separación entre ambos de quince centímetros. El papel debe ser bastante largo, ya que los gráficos de control se extienden durante un periodo considerable de tiempo. Se debe dejar espacio en la parte inferior

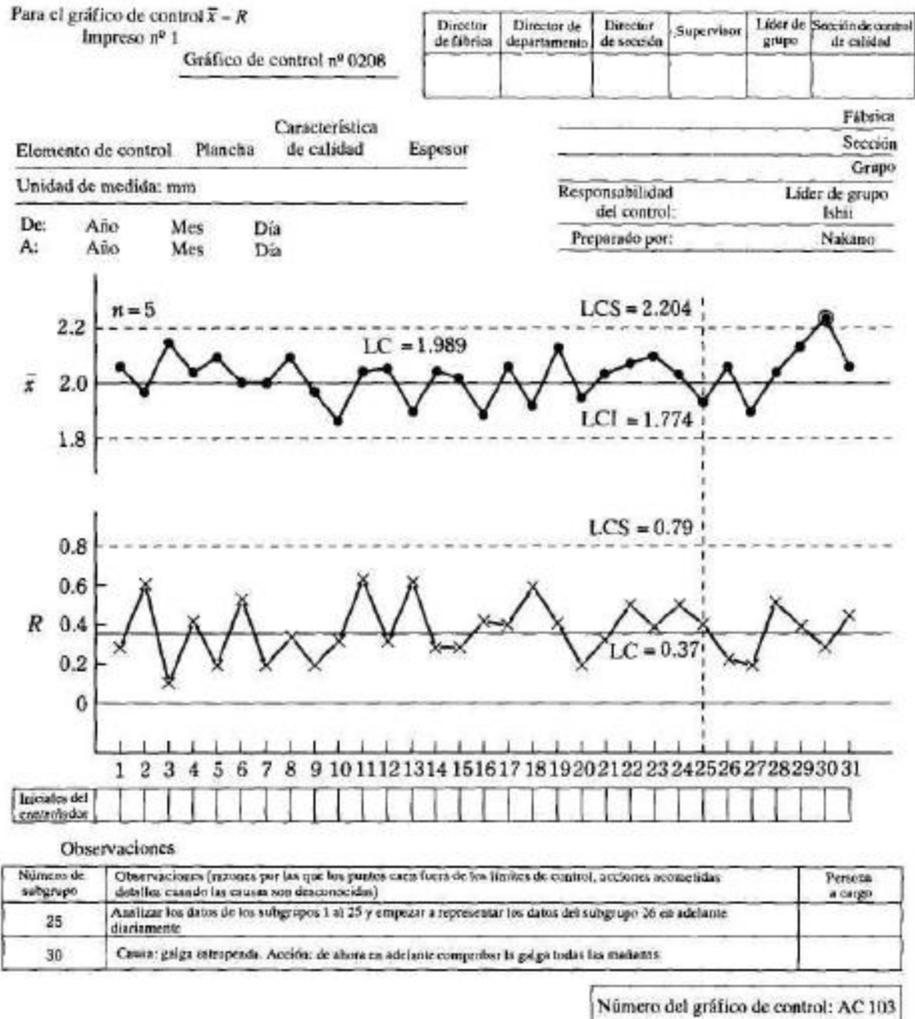


Figura 3.1: Gráfico de control $\bar{x} - R$

del gráfico para anotar información adicional. El papel debe ser de la mejor calidad posible puesto que puede ser necesario utilizar y guardar el gráfico durante mucho tiempo.

Cuando el control de calidad ha comenzado a llevarse a cabo en serio, los impresos de las hojas de datos y de los gráficos de control deben ser diseñados e impresos especialmente.

(11) Representar las líneas de control

El gráfico de control \bar{x} se traza en la parte superior del impreso, y el gráfico de control R debajo de aquel. Los números de los subgrupos (o la fecha, el número del lote, etc.) deben anotarse sobre el eje horizontal.

Tanto para el gráfico de control \bar{x} como el R , la escala vertical se debe elegir de forma que la anchura de los límites de control (i.e., la distancia entre el límite de control superior y la inferior) sea *aproximadamente de 30 mm*, y luego se anotan las *unidades*. Esto quiere decir que las escalas para los gráficos de control \bar{x} y R pueden ser diferentes. A menudo me encuentro con gráficos de control dibujados según el enfoque convencional de ingeniería que deja un hueco de diez centímetros o más entre los límites de control. Sin embargo, en los gráficos de control usualmente sólo nos interesa *si los puntos caen dentro o fuera de los límites*, y es una equivocación agrandar la escala vertical y, por tanto, centrar la atención en pequeños movimientos de los puntos situados entre los límites. En vez de ello, debemos tratar de hacer la escala todo lo pequeña posible y el papel todo lo largo posible con objeto de ver la tendencia a lo largo de un periodo extenso de tiempo. Es suficiente un intervalo de dos o tres milímetros entre los subgrupos -i.e., entre los puntos del eje horizontal; es suficiente con que se puedan distinguir los puntos individuales.

Los gráficos de control deben ser aseados, para que sean fáciles de usar y agradables a la vista, pero uno tiene que ser consciente de que se mancharán de grasa y suciedad durante su uso serio. La Figura 3.1 muestra un gráfico de control preparado con los datos de la Tabla 3.2.

Cuando los datos del pasado hayan sido analizados y hayan sido trazadas las líneas de control haciendo uso de tales datos, se debe indicar la línea central con un trazo continuo - y las líneas de los límites con trazos discontinuos ---- en todo tipo de gráfico de control. Estas líneas de control deben dibujarse hasta el número del subgrupo de la última medida utilizada para el análisis.

(12) Representar los puntos

La media (\bar{x}) y el recorrido (R) de cada subgrupo se representan según el orden del subgrupo en el gráfico \bar{x} y en el R respectivamente, y el valor de R

de cada subgrupo se representa directamente debajo del valor de \bar{x} para ese subgrupo. Cuando se representan los puntos se debe observar lo siguiente:

- (a) Los puntos se deben señalar con claridad. No dibuje puntos menuditos porque la escala sea pequeña; trácelos sin miedo para que sobresalgan y dejen ver el patrón que siguen de un vistazo.
- (b) Es mejor utilizar símbolos diferentes para los puntos de los gráficos \bar{x} y R ; por ejemplo, el \bar{x} se puede dibujar utilizando puntos (.) y el R utilizando cruces (x).
- (c) Si los datos están agrupados por turno, máquina, equipo, etc., si se estratifican los datos y se utilizan colores o símbolos diferentes para distinguir entre los diferentes estratos de datos, las cosas son más fáciles de ver.
- (d) Los puntos que caen por fuera de los límites de control (Le., puntos anómalos) deben señalarse claramente utilizando símbolos especiales tales como \square o \square o en rojo.
- (e) Los puntos que caen cerca de la línea central deben representarse con símbolos tales como *•  para indicar que están por arriba o por debajo de la línea.
- (f) Cuando se hayan representado los puntos, deben unirse por medio de una línea continua fina siguiendo el orden de los subgrupos. Cuando haya varios puntos para cada día o cada semana, el gráfico estará más claro si están unidos sólo los puntos de cada periodo, y se deja un hueco entre un periodo y el siguiente.

Resumiendo, los puntos deben representarse de modo que sean fáciles de ver, y deben estratificarse si es necesario.

(13) Registrar otras informaciones necesarias

Poner \bar{x} en el extremo izquierdo del gráfico de control \bar{x} y R en el extremo izquierdo del gráfico de control R . Arriba del gráfico de control, anotar toda la información necesaria pertinente, e.g., el producto, la característica de calidad, las unidades de medida, el nombre de la persona responsable de controlar el proceso, el nombre de la persona que rellena el gráfico, el periodo de tiempo durante el que se tomaron los datos, el número de referencia del gráfico de control, etc. En la esquina superior izquierda del gráfico de control \bar{x} , anotar el tamaño de los subgrupos, e.g., $n = 5$. Ponga el nombre de LCS, LC y LCI a las líneas de control como se muestra en la Figura 3.1, y anote sus valores.

(14) Resumen

La explicación anterior sobre la representación de los gráficos de control \bar{x} - R muestra que aunque el estudio de la estadística misma no es tan fácil, los gráficos de control se pueden preparar haciendo uso de las operaciones arit-

méticas sencillas de sumar, restar, multiplicar y dividir. En las fábricas japonesas que están adelantadas en el control de calidad, los supervisores de los puestos de trabajo y otras personas responsables del control utilizan los gráficos de control de manera rutinaria, al igual que los operarios de base, tanto hombres como mujeres.

Algunas diferencias entre los gráficos de control y los gráficos ordinarios son las siguientes:

- (a) Con los gráficos de control, los datos se dividen en subgrupos.
- (b) Los gráficos de control muestran los cambios de \bar{x} y de R .
- (c) Los gráficos de control muestran los límites de control que tienen significado estadístico.

Es eficazísimo representar los datos de este modo y permite que la situación de la fábrica se identifique mucho mejor que con los informes diarios usuales que no son más que un montón de números. El uso de las líneas de control también facilita la entrada en acción con respecto a un proceso.

Debe observarse que lo anterior es el procedimiento natural para representar los gráficos de control cuando se analizan los datos del pasado. Sin embargo, en los seminarios de control de calidad de las empresas, se pueden utilizar los datos procedentes de los *experimentos con bolas* o los datos reales de un puesto de trabajo para que proporcionen unas explicaciones fácilmente comprensibles de los conceptos de la variación debida a la dispersión de las muestras, y de los límites de control. En tales situaciones, se debe hacer que los participantes dibujen gráficos de control con arreglo al procedimiento siguiente para que lo comprendan fácilmente:

1. Preparar hojas de datos.
2. Llevar a cabo experimentos con bolas, y hacer subgrupos con los datos.
3. Preparar impresos para gráficos de control en blanco.
4. Calcular los valores de \bar{x} .
5. Representar \bar{x} (cuando se haga esto, hacer que los participantes utilicen una escala que de una distancia aproximada de treinta milímetros entre los límites de control).
6. Calcular los valores de R .
7. Representar R (hacer también que los participantes elijan una escala que dé una distancia de treinta milímetros entre los límites de control en este caso, y hacer que representen R directamente debajo de \bar{x} para cada subgrupo).
8. Calcular $\bar{\bar{x}}$ y anotarlo.
- 9- Calcular $\bar{\bar{R}}$ y anotarlo.
10. Calcular las líneas de control de \bar{x} y representarlas.
11. Calcular las líneas de control de R y representarlas.
12. Anotar otras informaciones pertinentes.

3.4 Preparación de los gráficos de control para la fracción¹ de unidades defectuosas (p)

Los gráficos p de control se utilizan para controlar los procesos de los cuales se recogen los datos como valores de la fracción de unidades defectuosas o el porcentaje de unidades defectuosas, e.g., cuando se han ensayado cien hojas o cien unidades (o, en general, n unidades) de producto terminado o semiterminado para ver si son conformes o no conformes; si hay cinco unidades defectuosas en cien (o, en general, r o pn unidades), la fracción de unidades defectuosas está dada por $r/n = 5/100 = 0,05$, y el porcentaje de unidades defectuosas es de 5%. También se puede utilizar la fracción de unidades no defectuosas (q). La preparación de este tipo de gráfico de control se explica en las secciones siguientes:

(1) Recoger los datos

Uno tiene que recoger tantos datos como sea posible sobre la fracción de unidades defectuosas. Se tiene que conocer el número de unidades inspeccionadas, n , y el número de unidades defectuosas, pn , para cada fracción de unidades defectuosas².

Es bueno disponer de tantos datos como sea posible, puesto que esto también es conveniente para fines tales como el análisis del proceso; también es deseable disponer datos de por lo menos veinte lotes, i.e., por lo menos veinte valores de la fracción de unidades defectuosas (i.e., el número de subgrupos). Los datos se pueden recoger de tantos tipos de unidades defectuosas como se desee, pero se deben estratificar todo lo posible, con arreglo a la naturaleza de las unidades defectuosas y sus causas.

(2) Organizar los datos en subgrupos³

Los datos se deben dividir en subgrupos racionales tal como se explicó en la sección 3.3. En general, es mejor formar lotes racionales y hacer los subgrupos por lote. Por ejemplo, se deben tomar datos de pequeños lotes formados con el fin de controlar el proceso en vez de lotes para expedir. Los datos son más fáciles de manejar si el tamaño del lote es constante. Igualmente, si n

¹

Los términos "fracción" y "proporción" son sinónimos. DIVISIÓN DE ESTADÍSTICA DE LA ASQC. "Glossary and Tables for Statistical Quality Control". QUALITY PRESS. Second Edition, 1983, p. 15. (*N. de los T.*)

² Esto es porque (como se verá más adelante en las fórmulas de los límites de control) cinco unidades defectuosas entre cien y diez unidades defectuosas entre doscientas tienen distribuciones estadísticamente diferentes, aunque la fracción de unidades defectuosas (0,05) sea la misma en ambos casos.

³ Una muestra es un subgrupo elegido para su inspección o ensayo con el fin de inferir unas características de la población a la que pertenece. (*N. de los T.*)

es demasiado pequeño, la potencia estadística de la prueba del gráfico de control es deficiente. Cuando n es demasiado grande, los datos deben estratificarse y agruparse en subgrupos de diversas maneras.

