

## ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA LA CALIDAD EN LA INDUSTRIA BURGALESA

**Santiago APARICIO CASTILLO**

**Pablo ARRANZ VAL**

**Olga VALENCIA GARCÍA**

Profesores del Área de Economía Aplicada de las E.U.E. Empresariales y de Relaciones Laborales. UNIVERSIDAD DE BURGOS

### 1.- INTRODUCCIÓN

La presente comunicación pretende indagar sobre la situación de las empresas industriales burgalesas ante la mejora continua de la calidad, así como descubrir el grado de conocimiento de las técnicas estadísticas para la calidad existente y su nivel de aplicación dentro de la industria burgalesa. Teniendo en cuenta las normas UNE relativas a técnicas estadísticas para la calidad, se trata de verificar si en las primeras fases de implantación de estos sistemas, se están utilizando estas herramientas.

Así pues, el primer epígrafe muestra una revisión general de las técnicas estadísticas existentes aplicadas en la industria, exponiendo sus principales características de uso. En segundo lugar, se describe brevemente la metodología empleada en el estudio empírico efectuado. Los resultados de dicho estudio quedan recogidos en el tercer apartado. Finalmente, en la última parte del trabajo, presentamos las conclusiones que reflejan la situación actual en la que se encuentra la industria burgalesa en estas materias.

### 2.- TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

Las técnicas estadísticas contempladas se han agrupado en los seis bloques siguientes :

#### 2.1.- Herramientas básicas

Las herramientas básicas que se aplican en los departamentos de calidad de las empresas son útiles para la detección y la resolución de los problemas que pueden presentarse en las mismas. Ahora bien, podemos dividirlos en dos clases. Las primeras, denominadas de graficado, ayudan a pensar mejor y a enfocar la atención en la verdadera dimensión del problema. Las segundas de visualización permiten expandir el pensamiento de las personas para incluir todas las dimensiones de un problema o solución.

Dentro de las herramientas de representación de datos podemos destacar, *la distribución de frecuencias, los histogramas, la estratificación, los diagramas de dispersión y el diagrama de Pareto. Los diagramas Causa-Efecto, la tormenta de ideas (brainstorming) y los diagramas de flujos* son herramientas que permiten reconocer todos los aspectos de los procesos así como el establecimiento de relaciones entre causas y efectos posibilitando que todas las personas implicadas aporten el mayor número de soluciones en la dimensión de un problema.

En la resolución de problemas y en general en el esfuerzo de mejora de la calidad es muy importante utilizar datos y hechos. Pero estos son de poco valor si no aparecen suficientemente ordenados y clasificados.

La *distribución de frecuencias*, es la relación que existe entre los valores que toma la característica que se está controlando y sus frecuencias, absolutas o relativas. Así mismo, nos proporciona una noción clara y rápida del modo de variación de la característica que estamos controlando. Se puede representar en forma de tabla o bien mediante un histograma.

Por su naturaleza gráfica, *el histograma* puede ayudar a identificar e interpretar puntos que son difíciles de ver en simples tablas de números, en función de las tres características típicas de los histogramas: centro, amplitud y perfil. El histograma conjuntamente con el diagrama de barras son las representaciones gráficas más habituales de las distribuciones de frecuencias. En general, para analizar un histograma o un diagrama de barras y extraer conclusiones que puedan ser representativas, se necesita disponer de 50 observaciones como mínimo. El histograma es una herramienta sencilla pero eficaz para un primer análisis de los datos e identificación de problemas ya que cualquier proceso que se mida, presenta siempre una variación. Esta variación muestra siempre un patrón determinado que se representa por una distribución de frecuencias, y que es más fácil de apreciar gráficamente que con simples tablas de números.

La técnica de *estratificación* es a menudo muy útil en el análisis de datos para encontrar oportunidades de mejorar. La estratificación ayuda a analizar aquellos casos en los cuales la información oculta los hechos reales. Con frecuencia, esto se produce cuando los datos registrados provienen de varias fuentes pero son tratados como un número. Este concepto permite subdividir el valor total en categorías o subdivisiones significativas que permitan concentrarse en la acción correctiva pertinente. Esta técnica normalmente complementa a otra como los histogramas, los gráficos de control o los diagramas de Pareto.

El *diagrama de Pareto* es un método gráfico de análisis (de la forma del diagrama de barras), que nos permite ver, de una forma sencilla, analítica y cuantitativamente, los distintos factores que intervienen en un problema, puestos en orden decreciente a excepción de uno llamado "otros o varios" que se dispone en último lugar. Este factor agrupa a los de menor cuantía e interés para su análisis. Debe utilizarse cuando se necesite mostrar la importancia relativa de todos los problemas o condiciones a fin de seleccionar el punto de inicio para la solución de problemas, para la identificación de la causa fundamental de un problema. Esta técnica sirve para conseguir el mayor nivel de mejora con el menor esfuerzo posible.

El *diagrama de dispersión* estudia la posible relación entre dos variables. Este tipo de diagrama se usa para probar posibles relaciones entre causa y efecto; no puede probar que una variable causa la otra, pero sí aclara si existe alguna relación y la intensidad que pudiera tener la misma.

A diferencia de los anteriores, el diagrama Causa-Efecto, la tormenta de ideas y el diagrama de flujo, son técnicas que no tratan de representar datos, sino que suponen la descripción de procesos donde pueden plantearse problemas para que un grupo de individuos traten de aportar soluciones. Son por tanto técnicas de grupo.

La *tormenta de ideas (brainstorming)*, se utiliza para ayudar a un grupo a crear tantas ideas como sea posible empleando el menor tiempo posible. Puede realizarse de dos formas, estructurada, donde cada persona en el grupo debe dar alguna idea conforme le toca el turno de participar o bien sin estructurar, en cuyo caso los miembros del grupo aportan ideas tan pronto como les vienen a la mente.

El *diagrama Causa-Efecto*, es una representación gráfica de las relaciones lógicas que existen entre las causas que producen un efecto bien definido. Este diagrama permite visualizar, en una figura, (espina de pescado) todas las causas asociadas a una disfunción y sus posibles relaciones. Es una herramienta válida tanto en empresas de servicios como en empresas industriales. Fundamentalmente el diagrama Causa-Efecto ayuda a clasificar las causas dispersas y a organizar las relaciones mutuas.

