

Gráficos de control: Identificación de dificultades en alumnos de Ingeniería Industrial

Ferreri, Noemí M., Carnevali, Graciela H*, Doffo, Agustina, Lodi, Martín

*Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario. Pellegrini 250, Rosario.*

*nferreri@fceia.unr.edu.ar; carneval@fceia.unr.edu.ar;
agus.doffo@gmail.com; martinandreslodi@gmail.com*

RESUMEN

Los gráficos de control constituyen herramientas de gran utilidad para el control y la mejora de los procesos de producción o medición, ya que permiten vigilar al proceso en línea y determinar si este es estable o no, diferenciando la variabilidad propia o natural de la debida a causas asignables. Bien diseñados, orientan sobre la toma de acciones correctivas cuando el proceso está fuera de control y evitan ajustes innecesarios cuando en el proceso sólo actúan causas naturales. Estos gráficos son de sencilla aplicación pero se apoyan en conceptos estadísticos como variables aleatorias, estadísticos, distribuciones muestrales, riesgos, pruebas de hipótesis, etc. Los usuarios pueden desconocer muchos de estos conceptos, pero no quienes deban diseñarlos adecuadamente para que se conviertan en una herramienta eficaz. En los cursos de Estadística destinados a alumnos de Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional de Rosario, se desarrollan todos los conceptos estadísticos involucrados en los gráficos de control y se aplican a cuestiones relativas al diseño y uso adecuado de esta herramienta, que muy probablemente utilizarán en su futuro ejercicio profesional. Dada la importancia de adquirir esta habilidad por parte de los futuros ingenieros industriales, este trabajo se orienta a la detección de dificultades de los alumnos en ocasión de resolver un problema relativo a gráficos de control propuesto por la cátedra. Para el análisis de la resolución del problema por parte de los alumnos se aplican algunos indicadores diseñados en trabajos anteriores y otros nuevos, relativos a la comprensión de los principales conceptos estadísticos involucrados en los gráficos. El análisis del trabajo de los alumnos a partir de los indicadores propuestos permitirá reorientar el trabajo de los docentes así como la búsqueda y elaboración de nuevos materiales para ayudar a los alumnos a superar sus dificultades.

Palabras Claves: gráficos de control, dificultades, Ingeniería Industrial, enseñanza

Abstract

Control charts are useful tools for the control and improvement of production or measurement processes, as they make it possible to monitor the process in line and determine if it is stable or not, differentiating the natural variability of the variability due to assignable causes. If they are well designed, they indicate to take corrective actions when the process is out of control and prevent unnecessary settings when in the process only act natural causes. These graphics are easy to apply but are based on statistical concepts as random variables, statistical sample distributions, risks, hypothesis testing, etc. Users can ignore many of these concepts, but those who should design the control charts properly, can't. In the Statistics course for Industrial Engineering students, at the National University of Rosario, the statistical concepts involved in control charts are developed because the charts are a tool which the students most likely use in their future professional practice.

Given the importance of acquiring this ability on the part of future industrial engineers, this work is oriented to the detection of the difficulties of the students in the occasion of solving a problem related to the control charts proposed by the chair. For the analysis of the problem solving by the students, some indicators designed in previous and new ones are applied, concerning the understanding of the main statistical concepts involved in the graphs. The analysis of the work of the students based on the proposed indicators allows reorienting the work of the teachers as well as the search and the elaboration of new materials to help the students to overcome their difficulties.

Keywords: control charts, difficulties, Industrial Engineering, teaching

1. INTRODUCCIÓN

Los gráficos de control, junto con los estudios de capacidad de procesos y otras herramientas estadísticas (como el diseño de experimentos) se utilizan desde hace décadas con el propósito de controlar y reducir la variabilidad de procesos y productos.

Adecuadamente diseñados y aplicados, los gráficos de control constituyen un sistema permanente e inteligente que detecta precozmente la aparición de causas asignables de variabilidad y ayuda a identificar su origen, para luego eliminarlas, en el marco de la mejora continua de los procesos.

Dado que la gestión de la calidad de los procesos es una de las tareas que pertenece al ámbito de actuación de los Ingenieros Industriales [1], es importante profundizar todos los conceptos relativos al diseño y a la aplicación de los gráficos de control (junto con los índices de capacidad de procesos) en la formación de grado y favorecer su aplicación, junto con la de otras herramientas estadísticas, para desarrollar en los futuros profesionales las competencias requeridas.