(3) Calcular la fracción de unidades defectuosas para cada subgrupo, p_i (ver la Tabla 3.4)

Esta se calcula con la sencilla fórmula siguiente:

$$p_i = \frac{\text{número de unidades defectuosas}}{\text{número de unidades en la muestra (tamaño del subgrupo)}} = \frac{r_i}{n_i}$$

(4) Calcular la fracción de unidades defectuosas media, \bar{p}

La fracción de unidades defectuosas media (\bar{p}) es el número total de unidades defectuosas dividido por el número total de unidades inspeccionadas (Le., el número total de muestras). En general, no es igual a la media de la fracción de unidades defectuosas de cada subgrupo (p_i). Sin embargo, es igual a la media aritmética de los p_i de cada subgrupo cuando los subgrupos tienen todos el mismo tamaño.

$$\bar{p} = \frac{\text{número total de unidades defectuosas}}{\text{número total de unidades inspeccionadas}} = \frac{r_i}{n_i} = \frac{\sum p_i n_i}{N} \quad (\text{donde } N = \sum n_i)$$

En este ejemplo, $\bar{p} = \frac{187}{1,250} = 0,150$

(5) Calcular los límites de control

Los límites de control ± 3 -sigma del gráfico p se calculan con las fórmulas siguientes:

$$\text{- Límite de control superior: } LCS = \bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}$$

$$\text{- Límite de control inferior: } LCI = \bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}$$

El LCI no es aplicable cuando $LCI < 0$. En este ejemplo,

$$\bar{p} \pm 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} = 0,150 \pm 0,152$$

$$\text{- LCS} = 0,302$$

$$\text{- LCI} = (\text{no aplicable})$$

Tabla 3.4: Ejemplo de hoja de datos para los gráficos de control de las fracciones de unidades defectuosas y del número de unidades defectuosas

Para los gráficos de control pn y p .		Fábrica _____
		Año _____
		Mes _____ Día _____
Producto _____		Número de producto _____
Proceso _____		Persona a cargo del proceso _____
Método de inspección _____		Persona a cargo de la inspección _____
Tipo de unidad defectuosa _____		Observaciones _____

Número del subgrupo	Número de unidades inspeccionadas n	Número de unidades defectuosas pn	Fracción de unidades defectuosas p	LCS	LCI
1	50	3	0,06		
2	"	8	0,16		
3	"	3	0,06		
4	"	5	0,10		
5	"	4	0,08		
6	"	10	0,20		
7	"	10	0,20		
8	"	9	0,18		
9	"	4	0,08		
10	"	6	0,12		
11	"	9	0,18		
12	"	8	0,16		
13	"	12	0,24		
14	"	6	0,12		
15	"	8	0,16		
16	"	8	0,16		
17	"	10	0,20		
18	"	13	0,16		
19	"	9	0,18		
20	"	5	0,10		
21	"	7	0,14		
22	"	9	0,18		
23	"	5	0,10		
24	"	3	0,06		
25	"	13	0,26		
Total	1250	187	-	-	-
Promedio	$\bar{n} = 50$	-	$\bar{p} = 0,150$	0,302	-

$LC \quad \bar{p} = 0,150$
 $LCS \quad \bar{p} + 3 \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} = 0,150 + 0,152 = 0,302$
 $LCI \quad \bar{p} - 3 \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} = 0,150 - 0,152 = (\text{no aplicable})$

Está claro en estas fórmulas que si n_j varía, la distancia entre los límites de control cambiará y las líneas de control variarán de posición en vez de ser rectas continuas. Así pues, cuando el número de artículos inspeccionados en cada lote (n_i) cambia, no tendremos líneas de control rectas continuas y tendremos que señalar límites de control individuales para cada subgrupo. Cuando se controlan procesos es, por tanto, más sencillo asegurarse de que n_i sea constante en la medida de lo posible.

Unas pocas cuestiones que debemos observar son:

Primero, que la línea central, \bar{p} , no cambia aunque cambie n_i .

Segundo, que la distancia entre los límites de control disminuye al aumentar n_i para el mismo valor de \bar{p} , y aumenta si \bar{p} aumenta (cuando $\bar{p} < 0,5$).

Tercero, que en la práctica, cuando la variación del tamaño de los subgrupos (n_i) es tan grande que n_i llega a ser más del doble o menos de la mitad del número medio de unidades inspeccionadas de cada lote (\bar{n}), donde $\bar{n} \equiv (n_1 + n_2 + \dots + n_k)/k$ (e.g., para $\bar{n} = 100$, cuando el máximo $n_i = 200$ y el mínimo $n_i = 50$), las líneas de control deben dibujarse inicialmente para $\bar{n} = 100$. Luego deben comprobarse los puntos para tener en cuenta un cambio de n_i sólo en los casos siguientes:

- (a) Cuando $n_i > \bar{n}$ y un punto cae justo dentro de las líneas de control, los límites de control deben calcularse con precisión para ese valor de n_i . Si un punto cae ligeramente por fuera de una de las líneas de control, siempre está fuera de los límites de control (esto es porque la separación entre los límites disminuye cuando n_i aumenta).
- (b) Cuando $n_i < \bar{n}$, los límites de control deben calcularse con precisión para ese valor de n_i , cuando un punto cae justo por fuera de una de las líneas de control. No es necesario un cálculo preciso cuando un punto cae aunque sea ligeramente por dentro de una línea de control porque siempre estará entre los límites de control en este caso.

Cuarto, en el gráfico p la anchura de los límites está determinada por la propia \bar{p} . Esto difiere del gráfico \bar{x} en el que la anchura depende de R .

Quinto, cuando se usa el porcentaje de unidades defectuosas, los límites se calculan como sigue:

$$100\bar{p} \pm 3\sqrt{\frac{100\bar{p}(100-100\bar{p})}{n_i}} \%$$

Sexto, puesto que es tedioso calcular los límites de control para cada valor de n_i , se han ideado varios gráficos y tablas para simplificar esta tarea (e.g., "Tabla estadística JUSE (A)" publicada por JUSE).

Y séptimo, cuando $\bar{p} \delta 0,1$ -i.e., cuando el porcentaje de unidades defectuosas es de diez por cien o inferior- se considera que $1 - \bar{p}$ es aproximada-

mente igual a 1, y los límites de control se calculan aproximadamente con la fórmula siguiente:

$$\bar{p} \pm 3\sqrt{\frac{\bar{p}}{n}}, 100\bar{p} \pm 3\sqrt{\frac{100\bar{p}}{n}}$$

(6) Representar el gráfico de control

En el gráfico se dibujan la línea central y las dos líneas de control, se anotan sus valores, y se dibujan los valores de p_i . La distancia entre los límites de control debe ser aproximadamente de treinta milímetros como en el gráfico $\bar{x} - R$. Puesto que los límites varían con el tamaño del subgrupo (n_i), se debe anotar el valor de n_i debajo del número del subgrupo cuando varía el tamaño de los subgrupos.

3.5 Preparación de los gráficos de control para el número de unidades defectuosas (pn)

Puesto que este tipo de gráficos de control se parece mucho al gráfico de control de la fracción de unidades defectuosas (p), aquí sólo mencionaré algunas cuestiones particularmente notables (ver la Figura 3.2).

Las líneas de control del gráfico pn se calculan con las fórmulas siguientes:

Gráfico de control número		Director de fábrica	Director de departamento	Director de sección	Supervisor
Artículo	Característica				
Especificación	Tamaño de los subgrupos $n = 50$	Fábrica	Sección		Equipo
Método de medida		De:	Año	Mes	Día
Medidor		A:	Año	Mes	Día

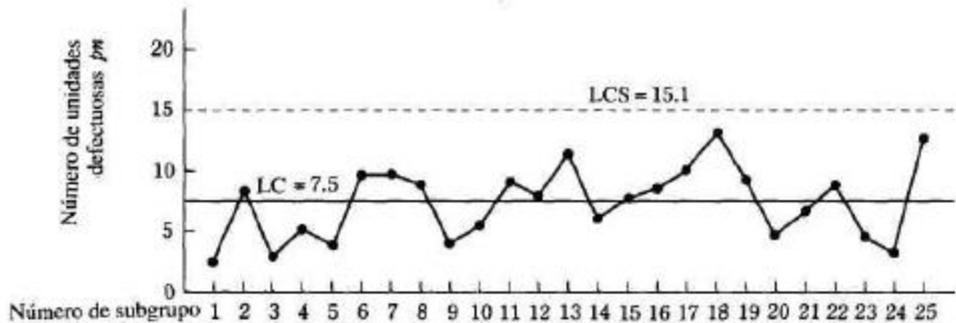


Figura 3.2: Gráfico de control pn

Línea central = número promedio de unidades defectuosas

$$= \frac{\text{número total de unidades defectuosas}}{\text{número de subgrupos}}$$

$$= \frac{\sqrt{\sum r_i}}{k} = \frac{\sqrt{\sum p_i n_i}}{k} = \bar{p}n$$

$$\text{-- Límite de control superior: } \text{LCS} = \bar{p}n + 3 \sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$$

$$\text{-- Límite de control inferior: } \text{LCI} = \bar{p}n - 3 \sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})}$$

Como se puede ver en las fórmulas anteriores, la línea central del gráfico pn de control, $\bar{p}n$, varía con n . Así pues, cuando n varía, varían la línea central y los límites, y las posiciones de los puntos cambian muchísimo. Puesto que esto haría que el gráfico fuese muy difícil de utilizar, el gráfico pn sólo se utiliza cuando el tamaño de los subgrupos, n , es constante. Si n es constante, el número de unidades defectuosas (pn) puede representarse directamente en el gráfico, lo que hace que éste sea adecuado para su uso en planta.

3.6 Preparación de los gráficos de control para el número de defectos por unidad (u)

Este tipo de gráficos de control se utiliza cuando el control se hace por medio de datos tales como el número de imperfecciones en una pieza de tejido, los agujeros en una superficie pintada, los defectos (de un alambre, papel u otro producto continuo, o en máquinas, equipos eléctricos, televisores, muebles y otros productos montados), los accidentes, las roturas mecánicas, partículas de polvo (en productos químicos, disolventes, etc.), los errores tipográficos, los visitantes diarios, etc. Se utiliza el gráfico de control cuando el tamaño de la muestra es constante, y se utiliza el gráfico u (al convertir c en el número de defectos por unidad, u) cuando varía el tamaño de la muestra. Los pasos para preparar el gráfico son como sigue:

(1) Recoger los datos

Se muestrea un producto y se anota el número de defectos, c , al mismo tiempo que el área, la longitud, el peso, el volumen, etc., cuando el producto es una cantidad de plancha de acero, hilo, producto químico, disolvente, etc. Cuando el producto es un montaje, se cuenta el número de defectos por mon-

taje. Con los accidentes, las paradas, etc., se anotan los datos para un periodo de tiempo determinado, un número de personas determinadas, un número de máquinas determinadas, etc. Puede que haya más de un tipo de defectos, pero no se deben juntar datos de dos o más tipos de defectos cuando haya una correlación entre ellos. En la medida de lo posible, cuando se preparan los gráficos de control los defectos deben estratificarse con arreglo a su naturaleza y causa.

(2) Organizar los datos en subgrupos

Los datos deben organizarse en subgrupos racionales, tratando como si fuera un subgrupo a los datos tomados del mismo lote o sistema. El número de unidades (n_i) dentro de cada subgrupo, e.g., el número de metros, de metros cuadrados, de gramos, litros, máquinas, personas, etc., no tienen que ser necesariamente constantes, pero se debe indicar claramente.

(3) Calcular el número de defectos por unidad (u_i) para cada subgrupo

La fórmula para calcular u_i es:

$$u_i = \frac{\text{número total de defectos } (c_i) \text{ de todas las unidades de un subgrupo}}{\text{número de unidades del subgrupo } (n_i)}$$

Por ejemplo, con un subgrupo de 5 m² y una unidad de 1 m², $n_i = 5$.

(4) Calcular \bar{u}

La fórmula para calcular \bar{u} es:

$$\bar{u} = \frac{c_i \text{ total para todos los grupos}}{n_i \text{ total para todos los grupos}} = \frac{\sum c_i}{\sum n_i}$$

Esta es la línea central.

(5) Calcular los límites de control

Estos vienen dados por $\bar{u} \pm 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}}$

El LCI no es aplicable cuando es menor que cero. Los límites de control fluctúan de un grupo a otro cuando n_i varía, como en el gráfico *p*. Los pasos restantes son los mismos que para el gráfico *p*.

3.7 Preparación de los gráficos de control para el número de defectos (c)

Puesto que el número de defectos, c , se representa directamente en un gráfico c , este tipo de gráfico es conveniente cuando n es constante. La diferencia entre éste y el gráfico de control u es que c_i se representa directamente sin calcular u_i y las líneas de control se calculan de la siguiente manera:

$$\text{- Línea central: } \bar{c} = \frac{\text{número total de defectos en todos los subgrupos}}{\text{número de subgrupos}} = \frac{\sum c_i}{k}$$

$$\text{- Límite de control superior: } \text{LCS} = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$$

$$\text{- Límite de control inferior: } \text{LCI} = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$$

(no aplicable cuando $\bar{c} < 9$)

En la Tabla 3.5 y la Figura 3.3 se muestra un ejemplo.