El *diagrama de flujo o flujograma* representa o describe gráficamente un proceso en cualquier tipo de actividad. Se ayuda de dibujos, símbolos de ingeniería, de figuras geométricas, que deben ser entendidas por cualquier persona con ayuda de una clave. Sirve para entender exactamente como funciona un proceso antes de tomar una acción sobre él. Por lo tanto, es una herramienta a utilizar cuando queramos establecer alguna mejora en el proceso.

## **2.2.- Técnicas estadísticas avanzadas**

Las *distribuciones de probabilidad* pueden emplearse como un medio para modelizar las características de calidad de un proceso. Algunas de estas características son susceptibles de ser medidas sobre una escala continua (variables), mientras que otras permiten que una unidad de producto pueda ser clasificada como "conforme" o "no conforme" (atributos), por lo que es necesario diferenciar entre distribuciones de probabilidad continuas y discretas.

Los modelos de tipo discreto que aparecen con más frecuencia en el control estadístico de calidad son las distribuciones binomial, hipergeométrica y de Poisson. A través del modelo binomial se puede determinar la probabilidad de encontrar un número concreto, o un porcentaje, de unidades defectuosas en una muestra, en función de la proporción de unidades defectuosas en el lote del que proceden. El único requisito para la utilización de este modelo es que la probabilidad de encontrar una unidad defectuosa sea constante, lo que queda garantizado con un tamaño de lote suficientemente grande respecto al de la muestra. Si no se cumple esta condición, hay que recurrir a la distribución hipergeométrica, que describe el mismo fenómeno, pero en el caso de un muestreo sin reposición. Asimismo, cuando la proporción de unidades disconformes en el lote es muy pequeña, y las muestras son grandes, se suele acudir a la ley de Poisson, como aproximación del modelo binomial.

En cuanto a los modelos de tipo continuo, el más importante, tanto en la teoría como en la aplicación de la Estadística a la calidad, es la distribución normal, que describe el comportamiento de numerosas variables relevantes en los procesos industriales, así como el de las medias y proporciones muestrales, independientemente de la naturaleza de la población de la que procedan. Otro modelo, interesante en los estudios de fiabilidad, es la distribución exponencial, que sirve para determinar la probabilidad de que un equipo funcione sin fallos durante un periodo de tiempo determinado, siempre que el tiempo entre fallos se distribuya de forma exponencial.

En cualquier caso, una distribución de probabilidad queda perfectamente especificada cuando se conocen los parámetros que la definen, es decir, los parámetros que describen el comportamiento del proceso: generalmente medidas de tendencia central (medias), medidas de dispersión (varianzas), o bien, proporciones. Estos parámetros suelen ser desconocidos y habitualmente cambian a lo largo del tiempo, por lo que es necesario estimarlos a partir de datos muestrales. La *estimación puntual* asigna un único valor al parámetro desconocido pero no permite establecer el riesgo de error cometido, por lo que en muchas ocasiones, se emplea la *estimación por intervalos de confianza*.

Aparte de la obtención de buenas estimaciones, el control de calidad precisa frecuentemente de la realización de *tests de hipótesis* sobre el valor de los parámetros relevantes. Con ello se pretende buscar evidencia suficiente para rechazar suposiciones que han

sido planteadas partiendo de información histórica del proceso en estado de control, o que son resultado de especificaciones contractuales o de diseño. Se trata, por tanto, de verificar la conformidad del proceso con sus valores especificados, y de detectar los posibles cambios del mismo.

Algunas de las pruebas más comunes son: la comparación de la media con un valor dado, cuyo objetivo es observar cambios en la tendencia central del proceso, bien en el caso de que la varianza sea conocida (procesos estables, en los que se maneja información histórica de la población), o bien en el caso de que ésta se desconozca (procesos inestables, sin información histórica), la comparación de la desviación típica con un valor dado, lo cuál detectará cambios en la variabilidad del proceso, y la comparación de la proporción de unidades defectuosas con valores estipulados. Los mismos tests pueden realizarse para comparar los parámetros de dos poblaciones, mediante el análisis de dos muestras. La casuística depende aquí, no sólo del conocimiento de las desviaciones típicas de los procesos (función, a su vez, de su grado de estabilidad, y de la disponibilidad de información histórica), sino de otras cuestiones como la posibilidad de asumir una variabilidad similar en ambos, o el carácter independiente o relacionado de ambas muestras.

Hay que señalar que las herramientas estadísticas mencionadas hasta el momento son el fundamento teórico de la mayoría de las técnicas de Control Estadístico del Proceso, así como del diseño de procedimientos de Muestreo para Aceptación. Estas cuestiones serán desarrolladas en los puntos siguientes, pero antes de finalizar este apartado, es necesario citar otras herramientas importantes.

El *Análisis de la Varianza* (ANOVA) es una prueba paramétrica que estudia la incidencia de uno o varios factores sobre el comportamiento promedio de un colectivo. Su propósito es determinar si las diferencias de medias observadas entre varios grupos, definidos a través de una o varias variables, son significativas o se deben sólo al azar, por lo que puede considerarse como una extensión del test de comparación de medias. A pesar de ser una prueba de medias, esta técnica se fundamenta en una división de la varianza total en diferentes componentes, (la variación generada por los factores, la que procede de las interacciones entre ellos, y la ocasionada por todos los parámetros no controlados, o varianza del error), y en la posterior comparación entre ellas.

La aplicación de esta herramienta facilita el análisis de los resultados obtenidos mediante la experimentación, explicando las diferencias en la respuesta del proceso productivo ante distintas combinaciones de niveles de factores, lo cuál la convierte en un instrumento muy interesante para la mejora de la calidad.

La utilización del *Análisis de Regresión y Correlación* permite extraer de grandes cantidades de datos, las características de una relación que, en algunos casos, no es evidente. Partiendo de una serie de mediciones de una variable respuesta, observadas bajo un conjunto de condiciones experimentales (variables de predicción), esta herramienta posibilita la obtención de una ecuación empírica de gran interés, si es capaz de predecir adecuadamente la respuesta, en el interior de una región especificada de los predictores.