En este trabajo se propone un problema que requiere la evaluación de la estabilidad y de la capacidad de un proceso y se busca detectar las dificultades de los alumnos en la resolución del mismo, con el objetivo principal de usar esa información para reformular las clases, los materiales de trabajo y las evaluaciones.

En la Sección 2 se presentan los principales conceptos asociados a los gráficos de control y en la Sección 3 se analizan las dificultades de los alumnos de Ingeniería Industrial en ocasión de resolver un problema relativo a esta temática, propuesto por la cátedra. En la Sección 4 se sustancian las principales conclusiones y recomendaciones.

2. GRAFICOS DE CONTROL. CONCEPTOS PRINCIPALES

2.1. Procesos Bajo Control

En todo proceso existe una gran variedad de factores o causas (materia prima, mano de obra, maquinaria, etc.) que influyen produciendo variabilidad. Si ese conjunto de causas se mantiene estable en el tiempo, el modelo que describe el comportamiento de las variables de interés en el proceso es el mismo. Se dice entonces que el proceso está "bajo control", es decir, que se trata de un proceso estable, predecible, como el que se observa en la Figura 1.

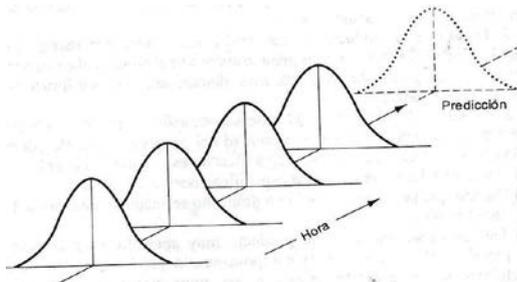


Figura 1 *Comportamiento de un proceso bajo control a través del tiempo.
Sólo actúan las causas naturales.
El modelo probabilístico para la variable en estudio es el mismo [2]*

Si en cambio aparecen causas especiales de variabilidad (causas asignables), no existe una única distribución para la variable de interés y el proceso sale de su estado de control, como se observa en la Figura 2.

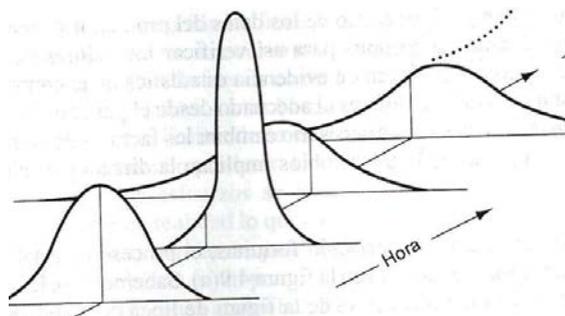


Figura 2 *Comportamiento de un proceso fuera de control a través del tiempo.
Actúan causas especiales o atribuibles.
El modelo para la variable en estudio varía a través del tiempo [2]*

En síntesis, en los procesos bajo control sólo están presentes las causas naturales, que actúan constantemente provocando una variabilidad previsible. En cambio, en los procesos fuera de control, además se presentan causas asignables, originadas por motivos concretos que generan un comportamiento irregular e imprevisible. Los efectos de las mismas perduran hasta que son eliminadas.

2.2. Los gráficos de control

Los gráficos de control constituyen la herramienta que se utiliza para vigilar al proceso en línea y determinar si este es estable o no, diferenciando la variabilidad propia o natural del proceso de la debida a causas asignables. Permiten tomar acciones correctivas en el proceso cuando este está fuera de control e incluso orientan dichas acciones, si han sido convenientemente diseñados. A su vez, evitan ajustes innecesarios cuando en el proceso sólo actúan causas naturales.

Además de determinar si un proceso es estable en el tiempo, los gráficos de control permiten estimar los parámetros del proceso para luego evaluar su capacidad y guían las acciones correctivas, en caso que el proceso se encuentre fuera de control. En síntesis, permiten mejorar la calidad del proceso, a largo plazo, colaborando en la detección y eliminación de las causas asignables [3].

2.2.1. Conceptos básicos de los gráficos de control

En los gráficos de control se representa el comportamiento de alguna medida de resumen o estadístico, a través del tiempo. Esta medida está asociada a algún parámetro de interés del proceso.

En el eje horizontal se grafica el tiempo. Se trazan además tres líneas paralelas al eje horizontal: la línea central en la que se ubica el valor promedio de la medida de resumen que se va a graficar (o también un valor objetivo o de referencia) y los límites inferior y superior de control, que se ubican a cierta distancia de la línea central. Estos límites se obtienen de tal manera que la gran mayoría de puntos caiga dentro de ellos si el proceso está bajo control.