Tabla 3.5: Ejemplo de hoja de datos para el gráfico de control del número de defectos

Para los gráficos de control c y u		Fábrica _____		
		Año Mes Día _____		
Producto _____			Número de producto _____	
Proceso _____			Persona a cargo del proceso _____	
Método de inspección _____			Persona a cargo de la inspección _____	
Tipo de defecto _____			Observaciones _____	

Número del subgrupo	Tamaño del subgrupo	Número de defectos (c)	Número de defectos por unidad (u)	Observaciones
1		18		Línea central $\bar{c} = 16,8$ $LCS = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$ $= 16,8 + 3 \times 4,1$ $= 29,1$
2		13		
3		13		
4		15		
5		21		
6		17		
7		28		
8		10		
9		23		
10		16		
11		15		$LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$ $= 16,8 - 3 \times 4,1$ $= 4,5$
12		22		
13		18		
14		12		
15		24		
16		11		
17		19		
18		16		
19		13		
20		14		
21		12		
22		25		
23		16		
24		13		
25		15		
Total		419		
Promedio		$\bar{c} = 16,8$		

Modelo	Gráfico de control número			
Característica	De:	Año	Mes	Día
Método de medida	A:	Año	Mes	Día
Especificación	Plano de producción número			
Fábrica	Persona responsable del control			
Orden de circulación	Persona responsable de la inspección			

Supervisor → Director de Sección → Director de Departamento
 → Sección de inspección → Sección técnica
 → Puesto de trabajo

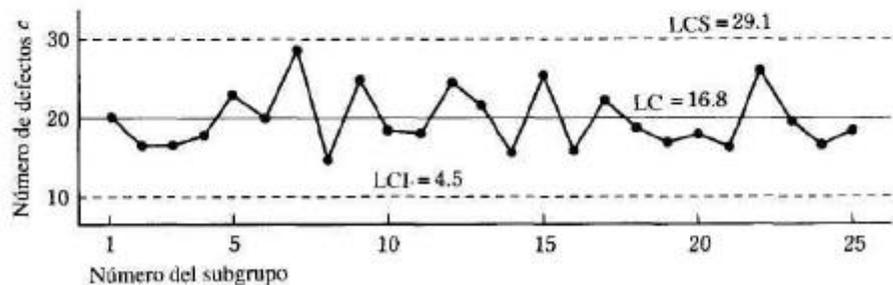


Figura 3.3: Gráfico de control c

3.8 Interpretación de los gráficos de control

La representación de los gráficos de control sin más no es muy útil; éstos no sirven de nada a menos que los examinemos detenidamente, leamos en ellos la información sobre el estado de la calidad, del proceso y del trabajo, y busquemos y eliminemos las causas de las anomalías. Para ello, tenemos que aprender a leer los gráficos de control y practicar cómo obtener información de los movimientos de los puntos. Tenemos que ser capaces de decir, de un vistazo, lo que ha sucedido a un proceso, qué clase de cambios han tenido lu-

gar en la distribución, y qué clases de causas asignables han surgido. Los principios para leer los gráficos de control se describen brevemente a continuación:

- 1) Los puntos no deben considerarse como puntos individuales sino *como una distribución*. En otras palabras, tenemos que pensar en lo que le ha sucedido a la distribución del proceso (Le., la población) que representan los puntos.
- 2) No es conveniente dedicar mucha atención al movimiento de los puntos entre los límites de control. Los resultados estarán dispersados al azar entre los límites aun cuando no haya causas de anomalías y el trabajo proceda normalmente.
- 3) Si los puntos caen dentro de los límites, en principio se considera que el proceso está en estado controlado. Debe señalarse, sin embargo, que, hablando con rigor, el estado controlado en el gráfico de control se da cuando los puntos están dispersos al azar entre los límites de control, y forman una distribución normal que tiene a la línea central en el medio (ver la subsección 6 más abajo).
- 4) Si algunos puntos caen fuera de los límites, seguro que ha tenido lugar una anomalía en el proceso, y el proceso está *fuera de control*. También se considera que el proceso está fuera de control si algunos puntos caen justo en una línea de control. Esta situación se llama estado "*incontrolado*" o "*fuera de control*".
- 5) Cuando los puntos de un gráfico de control utilizado para análisis satisfacen las condiciones siguientes, se considera que, de momento, el proceso está en estado de control. Se considera que las líneas de control representan al proceso y se extrapolan al futuro, lo que permite el uso del gráfico para controlar el proceso. Los puntos deben estar dispersados al azar y deben satisfacer las condiciones siguientes:
 - (a) Veinticinco puntos consecutivos caen dentro de los límites de control.
 - (b) En treinta y cinco puntos consecutivos, no hay más de uno que caiga fuera de los límites de control.
 - (c) En cien puntos consecutivos, no hay más de dos que caigan fuera de los límites de control.

En los dos últimos casos, se deben buscar las causas de la anomalía.

- 6) Un número consecutivo de puntos que caen a un lado u otro de la línea central se llama "*racha*". Es anómalo que un número grande de puntos consecutivos caiga por arriba o por abajo de la línea central. Generalmente, se considera que hay presente una anomalía cuando tiene lugar una *racha de siete o más puntos*. Sin embargo, cuando falta una línea de control (e.g., la línea de control inferior del gráfico de control R cuando n es seis o menor), no se considera que hay presente una anomalía aunque siete o más

- puntos tengan lugar en ese lado de la línea central (i.e., una racha por debajo de \bar{R} en este caso).
- 7) En los gráficos de control utilizados para análisis, existe la posibilidad de que haya tenido lugar una anomalía en el proceso si varios puntos aparecen al mismo lado de la línea central, como se describe más abajo:
 - (a) diez u once puntos de once puntos consecutivos,
 - (b) doce o más puntos de catorce puntos consecutivos,
 - (c) catorce o más puntos de diecisiete puntos consecutivos,
 - (d) dieciséis o más puntos de veinte puntos consecutivos.
 - 8) Cuando los puntos muestran una tendencia hacia arriba o hacia abajo, puede haber presente una anomalía.
 - 9) Cuando más de la mitad de los puntos caen fuera de los límites de control, o cuando la mayoría de los puntos están apiñados alrededor de la línea central en una banda la mitad de ancha que la de los límites de control, esto indica que fue inadecuada la formación de subgrupos o la estratificación de los datos para ese gráfico de control. Cuando ocurre esto, se debe volver a dibujar el gráfico utilizando una forma diferente de formar los subgrupos o de estratificar.
 - 10) Con el gráfico de control \bar{x} - R , empezar por examinar el gráfico R .

3.9 Uso de los gráficos de control

3.9.1 Aplicaciones

Desde varios puntos de vista, se puede decir que el gráfico de control es la herramienta estadística principal para el control. Dicho claramente, no es ninguna exageración decir que "el control de calidad empieza y termina con el gráfico de control".

Las áreas principales de aplicación de los gráficos de control son:

- (1) para control,
- (2) para análisis,
- (3) como gráficos,
- (4) para ajuste,
- (5) para inspección.

Aunque los gráficos de control pueden utilizarse con todos los fines anteriores, su *papel esencial* sigue siendo el de control de proceso, seguido por el análisis de proceso. El análisis también puede ser considerado como una etapa

preparatoria en la cual se preparan los gráficos de control útiles para el control del proceso. El análisis de proceso se explica en el Capítulo 4.

La tercera de estas aplicaciones, *el uso de los gráficos de control como gráficos*, quiere decir que los datos se representan en forma de gráfico de control pero que no se utilizan como tal. Aunque se representen los límites de control, estos gráficos sólo se ojean, incluso cuando algunos puntos caen fuera de los límites; no se buscan las causas de las anomalías y no se entra en ningún tipo de acción. Tales gráficos se dibujan mecánicamente según las instrucciones de los superiores, y muchos de los llamados gráficos de control preparados en las fábricas en las que el análisis y la normalización de los procesos son inadecuados son de este tipo. Son gráficos de control en su forma pero no en su fondo y deben llamarse sólo gráficos. Sin embargo, si los datos se dibujan en forma de gráfico de control, sí que indica las formas en que un proceso cambia a lo largo del tiempo y también puede tener un buen efecto motivador. Por tanto, no estoy diciendo que se deba abolir este tipo de gráficos. Si la presentación de los datos en forma de gráfico produce buenos resultados, deben utilizarse ampliamente; pero no quisiera que las personas cometieran la equivocación de creer que la preparación de esta clase de gráficos de control quiere decir que estén llevando a cabo el control de calidad u otros tipos de control. Además, inevitablemente aparece el aburrimiento cuando este tipo de gráficos ha sido utilizado durante algún tiempo y las personas empiezan a argumentar que los gráficos de control son inútiles. Por esta razón, se deben hacer esfuerzos, tan pronto como sea posible, para empezar a analizar y normalizar los procesos, revisar las características a representar en los gráficos de control, normalizar la autoridad, la responsabilidad y los métodos relacionados con la búsqueda de las causas asignables, y entrar en acción con fines de control, y utilizar realmente los gráficos para el control.

La cuarta aplicación, *el uso de los gráficos de control para el ajuste*, quiere decir, por ejemplo, cambiar la temperatura, el filo de una herramienta cortante, la composición de la materia prima u otra condición del proceso cuando un gráfico de control indique que un proceso está fuera de control, sin buscar necesariamente la causa de la anomalía o entrar en acción para eliminarla. Éste no es el uso apropiado del gráfico de control y se tiene que adoptar un enfoque totalmente diferente para considerar si los límites ± 3 -sigma son adecuados o no como límites de ajuste (no límites de control). De hecho, las más de las veces los límites ± 3 -sigma son inadecuados como límites de ajuste. Para distinguir este tipo de gráfico del gráfico de control, debe llamarse "*gráfico de ajuste*". Los límites de ajuste deben ser investigados y establecidos de la misma forma en que se pone en práctica el control automático, considerando factores tales como la variación aleatoria del proceso, el movimiento de la media del proceso, el intervalo de muestreo, el rango de los posibles ajustes y sus efectos, el tiempo de retroalimentación, etc.

La quinta aplicación, *el uso de los gráficos de control para la inspección*, quiere decir utilizarlos de varias maneras desde el punto de vista de la inspección: por ejemplo, cuando un gráfico indica que hay una anomalía en un lote, y el lote se trata de diferente manera o se somete a un cribado del cien por cien, o se cambian los métodos de inspección en sentido descendente del flujo productivo. Por supuesto, esta aplicación puede ser bastante útil con un poco de ingenio; por ejemplo, cuando se relaja mucho la inspección y se cambia a una inspección de verificación, los resultados pueden ser anotados en un gráfico de control y se puede hacer más estricta la inspección si el gráfico indica el estado fuera de control. Sin embargo, las decisiones sobre la disposición de un lote -e.g., si hay que someterlo a un cribado del cien por cien- no se debe basar en los límites de control sino en criterios de decisión para la inspección por muestreo con cribado. Este uso de los gráficos de control desde el punto de vista de la inspección es especialmente predominante en las fábricas orientadas a la inspección que practican el control de calidad anticuado, de las cuales hay muchas en las industrias pesadas eléctricas y de maquinarias, y les recomiendo que se sientan en la obligación de revisar esta práctica. Este uso de los gráficos de control para la inspección no se puede recomendar normalmente, excepto cuando haya sido investigado detenidamente. Sin embargo, los gráficos de control son utilísimos para controlar las operaciones de inspección o los procesos de inspección, y me gustaría ver que se utilizaran ampliamente de esta forma.

3.9.2 Uso de los gráficos de control para el análisis

Los gráficos de control para el análisis pueden ser considerados bajo los dos encabezamientos siguientes:

- (1) Los utilizados en el análisis para descubrir y eliminar las causas de la variación.
- (2) Los utilizados en el análisis para estimar las capacidades de los procesos en la preparación del control de esos en el futuro.

El primer tipo de uso se explica en las subsecciones 1-3 más adelante; el segundo se trata en la subsección 4.

El primero consiste principalmente en gráficos preparados con el fin de descubrir y eliminar las causas de variación ideando diversas maneras de hacer los subgrupos, estratificarlos y modificar los datos, y comprobar si un proceso está fuera de control.

(1) Hacer los subgrupos

Un método importantísimo para descubrir las causas de variación es probar varias formas de hacer los subgrupos. El subagrupamiento está íntimamente

relacionado con el muestreo; permite el descubrimiento de muchas causas, y la habilidad o la falta de habilidad con que se haga rige la utilidad de los gráficos de control utilizados para controlar los procesos. Algunas cuestiones a considerar cuando se hacen los subgrupos son las siguientes:

- (a) Cuando se consideran los gráficos de control, se deben utilizar diagramas de causa y efecto u otros métodos para trazar unas distinciones técnicas claras entre los tipos de factores que afectan a la variación dentro de un subgrupo y los que afectan a la variación entre los subgrupos. Por ejemplo, cuando \bar{x} se descontrola, usualmente se debe a una causa de variación entre los subgrupos, pero cuando R se descontrola, usualmente se debe a una causa de variación dentro de un subgrupo.
- (b) Se deben recoger en el mismo subgrupo los datos sobre productos hechos bajo condiciones similares, de forma que los datos dentro de cada subgrupo sean todo lo uniformes posible y tengamos una variación todo lo pequeña posible. Dicho de otro modo, esto quiere decir que los datos deben estar agrupados de forma que la variación entre los subgrupos sea lo más grande posible. Esto es especialmente importante en el análisis de procesos.
- (c) También se deben probar varios métodos de muestreo con objeto de satisfacer el requisito anterior.
- (d) Debemos aclarar el propósito del gráfico de control -i.e., la clase de variación que queremos descubrir o controlar- y agrupar los datos de tal modo que se excluya, en la medida de lo posible, esa clase particular de variación dentro de los subgrupos.
- (e) Las causas posibles de variación deben ser examinadas desde el punto de vista técnico, se deben probar varios métodos de subagrupamiento, y se debe comparar el estado de control y el valor de R , y otros estadísticos.