El descubrimiento de este tipo de asociaciones entre variables es muy importante para la experimentación, pues ofrece la posibilidad de sustitución de ensayos lentos y complicados por otros más rápidos y menos costosos, e incluso puede hacer factible el empleo de ensayos no destructivos en lugar de otros destructivos. Del mismo modo, las relaciones existentes entre algunas características del producto terminado y ciertas características de etapas intermedias del proceso de fabricación, permiten de alguna manera "predecir" la calidad de la producción.

### **2.3.- Control estadístico del proceso**

El Control Estadístico del Proceso (SPC), del inglés Statistical Process Control es un instrumento de gestión que permite, mediante la comparación del funcionamiento del proceso con unos límites establecidos estadísticamente, establecer y garantizar la consecución de los objetivos deseados bajo la filosofía de la prevención. Permite conseguir, mantener y mejorar procesos estables y capaces. Produce el efecto de conocer la variabilidad de los factores que integran un proceso, prevenir los defectos, reducir los costes y cumplir los requisitos. Comprenderemos mejor el SPC si lo dividimos en sus tres elementos:

**Control:** es una comparación del comportamiento real con el objetivo perseguido, identificando que acciones correctoras son necesarias y cuando se deben aplicar para conseguir ese objetivo.

**Estadístico:** consistente en la realización de mediciones y su clasificación en un modelo claro que permita hacer predicciones sobre el comportamiento.

**Proceso:** un proceso es cualquier actividad en la que se combinen máquinas, herramientas, métodos, materiales y personas empleadas en un trabajo común para obtener una calidad especificada para un determinado producto o servicio.

La utilización del SPC esta justificada ya que ningún proceso o máquina es capaz de producir de modo consecutivo unidades que sean idénticas en apariencia. Aparecerán diferencias debidas a causas de variación *inherentes* a la máquina. Además de estas variaciones hay otras causas *especiales* que pueden influir en la calidad del producto. La combinación de las causas *inherentes* y las *especiales* dan lugar al comportamiento del proceso en su conjunto.

El Control Estadístico de Procesos es un medio para conseguir la prevención de errores, destacando las situaciones cuando la salida de un proceso es defectuosa por encima de los límites aceptables, e identificando si el defecto se debe a una causa de variación *inherente* o *especial*. Esta basado en la elaboración e interpretación de los gráficos de control. Estos son una herramienta estadística utilizada con fines de control, que consiste, en la representación gráfica, en el tiempo, del funcionamiento del proceso, comparado con unos límites calculados estadísticamente. Mediante esta comparación se pretende detectar si existen causas especiales de variación que afecten al proceso, para ser capaces de identificarlas.

De forma general existen, en un proceso industrial, dos tipos de seguimiento de los procesos a los que corresponden sendos gráficos: *gráficos de dimensiones o variables* (conocidos como gráficos  $\bar{X}$ ,  $R$  y  $\bar{X}$ ,  $S$ ) y *gráficos de atributos*, en los que no se controlan las medidas sino la fracción o porcentaje de defectuoso producido. En todos los casos, sea cual sea el tipo de gráfico utilizado, los puntos en ellos representados corresponden a los valores medios de las muestras extraídas y no a valores individuales de las mismas. Se utilizan los valores medios ya que son mucho más sensibles, ante variaciones del proceso, que los valores individuales. Ambos tipos de gráficos se conocen con el nombre de gráficos de control.

Un *gráfico de control* no es más que una sencilla técnica gráfica para observar y controlar una característica de calidad de una sola variable. Su función es la de obtener una estimación del parámetro principal que describe la variabilidad de dicha característica para luego aplicar técnicas de comprobación de hipótesis a fin de establecer si el proceso esta controlado.

Los *gráficos de control por variables* están diseñados para medir características mensurables. Su utilización es muy amplia ya que la mayoría de las características de los

procesos pueden ser medidas. La información estadística que proporcionan las variables es mayor que la de los atributos con lo que, para un mismo nivel de información, se requieren menos datos, y por lo tanto, menos costes de inspección. Los más utilizados son los gráficos  $\bar{X}$ , R (medias y recorridos) y  $\bar{X}$ , S (medias y desviaciones típicas). En este tipo de gráficos la característica medida es una variable continua. El gráfico de medias ( $\bar{X}$ ) se emplea para observar los cambios en la media de la distribución de la muestra y el de recorridos (R) se utiliza para observar los cambios en la dispersión de la distribución de la muestra. Estadísticamente responden a un modelo de distribución normal. Se interpretan juntos, siendo muy útiles para el análisis técnico y los estudios de capacidad del proceso.

Quando se trata del *control por atributos*, únicamente hay que vigilar una determinada característica de tipo discreto y ver si cumple o no cumple con los requisitos con independencia de lo alejada que este de su cumplimiento. Son recomendables en procesos administrativos, donde con frecuencia, las características no son fácilmente medibles. En general los gráficos de control por atributos son utilizados para la mejora de procesos que producen un número alto de unidades defectuosas. Tienen el inconveniente de no avisar si se van a producir cambios adversos en el proceso. Avisan cuando estos se han producido. Por ello, no evitan un mayor número de unidades defectuosas. Los principales gráficos de control por atributos son el gráfico "p" para la proporción de unidades defectuosas, el gráfico "np" para el número de unidades defectuosas (tamaño de muestra constante), el gráfico "c" para el número de defectos por muestra (con tamaño de muestra constante) y el gráfico "u" para la proporción de defectos por unidad cuando el tamaño de muestra no es fijo. Desde el punto de vista estadístico la distribución de la proporción de unidades defectuosas (gráfico "p") y el número de unidades defectuosas (gráfico "np") siguen la distribución binomial. Los gráficos "c" y "u" siguen una distribución de Poisson.

#### **2.4.- Planes de muestreo**

Aunque la herramienta clave en el esfuerzo para mejorar la calidad es el Control Estadístico del Proceso, la inspección de la producción continúa siendo un elemento clave en muchas organizaciones, especialmente en aquellas que se encuentran en los estadios iniciales de la implantación de sistemas de calidad.