En el eje vertical se grafica la medida de resumen o estadístico, que puede ser el promedio, una proporción de artículos defectuosos, la cantidad de defectos, etc. Cada punto que se señala en el gráfico, es el valor de dicha medida, calculada a partir de una muestra o subgrupo. Los puntos generalmente se unen para facilitar la interpretación visual. Todos los elementos de un gráfico de control se muestran en la Figura 3.

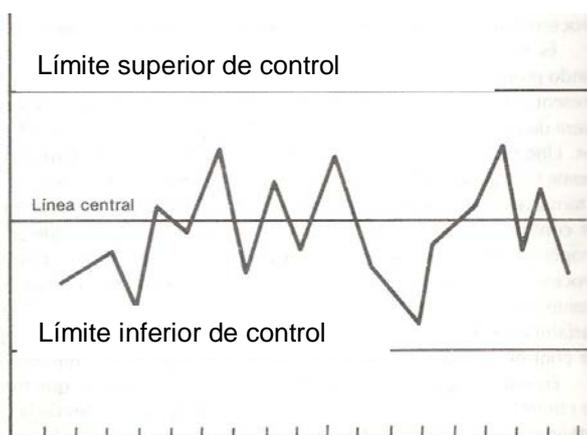


Figura 3. Elementos de un gráfico de control [4]

Los gráficos indican que un proceso está fuera de control cuando un punto cae fuera de los límites o bien cuando se observa cualquier comportamiento no aleatorio en una sucesión o corrida de puntos (patrón no aleatorio, como por ejemplo, una tendencia creciente).

2.2.2 Elección del tipo de gráfico

Para el proceso que se va a controlar, es necesario definir las variables y los parámetros de interés, así como los estadísticos correspondientes. Estos últimos son los que dan el nombre al gráfico de control que se va a utilizar.

En el caso de una única variable cuantitativa cuya distribución de probabilidad sea aproximadamente simétrica, la media y la desviación estándar son los parámetros adecuados y la elección del estadístico (es decir, del tipo de gráfico) depende del tamaño de la muestra. Se

cuenta con el gráfico de mediciones individuales y rangos móviles ($n = 1$), de promedios y rangos ($n > 1$, pero pequeño) y de promedios y desvíos (n grande). Cada uno de los gráficos mencionados es, en realidad una pareja de gráficos que es importante analizar conjuntamente por dos razones: la primera, porque para una variable cuantitativa no sólo interesa que el promedio de la distribución esté estabilizado, sino también su variancia y la segunda, porque los límites del gráfico asociado al parámetro μ , dependen del valor del estadístico asociado al parámetro σ^2 , de modo que si la variabilidad está fuera de control, los primeros límites no son válidos.

En el caso de variables cualitativas los parámetros pueden ser la proporción de artículos defectuosos o el número promedio de defectos. Se cuenta con el gráfico p (fracción de defectuosos) y con los gráficos c y u, asociados al número promedio de defectos en la muestra.

Existen gráficos para otros parámetros como, por ejemplo, la mediana y gráficos multivariados.

2.2.3 Gráficos de Fase I y Fase II

Cuando no se conoce nada sobre el proceso es necesario obtener datos del mismo para evaluar el comportamiento de la característica de interés y encontrar posibles valores para los parámetros. Para ello se puede llevar a cabo un estudio especial o bien se pueden ir tomando muestras a través del tiempo. En este último caso, se busca observar en primer lugar si el proceso se mantiene estable (bajo control) y luego estimar los parámetros. Generalmente se define un tamaño y una frecuencia de muestreo y se toman 25/30 muestras preliminares; en cada una se calcula la medida de interés y se obtiene el valor de la línea central promediando esos 25/30 valores. Con esa información se trazan los límites preliminares y si se observa que el proceso es estable, estos se consideran "definitivos". En este caso se habla de gráficos de Fase I.

Si, en cambio, se parte de parámetros conocidos, para evaluar si el proceso se mantiene estable cada vez que se señala un punto en el gráfico se lleva a cabo una prueba de hipótesis para el parámetro de interés. En este caso se habla de gráficos de Fase II.

2.2.4 El diseño y la evaluación del comportamiento de los gráficos de control

Dado que se trabaja con información muestral, cuando se toman decisiones sobre el proceso a partir de los gráficos de control pueden cometerse dos tipos de errores:

- el *error de tipo 1*, que consiste en rechazar H_0 , cuando esta es cierta. En este contexto, consiste en concluir que el proceso está fuera de control, cuando no es así. Se trata de una falsa alarma.
- el *error de tipo 2*, que consiste en no rechazar H_0 , cuando esta es falsa. En este contexto, consiste en concluir que el proceso está bajo control, cuando no es así. Se trata de una alarma que no suena.