De las consideraciones anteriores se deducen los mejores métodos de muestreo y de subagrupamiento para el control de proceso. Los subgrupos que se forman inteligentemente de este modo se llaman "*subgrupos racionales*".

(2) Estratificación

Cuando una fábrica tiene varias máquinas, a menudo cada máquina tiene sus propias características e idiosincrasia. En tales casos es mejor preparar un gráfico de control por separado para cada máquina. Igualmente, es mejor segregar los datos y preparar gráficos de control por separado para las materias primas de diferentes tipos u orígenes, para diferentes materias auxiliares, temporadas, meses, clima, condiciones de trabajo, personal, turnos, volúmenes de trabajo y otros factores que se piense que puedan influir en el proceso de manera individual y que causen variación. También se deben dibujar gráficos de control por separado para diferentes tipos y condiciones de unidades defectuo-

sas, defectos, paradas, etc. Esta división de los datos en diferentes estratos se llama "estratificación".

Esta preparación de varios gráficos de control para varias causas (principalmente causas de tipo atributos) que se considere por razones de ingeniería que ejercen unos efectos particularmente significativos es utilísima para el análisis. Se puede decir que el éxito de los gráficos de control para el análisis y el control depende de la estratificación. En la mayoría de los mejores ejemplos de análisis y control, el flujo del proceso está bien estratificado desde la materia prima hasta el producto final, y se recogen y analizan una variedad de datos, y los gráficos de control se utilizan inteligentemente.

De este modo, se representan y estratifican los gráficos de control y por medio de éstos se comparan los estados de control y las medias de los procesos (\bar{x} , \bar{R} , \bar{p} , \bar{c} , etc.) antes y después de la estratificación y entre diferentes estratos. Cuando se hace esto, se deben observar los siguientes puntos:

- (a) Cuando se hace la estratificación, es mejor mantener el tamaño de los subgrupos todo lo iguales que sea posible.
- (b) En el gráfico R , disminuye el valor de \bar{R}/d_2 si se realiza una estratificación inteligente. Si \bar{R}/d_2 disminuye, indica que el método de estratificación ha sido eficaz y, a menudo, hay algunas diferencias entre los diferentes estratos. Igualmente, si el subagrupamiento es racional, la estratificación a menudo pone de manifiesto diferencias en los valores de \bar{R}/d_2 de los diferentes estratos. Como regla empírica muy aproximada, si los valores promedios de R de dos estratos diferentes, A y B , son \bar{R}_A y \bar{R}_B y si \bar{R}_A o \bar{R}_B difiere en un veinte por cien o más de la media global de R (\bar{R}), podremos decir que los dos estratos tienen decididamente distribuciones diferentes. Tenga la amabilidad de ver un método detallado en la sección 3A.4.
- (c) En general, si la estratificación mejora el estado de control en los gráficos de control, usualmente ese método de estratificación es significativo y hay alguna diferencia entre los diferentes estratos.
- (d) Si hay diferencias entre las medias de diferentes estratos, habrá diferencias entre los valores de \bar{x} después de la estratificación. A menudo la existencia de diferencias entre los valores de \bar{x} se puede concluir intuitivamente, pero en los casos dudosos se puede utilizar el método descrito en la sección 3A.4 para realizar una prueba estadística.
- (e) Si se saca la conclusión de que hay una diferencia concreta entre \bar{R} o \bar{x} para diferentes estratos, se debe trazar la causa, se ha de entrar en acción necesariamente para eliminar la diferencia y se tienen que revisar las normas. Después de haber concluido alguna acción, siempre se tienen que

representar y examinar nuevos gráficos de control estratificados con objeto de comprobar los efectos.

- (f) Cuando no hay manera de eliminar las causas de las diferencias entre los diferentes estratos, o si las causas caen fuera del ámbito de la responsabilidad del control del proceso, se deben modificar los datos para eliminar estas diferencias solamente. Entonces deben prepararse nuevos gráficos de control con los datos modificados, y se puede continuar la investigación. Sin embargo, desde el punto de vista de la empresa como un todo, la responsabilidad de eliminar estas causas cae en algún lugar de dentro de la organización.

(3) Algunas cuestiones generales relativas al análisis cuando se usan gráficos de control

Algunas cuestiones generales a observar cuando se realiza el análisis utilizando los gráficos de control, son las siguientes:

- (a) En el análisis de un proceso, particularmente con el gráfico \bar{x} - R , uno tiene que prestar mucha atención al subgrupamiento y al estado de control en los gráficos de control, y al comportamiento de R después de la estratificación. Es aconsejable empezar por tratar de hacer que \bar{R} sea lo más pequeño posible y conseguir que R esté en el estado controlado.
- (b) El análisis que hace uso de los gráficos de control estratificados se utiliza principalmente para investigar la presencia o ausencia de causas del tipo de los atributos, comprobar su gravedad y decidir la acción necesaria para hacerles frente.
- (c) En el análisis del proceso, a menudo el procedimiento más eficaz es idear diversos métodos de subgrupamiento racional y estratificación, y probarlos en la realidad. Las causas que se piense, por razones técnicas, que ejercen efectos significativos deben, por tanto, analizarse de una en una, empezando por la que se considere que ejerce el efecto mayor. Luego, si hay alguna diferencia entre los diferentes estratos, se adoptan medidas para eliminarlas o se corrigen los datos para eliminar esta diferencia solamente, y se analiza la causa siguiente.
- (d) En el mundo de la variación, R (el recorrido) es la base de la variación del proceso. En muchos casos, si es posible ajustar el valor de \bar{R} libremente, resulta posible de manera natural establecer el valor deseado para \bar{x} . Así pues, en muchas áreas de control de procesos así como, por supuesto, de análisis de procesos, nuestro objetivo es "acabar con R ".
Para controlar R , será útil lo siguiente:
- i) Cambiar el método de subgrupamiento.
 - ii) Estratificar.

iii) Reducir la variación del muestreo (de materiales a granel) y de las medidas.

iv) Poner en práctica el análisis y el control minucioso del proceso.

v) Si R no se reduce a pesar de las acciones anteriores, deben llevarse a cabo experimentos *in situ* que hagan uso de los métodos de diseño de experimentos, y se deben revisar las normas, reconstruir el equipo, y realizar otras mejoras técnicas básicas. Cuando se haya hecho esto, es mejor comparar la varianza del error en el análisis de la varianza con la raíz cuadrada de \bar{R}/d_2 .

Las causas de que R tenga un valor elevado se encuentran, generalmente, muy a mano, en operaciones de rutina que se terminan en poco tiempo, y los operarios deben buscarlas diligentemente en sus entornos inmediatos.

- (e) Si R disminuye cuando se prueba un método diferente de subagrupamiento o se realiza la estratificación, esto indica generalmente que el subagrupamiento o la estratificación ha sido eficaz. Cuando sucede esto, se tiene que investigar la causa de la variación entre los subgrupos.
- (f) Las consideraciones anteriores son más o menos las mismas para el gráfico p , el gráfico c y otros tipos de gráficos de control, pero se deben observar las siguientes cuestiones más:
 - (i) Se debe prestar atención a los puntos fuera de control que estén en el lado bueno igual que, por supuesto, a los puntos fuera de control que estén en el lado malo. Un proceso se saldrá de control por el lado bueno cuando el proceso mejore realmente, las normas de inspección se relajen y/o las muestras no se tomen al azar y se estén seleccionando preferentemente las muestras buenas, etc. Cualquiera que sea la razón, también tenemos que trazar las causas de la falta de control que esté en el lado bueno y utilizar la información obtenida para acometer las acciones adecuadas.
 - (ii) Cuando el método de subagrupamiento es deficiente y los subgrupos son demasiado grandes, a veces caen fuera de los límites de control muchos puntos. En este caso, se pueden obtener más informaciones al segregar más los datos, estratificarlos de varias maneras y dividirlos en subgrupos más pequeños, o al dibujar gráficos de control estratificados.

(4) Procedimiento para el análisis en la preparación del control del proceso

Esta sección explica el procedimiento para analizar un proceso y prepararse para pasar al control del proceso (explicado en la próxima sección 3.9.3). La explicación se centra en el gráfico $\bar{x}-R$ más importante, pero sustancial-

mente sirven las mismas consideraciones para los demás tipos de gráficos de control.

- (a) Decidir las características que se han de representar en los gráficos de control.

Como se explicó anteriormente, tenemos que decidir qué resultados de nuestro rango de responsabilidad del control debemos utilizar como medio para comprobar el proceso. Cuando se controla la calidad de un producto que tiene un número elevado de características de calidad, por ejemplo, tenemos que decidir qué característica es importante y debe comprobarse. Cuando hay muchas características importantes de calidad, se pueden seleccionar todas ellas. También tenemos que considerar la característica importante de calidad exigida por el cliente (i.e., por el proceso siguiente). Debemos utilizar los resultados del análisis para seleccionar varias características a representar en los gráficos de control, con objeto de controlar el proceso en el futuro.

Al hacer esto, muchas personas adoptan el enfoque convencional de ingeniería, y representan gráficos de control para las causas. Esto es una equivocación y la mayoría de tales gráficos no serán más que simples gráficos. Aún así, pueden ser eficaces como tales. A veces se pueden dibujar gráficos de control de las causas también para el análisis, pero éste no es su principal fin.

- (b) Decidir qué gráficos de control utilizar

Una vez se hayan decidido las características de control, debemos considerar su naturaleza y decidir qué gráficos de control (\bar{x} , R , pn , c , u , etc.) utilizar.

- (c) Recoger los datos.

En las fábricas a menudo es suficiente con recoger los datos del pasado, pero tiene que estar claro la historia de tales datos. Si no se conoce completamente la historia de los datos del pasado, se tiene que elegir un programa de muestreo estratificado tal como el muestreo por lotes, según cuál sea nuestro objetivo en el control del proceso, y se tienen que recoger datos nuevos. Sin embargo, incluso el análisis de datos con una historia desconocida puede ser útil, de un modo u otro. Si es posible, se deben recoger por lo menos cien valores.

- (d) Analizar los datos del pasado por medio de los gráficos de control.

Esto debe hacerse como se describió en las subsecciones 1-3 anteriores.

- (e) Representar gráficos de control en la preparación del control del proceso.

El cómo representar un gráfico de control tiene que ser decidido de acuerdo con la información obtenida en el paso 4, y se tiene que prestar la debida atención al propósito del control del proceso; luego se representa el gráfico. Si el gráfico indica un estado de control aproximado (ver la sub-

sección 5 de la sección 3.8), se puede utilizar para calcular los límites de control del gráfico a utilizar para controlar el proceso en el futuro. Si no indica un estado de control, se deben probar varios métodos para obtener un gráfico que esté todo lo cerca posible del estado controlado y también que sea fácil de usar. Se deben preparar las normas internas de trabajo que estén diseñadas para llevar al proceso a este estado, y deben comunicarse claramente a los subordinados. Sin embargo, hasta los gráficos de control que no indiquen un estado controlado se pueden utilizar al proyectar los límites de control del futuro, representar los datos y descubrir y eliminar las causas cuando cualquiera de los puntos cae fuera de los límites de control.

Cuando se preparan de nuevo o revisan las normas, se deben tomar unos veinte subgrupos de los datos resultantes de tales normas, y representarlos en un gráfico de control. Luego se debe examinar el gráfico y calcular a partir de él los límites de control para el control del proceso. Cuando esto esté hecho, debemos tener, por lo menos, cien valores o veinte grupos de datos. Cuantos más datos tengamos, más precisa será nuestra estimación del proceso (i.e., de las líneas de control). Sin embargo, debemos calcular límites de prueba aunque sólo tengamos unos pocos datos, y volver a calcularlos luego, una vez se hayan acumulado más datos,

- (f) Comparar con las especificaciones y las metas (ver la sección 2.4).

Si las especificaciones del producto y las metas han sido establecidas sobre una base racional (aunque de momento sea algo raro), debemos utilizar los histogramas o gráficos de control para comprobar si el estado de control (i.e., la capacidad del proceso) obtenido en el quinto paso satisface estos estándares y metas. Cuando los estándares y metas no han sido establecidos sobre una base racional, tienen que decidirse luego, después de discutirlos con los clientes, el proceso siguiente y la alta dirección.

3.9.3 Uso de los gráficos de control para el control

Después del análisis pasamos al control. El procedimiento es como sigue:

(1) Preparar los gráficos de control para el control

Cuando hayamos terminado de analizar los datos, se representan en el gráfico de control las líneas de control calculadas en el análisis por medio de líneas de puntos y guiones (• — • — •—), para preparar el control del proceso en el futuro.

(2) Recoger los datos diariamente y representarlos en los gráficos de control

Para asegurarse de que el trabajo se lleva a cabo según los métodos acordados, uno tiene que tomar muestras y realizar medidas, calcular \bar{x} , R u otros estadísticos para cada subgrupo, y representarlos en los gráficos de control. Se deben trazar las líneas de control antes que los datos. Se deben tomar decisiones por adelantado en cuanto a quién va a hacer el muestreo y realizar las medidas, quién va a informar a quién y de qué forma, quién va a representar los puntos, y quién va a utilizar los gráficos.