La elección del tipo de inspección más adecuada depende de múltiples factores pero, en la mayoría de las empresas, se rechaza tanto la "inspección 100%", debido a su elevado coste, (a no ser que se trate de componentes críticos o productos de alto valor), como la "inspección cero", (excepto en los casos de procesos estables, en estado controlado y con elevados índices de capacidad), optándose por una *inspección por muestreo*. Ésta última, basada en la teoría estadística, consiste en el análisis de una muestra de producto, con objeto de decidir la aceptación o rechazo del lote completo del que procede, por lo que se considera una opción intermedia que disminuye riesgos y costes.

Así, un *Plan de Muestreo para Aceptación* pretende garantizar que la calidad de un conjunto de unidades de un producto, no es inferior a ciertos niveles previamente especificados. Para ello proporciona, de forma estructurada, el tamaño de la muestra a utilizar en cada caso, y el criterio de aceptación adecuado según los riesgos tolerados por comprador y fabricante, relacionados, obviamente, con la realización de la inferencia estadística.

Los diferentes planes de muestreo deben alcanzar un objetivo de calidad del lote, expresado por los denominados Índices de Calidad del Muestreo: Nivel de Calidad Aceptable (AQL), Calidad Límite o Porcentaje de Unidades Defectuosas Toleradas (LTPD), Calidad Media de Salida (AOQ). Los planes basados en AQL minimizan el riesgo del fabricante, mientras que los planes LTPD mantienen bajo el riesgo del comprador. En cuanto al tercer índice, se asegura a los fabricantes que la calidad media de salida de los lotes no es inferior a la establecida.

La elección de un plan de muestreo depende, asimismo, de que las características a estudiar sean atributos o variables. La inspección por atributos exige mayores tamaños de muestreo pero es de aplicación más sencilla que la de variables, por lo que suele ser apropiada para realizar un control rápido y de bajo coste de productos de escaso valor, en los que se analizan varias características a la vez. Por el contrario, la inspección por variables requiere planes de muestreo individualizados para cada característica, siendo por ello interesante para el control de características críticas, o en el caso de ensayos de elevado coste.

Además de los mencionados, existen otros elementos que intervienen en la definición de un plan de muestreo. Entre ellas cabe citar:

- la etapa del flujo del producto, que da lugar a una inspección en recepción, de proceso o de producto,
- el número de muestras analizadas, que permite distinguir entre muestro simple, doble, múltiple o secuencial,
- el nivel de inspección elegido, normal, reducido o riguroso.

Todos los aspectos mencionados, junto con la consideración detenida de sus consecuencias económicas, (costes de inspección, de aceptar artículos defectuosos, o de rechazar artículos aceptables), son esenciales para el diseño de un plan de muestro adecuado a los fines de una empresa. Existen, sin embargo, algunos planes publicados con una amplia difusión. Nos referimos a los siguientes:

Por atributos:

- Los *Planes Military Standard MIL-STD-105D* (UNE 66.020, ISO 2.859), son planes de muestreo para productos que pueden ser agrupados en lotes suministrados de forma continua, basados en el AQL. El tipo de muestreo puede ser simple, doble o múltiple, y el nivel de inspección, normal, riguroso o reducido.
- Las *Tablas Dodge-Romig* incluyen planes de muestreo simples y dobles, y permiten elegir una protección basada en la Calidad Límite (LTPD) o en el Límite de Calidad Media de Salida (AOQL). Su utilización requiere la elección de un valor del índice de calidad escogido, para el cuál se minimiza el coste de muestreo.
- Los *Planes de Muestreo Secuenciales* no establecen una muestra fija a verificar, sino que la decisión se realiza sobre unidades individuales, lo que da lugar a lotes abiertos. Se trata de planes generalmente más económicos y flexibles, recomendados para controles costosos, así como en la recepción o expedición de grandes lotes.
- Los *Planes de Muestreo Continuos* (Norma MIL-STD 1235 y 1235B) están diseñados para el control de procesos continuos que no pueden dividirse en lotes. Utilizan periodos alternativos de inspección 100% y muestreo, dependiendo de la calidad observada en el producto.

Por variables:

- Los *Planes Military Standard MIL-STD-414* (UNE 66.030, ISO 3.951) se fundamentan en el Nivel de Calidad Aceptable (AQL) y asumen series continuas de lotes de un mismo proceso de fabricación, datos distribuidos normalmente, y la existencia de un contrato o norma que define límites de especificación. Dependiendo de la medida de variabilidad utilizada, se pueden emplear varios métodos:  $\sigma$ , S, ó R.
- Los *métodos LOT-PLOT* (Representación gráfica del lote) emplean un histograma de frecuencias para estimar la media y la desviación típica de una característica del lote, a través de una muestra de tamaño constante e igual a 50 unidades. La comparación de los extremos de la distribución con las tolerancias determina la aceptación o rechazo de los lotes. Suele utilizarse en muestreo de recepción, y es un buen sistema para conseguir mejoras de calidad por parte de los proveedores.

Independientemente de la opción seleccionada, hay que señalar que la actividad de muestreo tiende a reducirse progresivamente, a medida que aumenta la madurez de la organización de la calidad, por lo que se puede hablar de la existencia de un ciclo de vida en su aplicación. La atención se centra cada vez más en el control estadístico del proceso, mucho más eficaz tanto desde el punto de vista de los costes, como desde la óptica de mejora de la calidad.

## **2.5.- Diseño de experimentos**

Se denomina diseño de experimentos a la metodología para establecer el orden en el que debe realizarse un programa experimental. Incluye la selección de niveles de uno o más factores, o las combinaciones de los factores que deben tomar parte en un experimento. El propósito del diseño de un experimento es proporcionar los métodos más económicos y eficientes que permitan obtener conclusiones válidas y relevantes del experimento, minorando, lo antes posible, los errores en que puede incurrirse al realizar dicho experimento.