(3) Decidir si el proceso está controlado (ver la sección 3.8)

Si los puntos representados caen entre los límites de control, el proceso está controlado. Si algunos caen fuera de los límites es que en el proceso ha tenido lugar alguna causa asignable y la característica que es resultado del proceso está, por tanto, mostrando una variación grande.

Si unos puntos de un gráfico de control R caen fuera de los límites, es que en el proceso ha tenido lugar algún tipo de cambio que ha aumentado la dispersión de la distribución del producto. Si unos puntos de un gráfico de control \bar{x} caen fuera de los límites, esto indica principalmente que en el proceso ha tenido lugar algún tipo de cambio que altera la media del mismo. Sin embargo, los puntos del gráfico \bar{x} también caerán a veces fuera de los límites cuando aumenta la variación.

Si unos puntos de un gráfico p caen fuera del límite de control superior, es que en el proceso ha tenido lugar una causa asignable que da lugar a la aparición de muchas unidades defectuosas. Si los puntos caen debajo del límite de control inferior, es que o bien ha tenido lugar una causa asignable que reduce el número de unidades defectuosas o la inspección se ha relajado. Debe recordarse que, en general, cuando los puntos caen fuera de los límites de control, es que normalmente hay algo mal en el muestreo, las medidas o la inspección.

Normalmente, en el control de un proceso consideramos que está presente una causa asignable sólo cuando unos puntos caen fuera de los límites de control. Sin embargo, según la situación, también se puede utilizar la interpretación de las rachas. Se deben establecer para cada tipo de gráfico de control las normas de enjuiciamiento para decidir si está presente una causa asignable, y se debe decidir de antemano quién va a mirar los gráficos de control y cómo se deben hacer circular cuando sea necesario.

(4) Trazar las causas

Cuando se considera que un proceso está fuera de control, la persona responsable de controlar el proceso tiene que trazar inmediatamente la causa. El

trazado de las causas requiere diversos conocimientos técnicos y métodos estadísticos, y la información dada por los gráficos de control sirve de ayuda para ello. Se debe realizar un análisis cuidadoso, y se debe formular en forma de norma el procedimiento para trazar las causas de anomalías.

(5) Entrar en acción

El mero hecho de trazar una causa y sacarla a la luz no es control. Si la causa de una anomalía está clara, se debe actuar de la siguiente forma:

- (a) Eliminar inmediatamente la causa y volver a llevar el proceso al estado estable.
- (b) Al mismo tiempo, actuar de forma radical para evitar que en el futuro vuelvan a aparecer anomalías debidas a la misma clase de causa. Si se pasa esto por alto, surgirá otra vez una variación anómala en el proceso debida a la misma causa. Si, por ejemplo, la causa es la falta de cuidado por parte de los trabajadores, se debe educar o idear calibres y herramientas a prueba de fallos. Si las normas de trabajo son inadecuadas, deben revisarse. Se debe actuar de forma cuidadosa y meticulosa. El *quid* de la puesta en práctica del control es ver que *se actúe de forma fiable para evitar que vuelva a repetirse el problema* (ver la sección 1.5 y la Figura 1.14).
- (c) Para cada gráfico de control, decidir de antemano cuestiones tales como el procedimiento para entrar en acción (i.e., para eliminar las causas de las anomalías), qué acción se debe realizar según el juicio de quién (i.e., autoridad), hasta dónde debe llegar dicha acción, el método para informar a los superiores, y los impresos (impresos para informes de anomalías) que se han de utilizar. La acción que deban realizar los jefes de grupo, encargados, supervisores, directores de sección, etc., se decide basándose en estos informes.

(6) Comprobar los resultados de las acciones

Aun cuando se haya actuado para eliminar lo que se piensa que es una causa asignable y se hayan llevado a efecto acciones para prevenir la reaparición de problemas, tales como la revisión de las normas internas, uno tiene que volver a hacer comprobaciones para ver si la acción realizada fue correcta y examinar sus efectos.

Generalmente, no se puede considerar que entrar en acción y no hacer nada más sea control. Uno de los principios del control es comprobar siempre los resultados de las acciones realizadas.

(7) Volver a calcular las líneas de control

Un proceso se controla representando las líneas de control y los datos en un gráfico de control, pero debemos tener presente que es necesario volver a

calcular las líneas de control de vez en cuando para asegurarnos de que coinciden con el estado actual del proceso. Se deben volver a calcular las líneas de control en los siguientes casos:

- (a) Cuando el proceso ha cambiado obviamente por razones técnicas.
- (b) Cuando ha pasado cierto periodo de tiempo desde que se inició el control, aun cuando no haya habido ningún cambio en el proceso (e.g., todos los meses, después de cada cien medidas, etc.).
- (c) Cuando se considere por el gráfico de control que el proceso ha cambiado obviamente.

Es erróneo utilizar los gráficos de control simplemente como gráficos, sin volver a calcular las líneas de control durante tres meses o medio año aun cuando el proceso haya cambiado considerablemente, y no hacer más que mirar al gráfico sin entrar en acción aunque los puntos caigan fuera de los límites o formen rachas largas. El intervalo en el que se debe volver a hacer este cálculo, el método para hacerlo, y la decisión en cuanto a cuándo hacerlo debe ser especificado en las normas para el uso de los gráficos de control. Si esto no se hace con fiabilidad, los gráficos perderán su utilidad.

Cuando se vuelven a calcular las líneas de control, los puntos que caen fuera de los límites deben tratarse de la manera siguiente:

- (i) Cuando se vuelven a calcular las líneas de control deben omitirse los datos individuales o subgrupos que producen puntos que caen fuera de los límites, pero para los cuales se conocen las causas y respecto a las cuales se puede actuar.
- (ii) Los puntos que representan datos para los cuales las causas son desconocidas, o respecto a las cuales no se puede actuar deben ser incluidos en el nuevo cálculo.

(8) Formular las normas de control

Las normas de control están explicadas con detalle en el Capítulo 5; aquí, como se mencionó más arriba, tenemos que reiterar que tienen que ser formuladas para cada tipo de gráfico de control y tienen que indicar quién es responsable del control y cómo debe realizarse. Sin tales normas no se pueden utilizar bien los gráficos de control y no se puede poner en práctica eficazmente el control. En todo caso, los gráficos de control deben ser vistos y utilizados por los que ocupan cargos de responsabilidad.

El gráfico de control es una herramienta útil para los líderes de todos los departamentos, no sólo para el control de calidad sino para todos los demás tipos de control.

3A.1 El gráfico de control de la mediana (\tilde{x}) y el recorrido

(1) Dibujar el gráfico de control de la mediana

La mediana de un conjunto de datos, expresada por el símbolo \tilde{x} , es el valor central cuando los datos se disponen en orden de magnitud, de mayor a menor. Cuando hay un número par de valores, la mediana es la media de los dos valores centrales. El gráfico $\tilde{x} - R$ se utiliza casi del mismo modo que el gráfico de control normal $\bar{x} - R$, y los límites de control del gráfico \tilde{x} se calculan normalmente con la fórmula 3A.1 o 3A.2 siguientes:

$$\bar{\tilde{x}} + m_3 A_2 \bar{R} \quad (3A.1)$$

$$\bar{\tilde{x}} - m_3 A_2 \bar{R} \quad (3A.2)$$

en las que $\bar{\tilde{x}}$ es la media de las medianas, $m_3 A_2$ es un coeficiente para calcular los límites de control de la mediana a partir de \bar{R} . Su valor depende de n y está dado en la Tabla 3 A. 1.

Ejemplo: para $n = 5$, $\bar{\tilde{x}} = 120,020$ y $\bar{R} = 2,292$

$$m_3 A_2 = 0,691$$

$$m_3 A_2 \bar{R} = 0,691 \times 2,292 = 1,584$$

Así pues,

$$LCS = 120,020 + 1,584 = 121,60$$

$$LCI = 120,020 - 1,584 = 118,44$$

(2) Cuando se utiliza la mediana de R (\tilde{R})

Hasta el momento hemos estado explicando los métodos para estimar la variación que utilizan \bar{R} , pero los valores de R también se pueden disponer en orden de magnitud y estimar la variación y calcular los límites de control utilizando la mediana de estos valores (\tilde{R}) como sigue:

$$\text{Para } \tilde{\tilde{x}}: \tilde{\tilde{x}} \pm m_3 A_3 \tilde{R} \quad (3A.3)$$

$$\text{Para } \bar{\tilde{x}}: \bar{\tilde{x}} \pm A_3 \tilde{R} \quad (3A.4)$$

$$\text{Para } R: LCS = D_6 \tilde{R} \quad (3A.5)$$

$$LCI = D_5 \tilde{R} \quad (3A.6)$$

donde $\tilde{\tilde{x}}$ es la mediana de \tilde{x} ; $\bar{\tilde{x}}$ es la mediana de \tilde{x} ; y $m_3 A_3$, D_6 , y D_5 son coeficientes para calcular los límites de control utilizando \tilde{R} . Sus valores dependen de n y están dados en la Tabla 3 A. 1.

Debe observarse que $\tilde{\tilde{x}}$, $\bar{\tilde{x}}$ y \tilde{R} son estimadores menos precisos de la población que $\bar{\bar{x}}$, $\bar{\bar{x}}$ y \bar{R} respectivamente, en el estado controlado, pero este efecto es

Tabla 3A.1: Coeficientes para los gráficos de control $\bar{x} - \bar{R}$

Tamaño de los subgrupos n	\bar{x}		Cuando se utiliza \bar{R}					
	m_1	$m_2 A_2$	\bar{x}	x	\bar{x}	R		
			A_3	E_3	$m_1 A_1$	d_m	D_3	D_4
2	1,000	1,880	2,224	3,14	2,224	0,954	—	3,864
3	1,160	1,187	1,091	1,89	1,265	1,588	—	2,744
4	1,092	0,796	9,758	1,52	0,828	1,978	—	2,375
5	1,198	0,691	0,594	1,33	0,712	2,257	—	2,179
6	1,135	0,549	0,495	1,21	0,562	2,472	—	0,255
7	1,214	0,509	0,429	1,13	0,520	2,645	0,078	1,967
8	1,160	0,432	0,380	1,07	0,441	2,791	0,139	1,902
9	1,223	0,412	0,343	1,03	0,419	2,916	0,187	1,850
10	1,177	0,363	0,314	0,99	0,369	3,024	0,227	1,808

pequeño en el estado fuera de control, y a menudo mejora en este caso la precisión de la estimación.

Cuando se estima la desviación estándar de la población a partir de R ,

$$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_m \tag{3A.7}$$

donde d_m es un coeficiente utilizado para estimar $\hat{\sigma}$ a partir de R . Su valor depende de n y está dado en la Tabla 3 A. 1.

(3) Uso del gráfico de control $\bar{x} - \bar{R}$

- (a) El gráfico $\bar{x} - R$ se interpreta y utiliza exactamente del mismo modo que el gráfico $\bar{x} - \bar{R}$.
- (b) Puesto que no hay que hacer ningún cálculo para encontrar \bar{x} , los gráficos de control $\bar{x} - R$ son útiles cuando se hace que los encargados y los operarios corrientes los representen en planta. Cuando se hace esto, es mejor hacer que n sea un número impar.
- (c) También es una buena idea hacer que las personas representen los datos directamente sobre el gráfico de control, como en la Figura 3A.1, y hacer que calculen las medianas sobre el gráfico tal como se indica.
- (d) Puesto que los valores individuales se representan una vez hecho esto, los límites de control para x , explicados en la sección 3A.2, se pueden utilizar al mismo tiempo (ver las Figuras 3A.1 y 3A.2).

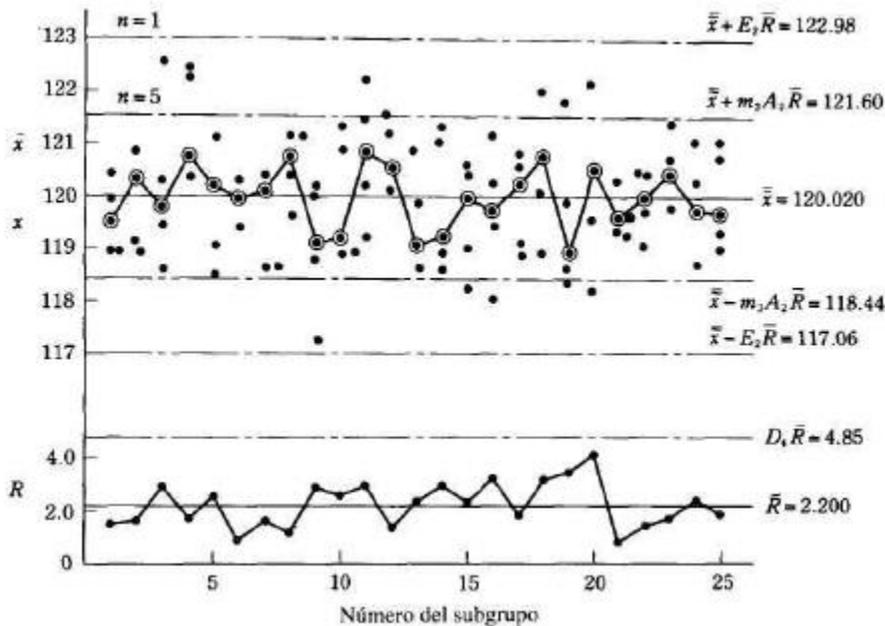


Figura 3A.1: Gráfico de control \bar{x} - R

3A.2 Gráficos de control para puntos de datos individuales

3A.2.1 Preparación del gráfico de control \bar{x}

Un gráfico de control sobre el que se representan medidas individuales (x) se llama "gráfico de control para medidas individuales" o "gráfico de control JC". Generalmente se utiliza conjuntamente con un gráfico de control del recorrido móvil (R_s) o un gráfico de control \bar{x} - R .