La forma de realizar el experimento incluye el tratamiento aleatorio para asignar los diferentes tratamientos experimentales, y para que tengan un enfoque científico deben cumplirse los siguientes requisitos: Reconocer la existencia del problema; formular el problema; definir los factores y los niveles del experimento; definir las variables a medir; definir el ámbito de aplicación del experimento; seleccionar aleatoriamente las unidades experimentales; seleccionar los tratamientos de las unidades experimentales; definir el análisis correspondiente al diseño; obtener los datos; analizar los datos; obtener conclusiones e implantar las recomendaciones.

### ***Diseño de experimentos de un factor a la vez***

En este método, los diferentes niveles de un factor se comparan bajo condiciones fijas. Para cada factor, los niveles 1 y 2 se comparan con los niveles de todos los demás factores fijos. Esto nos permite una comparación controlada de los dos niveles de cada factor.

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos a realizar} = ( \text{N}^\circ \text{ de factores} \times \text{N}^\circ \text{ de niveles} ) - ( \text{N}^\circ \text{ de factores} - 1 )$$

El problema es que cada comparación se realiza con todos los demás factores fijos, por lo que cuando los resultados del experimento se apliquen al proceso de fabricación se podrían encontrar cientos de cambios. Estos son los llamados factores de ruido (factores que causan variabilidad en nuestro proceso)

### ***Diseño de experimentos de varios factores***

Aplicamos esta metodología cuando en vez de comparar un factor efectuamos la comparación de varios factores de la misma forma que la anterior, pero cuando realizamos un experimento con dos factores y una observación por tratamiento, no existe la posibilidad de separar el efecto de la iteración de los factores del error experimental. Por lo que cuando realicemos experimentos con dos factores tendremos que realizar más de una observación por tratamiento.

### ***Diseño de experimentos de factoriales completos***

Otra forma de realizar los experimentos es el método de factoriales completos. Aquí se investigan todas las posibles combinaciones de niveles de los factores.

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos a realizar} = \text{N}^\circ \text{ de niveles} \times \text{N}^\circ \text{ de factores}$$

Con lo que obtenemos todos los efectos principales e iteraciones posibles sin que exista en su cálculo indeterminación o ambigüedad entre ellos. Se puede utilizar cuando el número de



factores a analizar es reducido; el problema surge cuando debemos investigar más factores a más niveles (por ejemplo 13 factores a 3 niveles), el número de experimentos a realizar sería de  $3^{13} = 1.594.323$ .

En estos casos debemos recurrir a métodos más simplificados, como es el método de detección. El cual no renuncia a realizar el factorial completo, pero en contrapartida busca previamente los factores que no pueden ser importantes y los elimina de entrada, con lo que se consigue reducir desde el principio el número de factores sobre los cuales aplicar un factorial completo.

### Diseño de experimentos de factoriales fraccionados

Es otro método simplificado para reducir el número de ensayos, que consiste en fraccionar el número de ensayos necesarios para cubrir todas las combinaciones posibles pero que de algún modo nos señalará cuál es la combinación óptima, aunque no la hayamos ensayado, o por lo menos nos indicará el camino para llegar a ella.

Las fracciones más utilizadas son los múltiplos de  $\frac{1}{2}$  para factoriales de dos niveles, basado en la utilización de matrices ortogonales, que nos permiten obtener matemáticamente la contribución independiente del efecto de cada uno de los factores. Un ejemplo de matriz ortogonal  $L_8(2^7)$  sería :

Experimento Número	Factores							Resultados Experimentales
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	$Y_1$
2	1	1	1	2	2	2	2	$Y_2$
3	1	2	2	1	1	2	2	$Y_3$
4	1	2	2	2	2	1	1	$Y_4$
5	2	1	2	1	2	1	2	$Y_5$
6	2	1	2	2	1	2	1	$Y_6$
7	2	2	1	1	2	2	1	$Y_7$
8	2	2	1	2	1	1	2	$Y_8$

Una matriz es ortogonal cuando cada columna tiene el mismo número de asignaciones a cada nivel.

Con un diseño fraccionado en base a matrices ortogonales, no estamos interesados en el resultado de una combinación determinada, sino en el cambio medio en la respuesta a lo largo de una serie de ensayos, lo cual nos permite hacer comparaciones entre los niveles de los factores bajo diferentes tipos de condiciones experimentales, con lo que se incrementa la seguridad de poder reproducir las conclusiones.

### Método Taguchi

Taguchi utiliza las matrices ortogonales con un propósito diferente del enfoque tradicional: evaluar el efecto de los niveles de los factores respecto a su robustez.

Para ello introduce los factores de ruido que pueden perturbar el buen funcionamiento del producto, y considera las iteraciones entre los factores - cuando el efecto de uno de los factores se ve afectado por el nivel al cual se fija el otro - como factores de ruido.

El problema entonces se reduce a la selección y asignación de la matriz más adecuada a nuestro experimento siguiendo las siguientes etapas:

- 1º Determinar los grados de libertad del experimento (que dependerá de los factores, los niveles y las iteraciones).
- 2º Construir la gráfica lineal (puntos y segmentos) requerida.
- 3º Seleccionar la gráfica lineal estándar.
- 4º Modificar la gráfica lineal seleccionada para ajustarla a nuestro experimento.
- 5º Asignar las columnas de nuestra matriz ortogonal.
- 6º Verificar la asignación utilizando la matriz triangular.
- 7º Realización y análisis de los experimentos realizados.

## 2.6.- Fiabilidad y Mantenibilidad

Según Deming la Calidad es “un grado predecible de uniformidad y fiabilidad a bajo coste y adecuado a las necesidades del mercado” con lo que la fiabilidad y mantenibilidad pueden ser consideradas como una extensión de la calidad operacional, o funcionalidad, a lo largo del tiempo.

Actualmente, la fiabilidad y la mantenibilidad están consideradas como un componente más de la calidad de un producto o sistema, por lo que el estudio de los problemas inherentes a la renovación de equipos industriales, a su eficacia y a la optimización del mantenimiento, debe ir más allá de considerar criterios basados exclusivamente en los costes de implantación, considerando también, los aspectos relacionados con la fiabilidad y mantenibilidad.

En todo caso este proceso de análisis, la fiabilidad pone el énfasis en la prevención de las causas de los fallos y la mantenibilidad, en cambio, impulsa los criterios relacionados con la minimización de los costes de sus efectos.

La fiabilidad es la probabilidad de que un producto o un sistema realice una función específica de forma satisfactoria para un periodo de tiempo cuando trabaja bajo unas condiciones de operación predeterminadas.

La mantenibilidad es la probabilidad de que un aparato en fallo sea restaurado completamente a su nivel operativo, dentro de un periodo de tiempo dado, cuando la acción de reparación se efectúa de acuerdo con los procedimientos establecidos.

**FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLO  $F(t)$ .** Es la probabilidad que la unidad de observación falle en una duración específica. También puede ser expresada como el porcentaje de un conjunto de base o población que falla, desde el inicio del esfuerzo hasta la duración  $t$ .

**FUNCIÓN DE FIABILIDAD  $R(t)$ .** Es la probabilidad de que la unidad de observación supere la duración  $t$  sin fallar. Es el complemento de la función de probabilidad de fallo  $R(t) = 1 - F(t)$

En base a  $F(t)$  y  $R(t)$  podemos definir la función de densidad de fallos  $f(t)$ , como la variación respecto a la característica de duración  $t$ , de la función de probabilidad de fallo

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Indica la distribución de los fallos en la característica de duración  $t$ . Es la parte del conjunto de base o población que en la siguiente unidad de tiempo,  $dt$ , falla

**TASA O CUOTA DE FALLO.** Es el cociente de la función de densidad de fallos  $f(t)$ , respecto a la parte del conjunto de base o población que sobrevive  $R(t)$  hasta el momento  $t$ .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

La cuota de fallos indica la probabilidad con la que una unidad de observación del remanente falla en la unidad de tiempo subsiguiente,  $dt$ . Indica qué porcentaje de unidades todavía no fallidas hasta la duración  $t$ , falla en el intervalo siguiente  $(t + dt)$ .

**TIEMPO MEDIO HASTA UN FALLO (MTTF).** Es la esperanza matemática del tiempo hasta que se produzca un fallo cuando el producto no puede ser reparado

$$E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad \text{donde } T \text{ es el tiempo de fallo.}$$

**TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS (MTBF).** Es la esperanza matemática de la duración calculada de un número de unidades de observación iguales, cuando alternativamente, en sistemas que son reparados continuamente después de que se producen fallos y que vuelven, después a ser utilizados.

**FIABILIDAD DE UN COMPONENTE.** Para cuantificar la fiabilidad de un componente colocar en un banco de pruebas el componente y ponerlo en funcionamiento hasta que falle, registrando el tiempo y repitiendo el proceso tantas veces como esté previsto.

La fiabilidad se mide mediante la Cuota de fallos  $\lambda$ , que es el número de fallos por unidad de tiempo  $\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ total de Fallos}}{\text{tiempo total acumulado}}$  pudiéndose expresar como fallos por hora o como porcentaje de fallos cada 1000 horas.

**FIABILIDAD DE UN SISTEMA.** Las instalaciones, los equipos y en general, los sistemas, están compuestos por elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos. La fiabilidad de estos conjuntos, es decir, la probabilidad de que no fallen, es el resultado de la acción combinada de la fiabilidad de sus elementos.

El análisis de la fiabilidad de un sistema se realiza descomponiendo en unidades operativas independientes, de manera que la probabilidad de que se produzca un fallo en una de ellas es un suceso causal y estadísticamente independiente de que se produzca en otra. Pudiéndose diferenciar entre sistemas en series y sistemas en paralelo.

**FUNCION DE MANTENIBILIDAD M(t).** Es la probabilidad de que la intervención de mantenimiento, en la unidad de observación, se lleve a cabo dentro de un tiempo t establecido.

Podemos definir también la función de densidad de los tiempos de mantenimiento,  $g(t)$ , cómo la variación respecto a la característica de duración t, de la función de mantenibilidad.

$$g(t) = \frac{dM(t)}{dt}$$

**TASAS DE MANTENIBILIDAD  $\mu(t)$ .** Es el cociente de la función de densidad de los tiempo de mantenimiento  $g(t)$ , respecto a la parte del conjunto de base o población que no va a poder

ser mantenido dentro del tiempo de duración t.  $\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$  Indica el porcentaje de unidades a mantener en la duración (t + dt), serán mantenidas correctamente en dicho intervalo.

### 3.- METODOLOGÍA

Los resultados del presente trabajo están basados en la elaboración de una encuesta, donde se trata de recoger el grado de conocimiento y de aplicación de cada una de las herramientas estadísticas descritas en el apartado anterior, agrupadas en los seis bloques expuestos. La selección de las empresas entre las que se ha realizado el sondeo se ha efectuado teniendo en cuenta lo siguiente:

- . Sector de actividad: empresas industriales, incluyendo todas las ramas de actividad.
- . Número de trabajadores: empresas con más de 25 empleados.
- . Ambito geográfico: provincia de Burgos.

Además de los aspectos citados, (relativos a técnicas estadísticas) el cuestionario incluyó otros aspectos referidos a la situación general de las empresas ante la calidad, a la existencia de un departamento de calidad, número de personas que lo integran, exigencias de aplicación de las técnicas estadísticas por clientes y proveedores, así como las necesidades de formación en este campo.