El problema de la preparación de este tipo de gráficos de control es calcular los límites de control. Por lo demás, es exactamente igual que el tipo normal de gráfico de control.

(1) Método del subagrupamiento de los datos (ver la Figura 3A.2)

En este método para calcular los límites de control, se realiza un subagrupamiento racional del mismo modo que para el gráfico de control normal \bar{x} - R . Luego se busca $\bar{\bar{x}}$, \bar{R} , $\bar{\bar{x}}$ y \bar{R} , y se calculan los límites de control con la fórmula

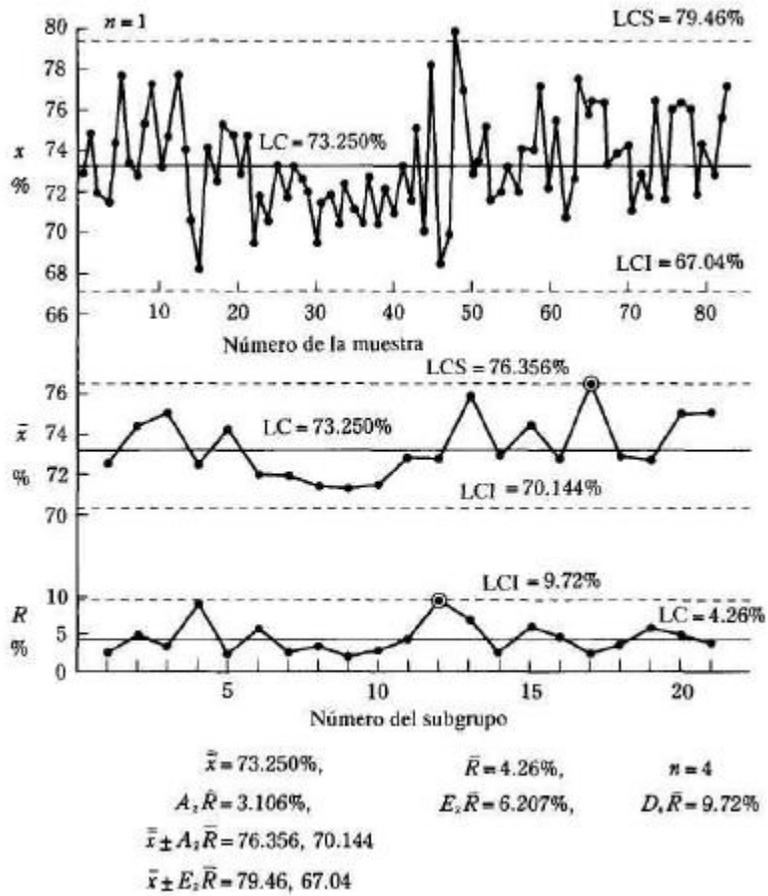


Figura 3A.2: Gráfico de control \bar{x} - R - x

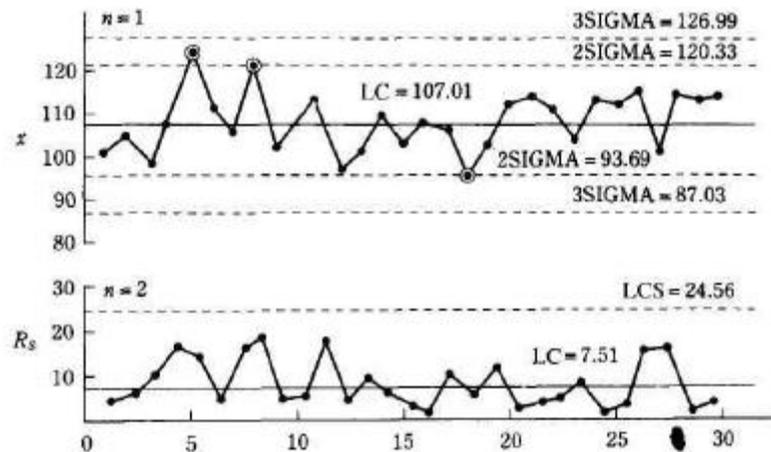
la fórmula dada más abajo. Este método es conveniente en la mayoría de los casos. Cuando el tamaño de los subgrupos es constante, los límites de control de x están dados por:

$$\bar{\bar{x}} \pm 3\bar{R}/d_2 = \bar{\bar{x}} \pm E_2\bar{R} \tag{3A.8}$$

donde el valor de E_2 está determinado por el tamaño de los subgrupos n , y viene dado en la Tabla 3A.2.

Tabla 3A.2: Valores de E_2

Tamaño del subgrupo n	E_2
2	2.660
3	1.772
4	1.457
5	1.290
6	1.184
7	1.109
8	1.054
9	1.010
10	0.975

Figura 3A.3: Gráfico de control \bar{x} - R_s .

(2) Método que utiliza el recorrido móvil (R_s) (ver la Figura 3A.3)

Si, por ejemplo, las medidas son 18,3, 19,1, 18,5, 18,8, 19,3, ..., el recorrido móvil para $n = 2$ está dado por $R_s = 19,1 - 18,3 = 0,8$; $19,1 - 18,5 = 0,6$; $18,8 - 18,5 = 0,3$;...

Con el gráfico \bar{x} - R_s , los límites de control del gráfico \bar{x} se calculan normalmente con la fórmula siguiente, y se utiliza el recorrido móvil para subgrupos de tamaño $n = 2$ como antes:

$$\bar{\bar{x}} \pm 3 \frac{\bar{R}_s}{d_2} = \bar{\bar{x}} \pm A_2 \sqrt{n} \bar{R}_s = \bar{\bar{x}} \pm E_2 \bar{R}_s = \bar{\bar{x}} \pm 2,66 \bar{R}_s \quad (3A.9)$$

donde normalmente d_2 y A_2 son los valores para $n = 2$ y están dados como 1,128 y 1,880 respectivamente en la Tabla 3.3.

Los límites de control del gráfico de control R_s se calculan del mismo modo que los del gráfico de control R con $n=2$, i.e.:

$$LCS = D_4 \bar{R}_s = 3,267 \bar{R}_s$$

$$LCI = (\text{no aplicable})$$

Los valores de R_s se dibujan directamente debajo de los puntos medios entre puntos x contiguos.

El método para calcular los límites a partir del recorrido móvil se utiliza en las siguientes situaciones:

- Cuando es imposible un subagrupamiento racional.
- Cuando los datos sólo se pueden obtener a intervalos de tiempo larguísimos, e.g., una vez a la semana o al mes.
- Cuando el proceso muestra una fluctuación grande.

(3) Método que utiliza la desviación estándar obtenida en el histograma

Como este método no se considera bueno para nuestros propósitos, no se explica aquí.

(4) Método que utiliza los errores de muestreo y de medida como referencia

Éste es un método especial utilizado a veces para controlar los materiales a granel, especialmente cuando los errores de muestreo y de medida son un problema. Por ejemplo, cuando se forma una muestra compuesta⁴ al reunir n extracciones elementales de material en un proceso que consiste en una reacción de síntesis orgánica por lotes o en el procesado de materiales tales como el coque, el carbón, fertilizantes, etc., y la muestra se analiza una vez y se obtiene una medida (X), los límites de control para la medida se calculan con la fórmula siguiente:

$$\bar{x} \pm 3 \hat{\sigma}_s \quad (3A.10)$$

donde $\hat{\sigma}_s$ es la precisión del muestreo de la muestra compuesta. Por ejemplo, si la variación entre las extracciones elementales es $\hat{\sigma}_i$, y las n extracciones elementales se muestrean al azar, y si las precisiones de la reducción y el análisis de la muestra son $\hat{\sigma}_R$ y $\hat{\sigma}_M$ respectivamente, un único análisis dará:

$$\hat{\sigma}_s = \sqrt{\hat{\sigma}_i^2/n + \hat{\sigma}_R^2 + \hat{\sigma}_M^2} \quad (3A.11)$$

4

A la muestra compuesta se le llama también en ocasiones "muestra media". Norma UNE. 80-401-91 "Métodos de ensayos de cementos. MÉTODOS DE TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE CEMENTO" Apartado 3.7. (N. de los T.)

Para verificar si hacen falta experimentos preliminares y experimentos de verificación a lo largo de un periodo de tiempo considerable. Este método se utiliza cuando el error del muestreo es comparativamente grande y el proceso está relativamente bien controlado.

Es mejor observar que cuando los errores de muestreo y de medidas son grandes y es difícil reducirlos, o cuando no es técnica o económicamente factible realizar un número grande de medidas, el llamado "método del experimento de comprobación" puede ser útil en algunos casos. Este método consiste en tomar dos muestras al azar por cada extracción elemental n , medirlas por separado y utilizar cada par de medidas como si fuera un subgrupo para representar un gráfico de control \bar{x} - R de $n = 2$. Sin embargo, en el caso en que el gráfico \bar{x} indique el estado controlado, generalmente el método del muestreo o de la medida es demasiado impreciso.

3A.2.2 El uso del gráfico de control \bar{x}

(1) Ventajas

- (a) Puesto que cada punto que corresponde a un dato se representa tan pronto como aparece, este tipo de gráfico permite la evaluación rápida del estado de un proceso y actuar con prontitud.
- (b) El gráfico muestra gráficamente cómo varía un proceso a lo largo del tiempo. Esto tiene un buen *efecto motivador*, aunque este gráfico no sea muy útil como gráfico de control.
- (c) Cuando en un proceso hay una fluctuación grande o una periodicidad, o cuando en la media del proceso surge un cambio grande y repentino, este tipo de gráfico indica claramente cómo sucede el cambio. La potencia de la prueba de hipótesis como gráfico de control también puede ser mejor en algunos casos.

(2) Desventajas

- (a) Es muy fácil cometer el error del tipo II. En otras palabras, la *potencia de la prueba es mala*. Esto es porque la capacidad del gráfico \bar{x} para detectar anomalías se deteriora generalmente al disminuir el tamaño de los subgrupos (n).
- (b) La propiedad más importante del gráfico de control, *el subagrupamiento racional*, no está clara, y las variaciones dentro de un subgrupo y entre los subgrupos están confusas.
- (c) Puesto que no se toma la media, el patrón de los puntos está distorsionado cuando la distribución de la población no es una distribución normal, y se altera la probabilidad de cometer un error.

(3) Método de uso

- (a) Cuando se calculan los límites de control (para estimar la variación de un proceso), se debe intentar primero el método del subagrupamiento racional. Si éste es imposible, los datos deben subagruparse en orden temporal y de algún modo significativo. Si esto es difícil o si el proceso muestra una fluctuación periódica grande, se debe utilizar el método del recorrido móvil. Según el proceso, se puede utilizar el método de los errores de muestreo y de medida para calcular la variación.
- (b) Siempre que sea posible, se debe utilizar el gráfico de control x junto con el $\bar{x} - R$. Cuando se hace esto, el gráfico ha de tener una anchura suficiente para que cada grupo de n puntos se representen por orden en el gráfico x para cada punto \bar{x} y R . Cuando no se pueda utilizar el gráfico $x - R$ conjuntamente, se debe utilizar el gráfico R_s .
- (c) Claro está que los límites ± 3 -sigma se utilizan para \bar{x} y R y, en principio, también deberían usarse para x . Puesto que la potencia de la prueba de hipótesis del gráfico de control x es mala, a veces se utilizan los límites ± 2 -sigma cuando los errores del tipo II constituyen un problema particular. Sin embargo, es erróneo utilizar los límites ± 2 -sigma simplemente porque los límites de control estén demasiado separados, sin considerar suficientemente los métodos para estimar la variación.
- (d) Si algunos puntos caen fuera de los límites en los gráficos de control \bar{x} , \bar{R} o x , se tiene que actuar para eliminar la causa de la anomalía.
- (e) En determinadas situaciones, se puede utilizar el gráfico de control x como si fuera un gráfico para indicar la periodicidad, las tendencias, las rachas, etc., pero se ha de tener cuidado en no cometer los errores del tipo I. Igualmente, se debe comprobar la forma de la distribución original por medio de histogramas, ya que el patrón de los puntos del gráfico x resultarán distorsionados si la distribución original está distorsionada.
- (f) Los gráficos de control x se pueden utilizar ampliamente como gráficos cuando se representan datos y en esta forma tienen un efecto motivador significativo, pero la alta dirección y el personal que está en los puestos de trabajo tienen que estar bien informados de *las diferencias entre los gráficos y los gráficos de control*.
- (g) Cuando se utilizan los gráficos de control, a menudo surgen los siguientes malentendidos:
 - (i) No se hace una distinción entre el ajuste y la eliminación de las causas de las anomalías.
 - (ii) Las personas creen, equivocadamente, que deberían actuar rápidamente frente a los resultados de las medidas anómalas en vez de dar prioridad a asegurarse de que las anomalías no vuelvan a repetirse en el futuro.