#### 4.- RESULTADOS DEL ESTUDIO EMPÍRICO

Antes de pasar al análisis pormenorizado de los resultados es conveniente señalar que el porcentaje de respuestas ha sido satisfactorio<sup>(1)</sup>, (un 40%), lo cual nos indica la relevancia otorgada a la mejora de la calidad dentro de la industria burgalesa. Así pues, nuestras conclusiones están basadas en la información proporcionada por los 54 cuestionarios recibidos, lo que implica una fiabilidad del 89,41%<sup>(2)</sup>

El primer aspecto que hemos constatado ha sido la existencia de un departamento de calidad en prácticamente la totalidad de las empresas que han respondido. El número de personas que integran este departamento presenta una gran variabilidad, dependiendo del tamaño y de la actividad de la empresa, por lo cual ofrecer un promedio de este dato no sería significativo. Cabe, sin embargo, mencionar que los sectores químico, de alimentación y de automoción cuentan con un mayor número de personas dedicadas a temas de calidad

SITUACIÓN DE LAS EMPRESAS ANTE LA CALIDAD

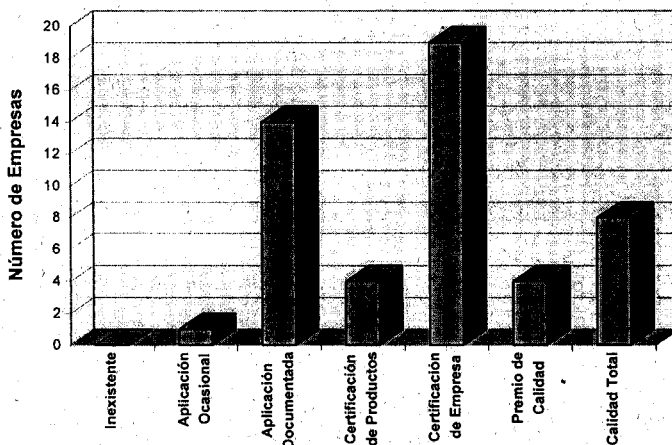


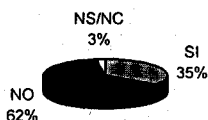
Gráfico 1. Situación de las empresas ante la calidad.

Dado que la mayoría de las empresas disponen de un departamento que se ocupa de estas cuestiones, se observa una fuerte propensión a la aplicación documentada de los sistemas de calidad. Así mismo, se aprecia una acusada tendencia hacia la certificación de empresa, y también, aunque en menor medida, a la implantación de sistemas de Calidad Total. El Gráfico 1 nos muestra la situación general de la industria burgalesa ante la calidad

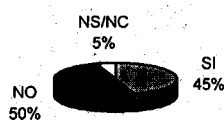
La mejora de la calidad como factor estratégico es un punto fundamental para conseguir una posición favorable en mercados cada vez más amplios e integrados. Muchas empresas se ven abocadas al cumplimiento de unos requisitos muy exigentes por parte de sus clientes, que garanticen unos estándares de calidad. En cuanto a la aplicación de técnicas estadísticas para la mejora de la calidad, solamente el 35% de las empresas estudiadas se ven sometidas a las

exigencias de sus clientes, mientras que el 45% de las mismas, plantean este requisito a sus proveedores:

**EXIGENCIAS DE CLIENTES**



**EXIGENCIAS A PROVEEDORES**



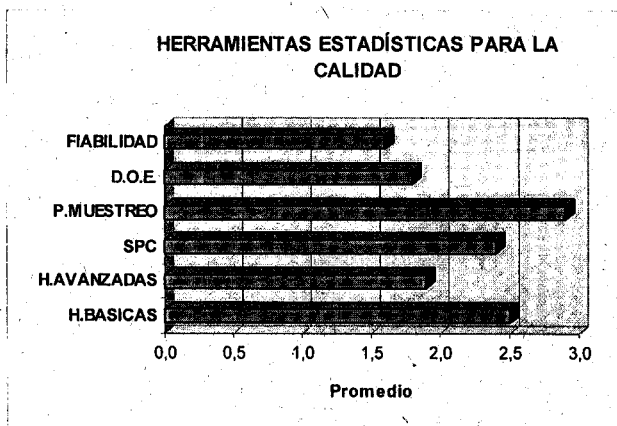
**Gráfico 2. Exigencias de Clientes y exigencias a proveedores.**

Consideramos oportuno señalar que hemos constatado la existencia de una cierta correlación entre las dos variables analizadas,<sup>(3)</sup> lo que nos induce a pensar que en determinadas actividades, la aplicación de sistemas de calidad se produce a lo largo de todas las fases de la cadena de valor. En nuestro caso, esta situación se ha observado en empresas de los sectores de automoción, químico, de maquinaria y de caucho y plástico. Del mismo modo, se han detectado algunos casos de empresas en las que no habiendo exigencias por parte de los clientes, se impone este requisito a sus proveedores. La razón estriba en que se trata de empresas cuya producción se destina a consumidores finales, y que pretenden obtener la Certificación de Empresa.

**Aplicación de técnicas estadísticas**

Una vez descrita la situación general de las empresas industriales burgalesas ante la calidad, pasamos a analizar el núcleo del estudio, que como ya hemos mencionado, consiste en descubrir el grado de conocimiento de las técnicas estadísticas para la calidad existentes y su nivel de aplicación dentro del ámbito seleccionado.

Continuando con el esquema planteado, hemos elaborado un indicador que expresa la importancia de cada uno de los seis grupos de herramientas estadísticas consideradas, cuyo resultado queda reflejado en el Gráfico 3:



**Gráfico 3. Herramientas estadísticas para la calidad.**

Como puede apreciarse, los planes de muestreo son el tipo de técnica más empleada, lo que implica que muchas empresas se encuentran todavía en un estadio poco avanzado de la

implantación de sistemas de mejora de la calidad. No debemos olvidar que la realización de inspecciones no genera realmente un incremento de la calidad de la producción ni un valor añadido, sino que supone un aumento de costes, que finalmente se repercute a los clientes por lo que es una práctica que tiende a reducirse en lo posible. De forma paralela y para compensar esta reducción, tiende a intensificarse la utilización del Control Estadístico de Proceso, mediante la utilización de los gráficos de control, que es de hecho, el pilar fundamental para introducir mejoras, pero todavía no está suficientemente implementado.

El segundo grupo de herramientas más utilizadas son las técnicas básicas, como cabe esperar de estos procedimientos que permiten de forma sencilla pero eficaz la representación, clasificación y análisis de datos, y la posterior detección de problemas y formulación de soluciones.

En cuanto a las herramientas avanzadas, parece un contrasentido el escaso nivel de aplicación que se observa dado que, tanto la realización de planes de muestreo como el Control Estadístico del Proceso, tienen su base teórica en su conocimiento.<sup>(4)</sup>

El Diseño de Experimentos es poco conocido y utilizado, destacando excepcionalmente la aplicación en el sector de la automoción. Respecto a las técnicas relacionadas con la Fiabilidad y Mantenibilidad, su aplicación se realiza de forma puntual, correspondiendo a algunas empresas grandes, con un fuerte grado de mecanización, muy significativas dentro de la industria de la provincia.