3A.3 La interpretación estadística de los gráficos de control

Si un proceso cambia, también cambia la distribución de cualquier característica que resulte de ese proceso. Este cambio en la distribución se manifiesta asimismo como un cambio en la media del proceso y de la variación (la variación dentro de los subgrupos). Consideremos cómo aparece realmente este cambio como secuencia de los puntos de un gráfico de control.

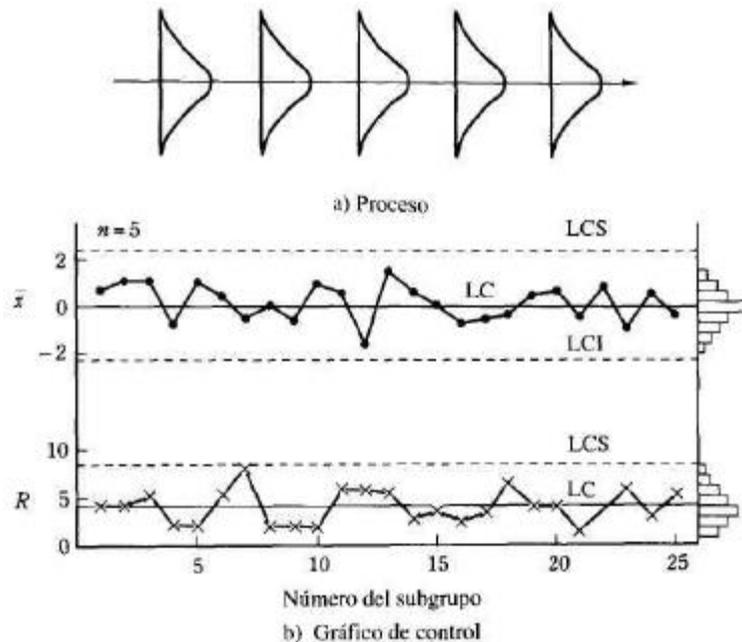


Figura 3A.4: Estado totalmente controlado

(1) El estado totalmente controlado

Cuando no cambia ni la media del proceso ni la variación del mismo (la variación dentro de los subgrupos) (ver la Figura 3A.4):

- Los puntos están repartidos al azar entre los límites de control. Obsérvese que esto no quiere decir que estén alineados con la línea central.
- Ningún punto cae fuera de los límites de control.
- En el gráfico \bar{x} la mayoría de los puntos cae cerca de la línea central, y algunos menos también caen cerca de los límites de control.
- En el gráfico R caen más puntos debajo de la línea central, lo que indica que la distribución es asimétrica.

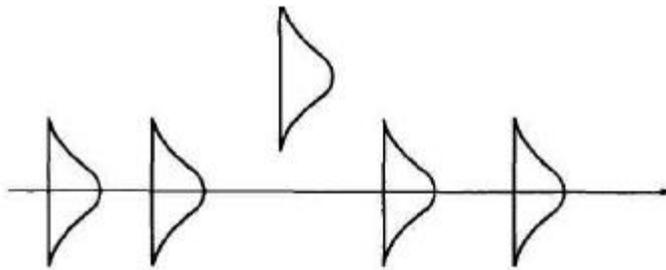


Figura 3A.5: Fluctuación grande y repentina del promedio de un proceso

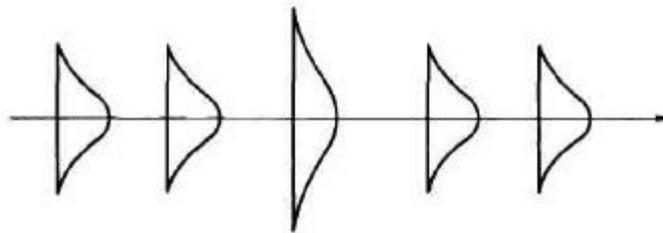


Figura 3A.6: Fluctuación grande y repentina de la dispersión (dentro de los subgrupos)

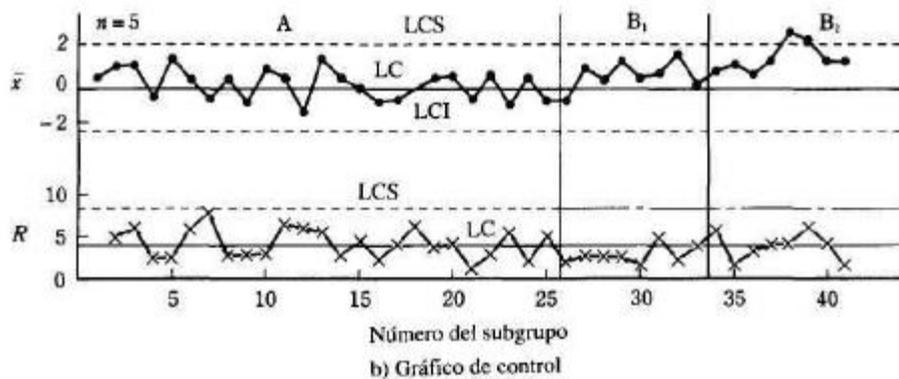
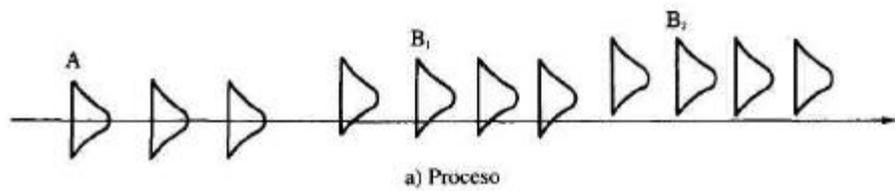


Figura 3A.7: Aumento gradual del promedio de un proceso

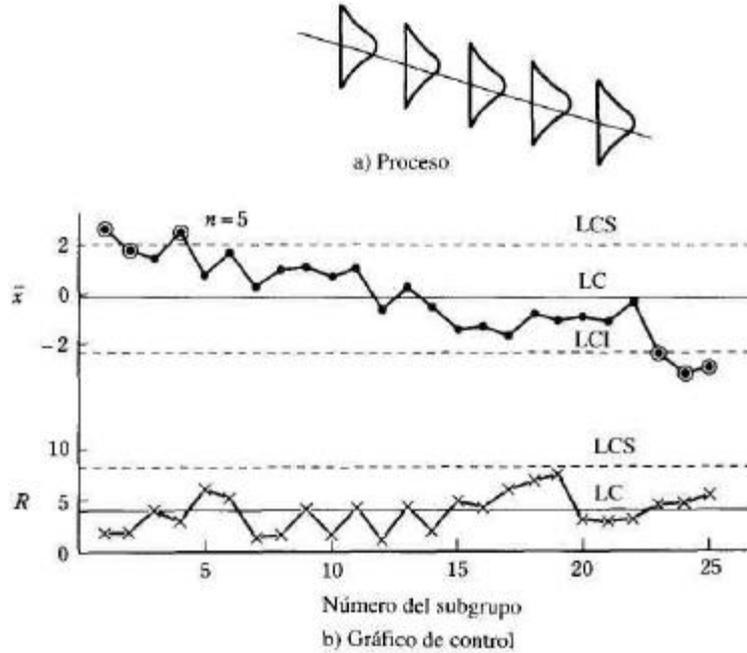


Figura 3A.8: Cambio sostenido del promedio de un proceso

(2) Cuando la media del proceso cambia mucho repentinamente (ver la Figura 3A.5)

Bajo estas circunstancias, son adecuados los siguientes gráficos:

- (a) Gráfico R : el mismo que en la Figura 3A.4.
- (b) Gráfico \bar{x} : algunos puntos caen fuera de los límites de control.

(3) Cuando la variación (dentro de los subgrupos) cambia mucho repentinamente (ver la Figura 3A.6)

Bajo estas circunstancias, se aplica lo siguiente:

- (a) Gráfico R : algunos puntos caen fuera de los límites.
- (b) Gráfico \bar{x} : el desplazamiento vertical de los puntos se hace más pronunciado, y algunos puntos caen fuera de los límites.

(4) Cuando el promedio del proceso aumenta gradualmente (ver la Figura 3A.7)

Aquí observará:

- (a) Gráfico R : ningún cambio.
- (b) Gráfico \bar{x} : en la zona B_1 aumenta el número total de puntos x por encima de la línea central, y se observan rachas, pero ningún punto cae fuera de

los límites de control. En la zona B2 algunos puntos caen también fuera de los límites de control.

- (c) Cuando se da esta situación, se verá la diferencia entre las zonas A, B₁ y B₂ si los datos de estas zonas están estratificados y representados en gráficos de control separados, como se explica en la subsección (7) más adelante.

(5) Cuando el promedio del proceso cambia según una tendencia definida (ver la Figura 3A.8)

Aquí observará:

- (a) Gráfico R : ningún cambio.
 (b) Gráfico \bar{x} : los puntos, mientras que siguen repartiéndose verticalmente, se hundén gradualmente. Algunos puntos caen fuera de los límites de control y aparecen rachas.

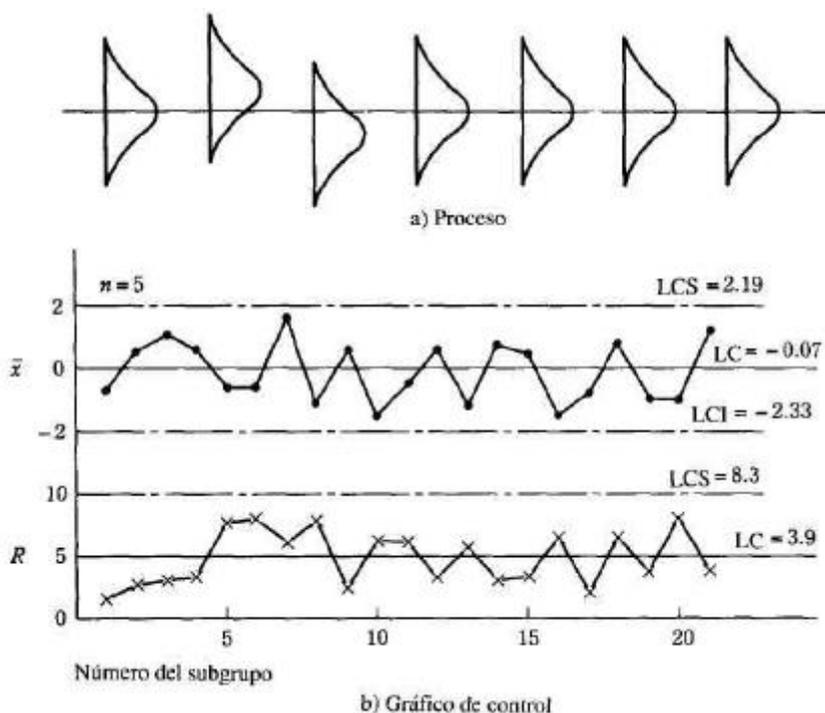


Figura 3A.9: Cambio aleatorio leve del promedio de un proceso

(6) Cuando el promedio del proceso cambia aleatoriamente

En esta situación, hay dos posibilidades generales:

- (a) El promedio del proceso muestra un ligero cambio aleatorio (ver la Figura 3A.9) y se observará lo siguiente:
- (i) Gráfico R : ningún cambio.
 - (ii) Gráfico \bar{x} : el desplazamiento vertical de los puntos todavía es aleatorio, pero se hace más pronunciado y aumenta el número de puntos que caen cerca de los límites de control. En este caso, ningún punto cae realmente fuera de los límites.
- (b) El promedio del proceso sufre un cambio grande y aleatorio (ver la Figura 3A.10) y se puede observar lo siguiente:
- (i) Gráfico R : ningún cambio.
 - (ii) Gráfico \bar{x} : el desplazamiento vertical de los puntos se hace más pronunciado y aumenta el número de puntos que caen fuera de los límites de control.