Después de este análisis general, y descendiendo a un estudio más pormenorizado, referido a herramientas concretas dentro de cada grupo, cabe señalar lo siguiente :

1. Entre las herramientas básicas, las más utilizadas son las destinadas a la ordenación y representación de datos (distribuciones de frecuencias, histogramas...)
2. Dentro de las técnicas avanzadas, destaca el conocimiento de las distribuciones binomial y normal, como base para realizar estimación de parámetros y tests de hipótesis sobre medias, varianzas y proporciones, y también, aunque en menor medida, el análisis de regresión.
3. En el Control Estadístico del Proceso (SPC) sobresale la elaboración de gráficos de control por variables (Gráficos  $(\bar{X}, R)$ ,  $(\bar{X}, S)$ ), así como los estudios previos para determinar la capacidad de máquinas y procesos.
4. En cuanto a la actividad de inspección, se observa un predominio de la inspección por muestreo, normalmente a través de un muestreo simple, fundamentalmente sobre el producto, realizándose sobre todo, inspecciones no destructivas. El Plan de Muestreo más utilizado corresponde al descrito por la norma UNE 66.020 (MIL-STD-105D, ISO 2.859), de inspección por atributos.
5. En estos dos últimos apartados relativos al Diseño de Experimentos y Fiabilidad y Mantenibilidad, tan sólo cabe reseñar la realización de diseños de varios factores.

Si analizamos el grado de utilización de las técnicas estadísticas según el tamaño de la empresa, comprobamos que, como cabía esperar, las empresas grandes (más de 250 empleados) presentan un nivel de aplicación por encima del promedio general. Atendiendo a los sectores productivos donde se encuadran las empresas, los resultados nos indican que el de productos metálicos y maquinaria, (concretamente la rama de automoción), y el de alimentación, presentan un promedio superior al general.

## 5.- CONCLUSIONES

- 1.- Un aspecto muy importante que debemos señalar es el alto nivel de sensibilización de las empresas en materias relacionadas con la calidad, aspecto que constatamos por la buena acogida que ha tenido la encuesta y el elevado porcentaje de respuesta obtenido.
- 2.- A través del contacto directo con las empresas se observa un gran desconocimiento de la denominación técnica de las herramientas estadísticas empleadas. Se ha comprobado, en aclaraciones directas sobre el cuestionario, que sí utilizan las herramientas pero desconocen su nombre.
- 3.- Todas las empresas que han respondido cuentan con departamento de calidad, siendo el número de personas pertenecientes al mismo muy variable, en función del número de empleados y el sector de actividad de la empresa. En cuanto a la situación en la que se encuentran las empresas ante la calidad, destaca la tendencia a la aplicación documentada de los sistemas de calidad, con una acusada propensión hacia la Certificación de Empresas.
- 4.- Dentro de los seis grupos de herramientas consideradas, son los planes de muestreo la técnica más empleada, seguida a continuación por las herramientas básicas y el SPC. Por otro lado, el diseño de experimentos es poco conocido, destacando su aplicación en el sector de automoción. Solamente algunas empresas grandes y fuertemente mecanizadas aplican técnicas de fiabilidad y mantenibilidad.
- 5.- De forma más específica, son las herramientas básicas destinadas a la ordenación, clasificación y representación de datos, las más utilizadas. Existe un conocimiento bastante generalizado de las distribuciones binomial y normal como base para la estimación, de parámetros y la realización de tests de hipótesis. Dentro del SPC, lo más sobresaliente es el uso de gráficos de control por variables, mientras que en la actividad de inspección, son más frecuentes los planes de muestreo por atributos.
- 6.- Finalmente, y teniendo en cuenta la opinión de las propias empresas colaboradoras, se ha detectado una necesidad de formación general en materias estadísticas aplicadas a la calidad, que es particularmente significativa en los temas de diseño de experimentos, fiabilidad y mantenibilidad.

## 6.- BIBLIOGRAFÍA

- GRANT, E.L. y LEAVENWORTH, R.S. : Control Estadístico de la Calidad. CECSA México 1988.
- GRUPO INI : Prontuario : Gestión de la Calidad. Dirección de comunicación Grupo INI. Madrid 1992.
- HANSEN, B.L.: Control de Calidad. Díaz de Santos S.A. Madrid 1989.
- ISHIKAWA, K. : Introducción al Control de Calidad. Díaz de Santos. Madrid, 1994.
- LAWSON, J. y OTROS : Estrategias experimentales para el mejoramiento de la calidad industrial. Iberoamericana. México D.F. 1992.
- LININGER, A.: La encuesta por muestreo: Teoría y práctica. CECSA. México 1985
- MONTGOMERY, D.C. : Introducción al Control Estadístico de la Calidad. Iberoamericana. México. 1991.
- POLA MASEDA, A.: Aplicación de la estadística al Control de Calidad. Marcombo. Barcelona 1988.
- VACHETTE, J.L.: Mejora continua de la calidad. : Control Estadístico de Procesos. CEAC Barcelona 1992.

### NOTAS REFERENCIALES

<sup>(1)</sup> Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las empresas que han colaborado con nosotros, contestando amablemente el cuestionario que les hemos remitido.

<sup>(2)</sup> El error de muestreo lo calculamos según la relación  $\sqrt{\frac{N_1 - n}{N - 1}} \sqrt{\frac{1}{n}}$ , con lo que la fiabilidad es el complementario a la unidad. Lininger, Charles A. (1985)

<sup>(3)</sup> Nos referimos a la correlación existente entre la exigencia de aplicación de técnicas estadísticas para la calidad por parte de los clientes y la exigencia que se plantea a los proveedores. El valor de la correlación es de 0'65.

<sup>(4)</sup> Hemos podido comprobar a través del contacto directo con las empresas que existe un desconocimiento generalizado de las denominaciones técnicas de algunas de estas herramientas, que, en realidad, si son empleadas, lo que ha dado lugar en ocasiones a algunos problemas de interpretación.