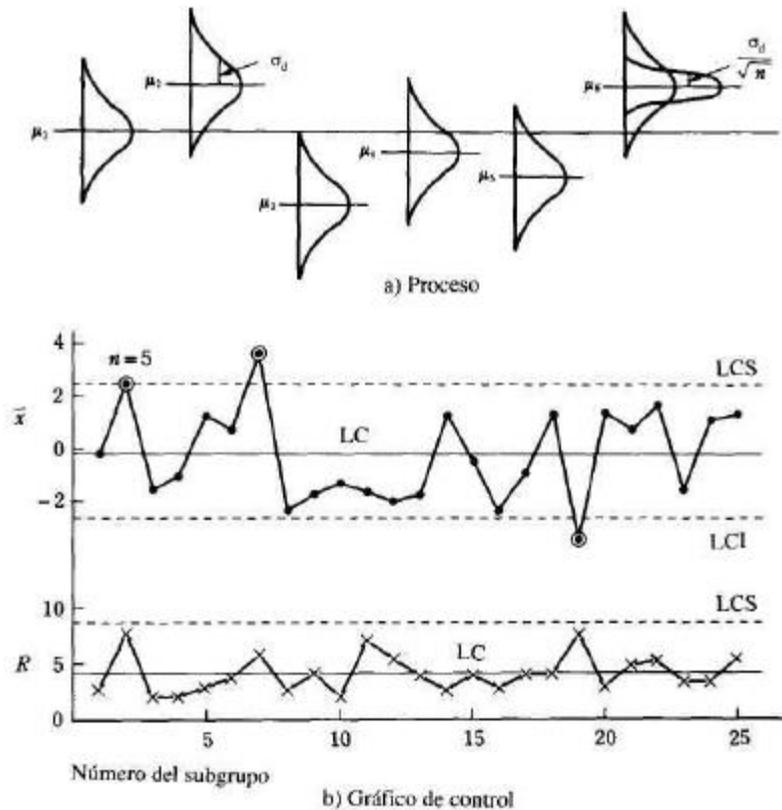


Figura 3A.10: Cambio grande y aleatorio del promedio de un proceso

Designemos la variación dentro de los subgrupos por σ_d^2 (la varianza dentro de los subgrupos es σ_d^2), y la variación entre los subgrupos por σ_e^2 (la varianza entre los subgrupos es σ_e^2). La variación entre los subgrupos es un indicador de la variación de la media del proceso, σ . Puesto que el gráfico de control R muestra la variación dentro de los subgrupos y σ_d^2 no cambia, el gráfico indica el estado controlado, lo que permite estimar σ_d^2 a partir de \bar{R}/d_2 . El propósito del gráfico R es controlar la variación dentro de los subgrupos. Sin embargo, la variación de \bar{x} , $\sigma_{\bar{x}}^2$, depende de la combinación de la variación debida a la variación dentro de los subgrupos, σ_d^2/n , y la variación σ_e^2 debida al cambio del promedio del proceso σ . La fórmula siguiente muestra esta relación:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma_e^2 + \frac{\sigma_d^2}{n} \tag{3A.12}$$

En este caso, si el promedio del proceso es absolutamente constante y el proceso está en estado completamente controlado, $\sigma_e = 0$, y:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_d^2}{n} \text{ (estado completamente controlado)} \tag{3A.13}$$

Puesto que los límites de control del gráfico \bar{x} se representan basándose en $A_2 \bar{R}$ (i.e., la variación dentro de los subgrupos), el fin principal de este tipo de gráfico es detectar los cambios del promedio del proceso y la variación entre los subgrupos σ_e que utiliza a σ_d de referencia. Esto es igual para los gráficos de control p , pn , c y u , y es una de las características más importantes del gráfico de control.

Igualmente, si hacemos un histograma con las medidas individuales (x), y llamamos S_H a la desviación estándar calculada a partir de éste, entonces S_H^2 viene dada aproximadamente por la fórmula siguiente:

$$S_H^2 = \sigma_e^2 + \sigma_d^2 \tag{3A.14}$$

Mientras tanto, si multiplicamos la fórmula 3A. 12 por n , obtenemos:

$$n \sigma_{\bar{x}}^2 = n \sigma_e^2 + \sigma_d^2 \tag{3A.15}$$

$$\text{También, } \sigma_d^2 = (\bar{R}/d_2)^2 \tag{3A.16}$$

Así pues, si hacemos un histograma de \bar{x} y llamamos $S_{\bar{x}}$ a la desviación estándar obtenida a partir de éste, tenemos:

$$C_f = \frac{\sqrt{n} S_{\bar{x}}}{(\bar{R}/d_2)} \left(C_{f'} = \frac{S_H}{(\bar{R}/d_2)}, C_{f''} = \frac{\sqrt{n} S_{\bar{x}}}{S_H} \right) \tag{3A.17}$$

Usualmente este coeficiente tiene un valor superior a 1, siempre que $\int e^{-\bar{0}}$. Puesto que C_f es un valor que indica el estado aproximado de control de un proceso, se le llama "coeficiente de control". Normalmente, podremos decir con seguridad que un proceso no está bajo control si C_f es 1,3-1,4 o mayor. Igualmente, si C_f es 0,8-0,7 o menor, quiere decir que los datos de procesos que tienen promedios considerablemente diferentes se han combinado en un solo grupo, como en el ejemplo descrito en la subsección 9 más adelante; en otras palabras, indica un subagrupamiento inadecuado en el que se han mezclado datos de diferentes fuentes en los mismos subgrupos.

(7) Cuando cambia la variación (dentro de los subgrupos)

Bajo esta condición existen las siguientes posibilidades:

- (a) Cuando aumenta la variación (ver la Figura 3A.11), pueden observarse estos cambios:
 - (i) Gráfico R : los puntos muestran una tendencia general hacia arriba, y algunos puntos caen fuera de los límites de control.
 - (ii) Gráfico \bar{x} : los puntos todavía están distribuidos al azar, pero su desplazamiento vertical se hace más pronunciado. Sin embargo, los puntos todavía están distribuidos más o menos por igual alrededor de la línea central. Algunos puntos caen fuera de los límites de control.
- (b) Cuando disminuye la variación (ver la Figura 3A.12), son observables estos cambios:
 - (i) Gráfico R : los puntos muestran un descenso general, y aumenta el número de puntos debajo de la línea central.
 - (ii) Gráfico \bar{x} : los puntos todavía están distribuidos al azar, pero su desplazamiento vertical se hace menos pronunciado. Los puntos están distribuidos aproximadamente por igual arriba y abajo de la línea central, y aumenta el número de puntos próximos a la línea central.

Cuando se piensa que la variación dentro de los subgrupos haya cambiado de este modo, se debe hacer una investigación estratificando los datos, preparando dos gráficos R separados, y calculando dos valores de \bar{R} . Ver cómo hacerlo en la sección 3A.4.

(8) Gráficos de control estratificados

Si los datos de la Figura 3A.7 están estratificados en las zonas A y B₂, y se representan gráficos de control separados y se comparan entre sí (ver la Figura 3A.13), observamos lo siguiente:

- (a) Gráfico R : ninguna diferencia.

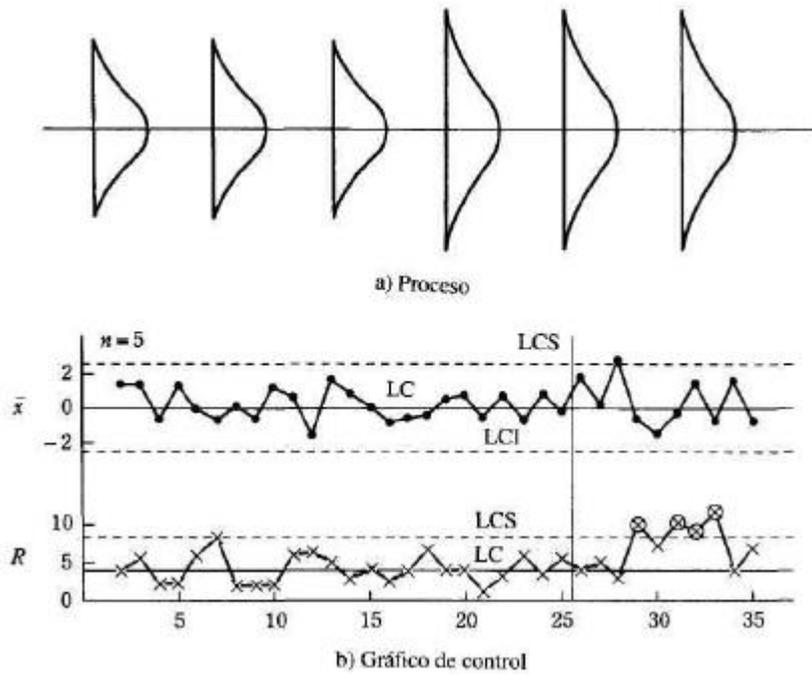


Figura 3A.11: Aumento de la dispersión de un proceso

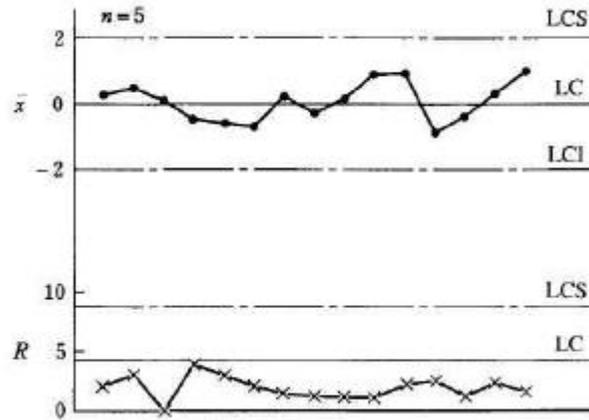


Figura 3A.12: Disminución de la dispersión de un proceso

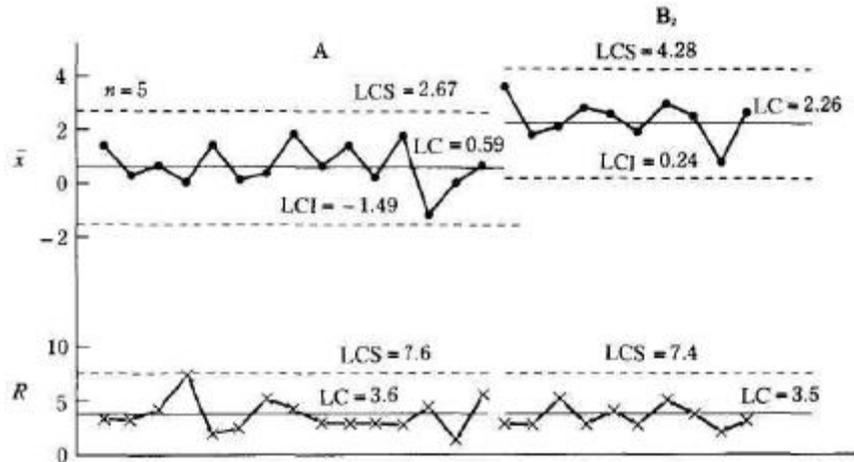


Figura 3A.13: Gráficos de control estratificados para las zonas A y B₂

(b) Gráfico \bar{x} : A y B₂ están en estado controlado, pero parecen tener distintas medias. Para ver la prueba estadística de si hay o no una diferencia entre las medias del proceso de los dos estratos cuando los datos están así estratificados y se hayan representado gráficos \bar{x} separados, vaya a la sección 3A.4.

(9) Cuando se juntan dos grupos de datos con medias de proceso extremadamente diferentes (ver la Figura 3A.14)

Bajo estas circunstancias, se puede observar lo siguiente:

- (a) Gráfico R : los puntos se apiñan alrededor de la línea central.
- (b) Gráfico \bar{x} : los puntos se apiñan alrededor de la línea central.

Cuando sucede esto, a menudo significa que se han incluido en los mismos subgrupos datos procedentes de fuentes diferentes, y que los subgrupos contienen datos procedentes de procesos que tienen medias muy distintas. Esto se debe investigar estratificando más de diversas maneras los datos dentro de los subgrupos.

3A.4 Métodos para contrastar las diferencias entre los promedios a partir de los gráficos de control

Cuando se representan varios gráficos de control estratificados, a veces es posible juzgar intuitivamente si hay o no alguna diferencia entre los promedios del proceso o la variación dentro de los subgrupos (\bar{d}) de los diferentes

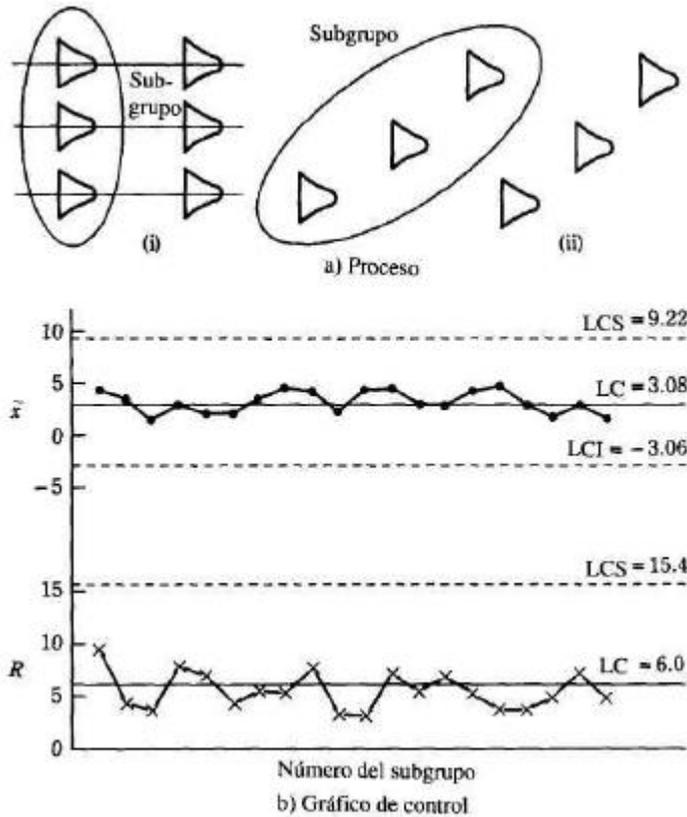


Figura 3A.14: Combinación de datos procedentes de poblaciones con tres distribuciones muy diferentes

estratos en el momento de hacer el gráfico. Sin embargo, es mejor utilizar los datos para contrastar estadísticamente si podemos decir que existe o no una diferencia.

(1) Prueba de hipótesis de la diferencia en la variación ($\int d$)

Hay tres pasos en este procedimiento de la prueba de hipótesis:

Primer paso: Preparar gráficos de control estratificados y separados para los conjuntos de datos A y B (se pueden emplear tamaños diferentes para los subgrupos), y calcular \bar{R}_A y \bar{R}_B .

Segundo paso: Calcular F_0 con la fórmula siguiente:

$$F_\alpha = \frac{(\bar{R}_A/c_A)^2}{(\bar{R}_B/c_B)^2} \tag{3A.18}$$