Para cada uno de estos errores, se encuentran sus probabilidades (o riesgos) α y β . La probabilidad de cometer error tipo 1 (α) es la que se fija al determinar los límites de control. Si se fija α en 0,0027, el valor z asociado es 3 y se habla de "gráficos de control de amplitud 3σ " o "gráficos 3σ ".

En relación a estos riesgos, se define la "longitud de corrida promedio" (LCP), un indicador muy importante para el diseño y la evaluación del comportamiento de un gráfico de control. Este indica la cantidad de puntos que deben marcarse en promedio hasta que uno caiga fuera de los límites. En la Tabla 1 se presentan los valores de este indicador en función de los riesgos α y β . La ventaja de LCP es que puede pensarse en términos de cuántas muestras se pretende que deban tomarse antes de que suene la alarma, y esto, combinado con la frecuencia de muestreo, puede traducirse en tiempos, lo cual resulta más concreto para el usuario.

Tabla 1 Valor de LCP en función de los riesgos α y β

Situación del proceso	Valor de LCP
Bajo control	$1/\alpha$
Fuera de control	$1/(1 - \beta)$

Para un tamaño de muestra y una frecuencia de muestreo fijos, si aumenta el valor del riesgo α , disminuye el valor del riesgo β y se acortan los tiempos necesarios para detectar que el proceso salió de control; pero también se reducen los tiempos para que "suenen las falsas alarmas". Sólo aumentando el tamaño de la muestra y fijado un valor apropiado para α , se reduce β y mejora la performance del gráfico en cuanto a que detecta más rápidamente una salida del estado de control.

Para diseñar adecuadamente el gráfico apropiado entonces, es necesario definir el tiempo promedio deseado para detectar un cambio de cierta magnitud en el parámetro de interés (que deberá ser un valor bajo) y también el tiempo promedio deseado para que ocurra una falsa alarma (que deberá ser un valor alto) y fijar en correspondencia el valor de LCP y de frecuencia de

muestreo, así como el tamaño de las muestras y los riesgos asociados. Otro elemento importante en el diseño del gráfico lo constituyen los subgrupos racionales.

2.3 Control versus capacidad

Que un proceso bajo control no implica que sea capaz de producir dentro de especificaciones, pero se requiere de la estabilidad para evaluar su capacidad.

Es decir, primeramente se debe trabajar con gráficos de control y herramientas fuera de línea (diseño de experimentos, análisis de regresión, etc.) hasta lograr que el proceso muestre estar dentro de control estadístico. Sólo en ese momento se podrá evaluar su capacidad entendida como la habilidad de producir dentro de lo requerido. Para ello, es importante elegir correctamente el o los indicadores de capacidad a utilizar. Entre los más utilizados, C_p y C_{pk} (válidos sólo si la variable de interés está normalmente distribuida) deben obtenerse e interpretarse conjuntamente ya que el primero sólo mide capacidad en relación a la variabilidad y el segundo mide capacidad en relación tanto al centrado como a la variabilidad pero no puede separar ambas dimensiones.

3. IDENTIFICACION DE LAS DIFICULTADES DE LOS ALUMNOS EN RELACION A LOS GRAFICOS DE CONTROL

3.1 El problema propuesto a los alumnos

A continuación se transcribe literalmente el problema propuesto a los alumnos para su resolución individual. Los gráficos de control que se les brindaron para que ellos analicen el proceso de interés se presentan en la Figura 4.

En un proceso de manufactura se miden las presiones de rotura del alambre metálico en muestras de tamaño 5 tomadas en 25 días consecutivos. Para analizar si el proceso está bajo control se construyeron los siguientes gráficos 3σ con un programa, al que se le indicó que marque cualquier tipo de patrón no aleatorio que ocurriera.

a) Explique qué significa que el proceso se encuentra bajo control. Analice los gráficos e informe en este caso qué ocurre. Justifique la respuesta.

b) ¿Por qué es necesario analizar el gráfico de R junto con el de \bar{x} ?

c) ¿Utilizaría Ud. los datos proporcionados por estas 25 muestras para estimar los parámetros de la presión de rotura? Justifique la respuesta, y en caso de ser afirmativa, estime puntualmente los parámetros del proceso.

d) Suponga que las especificaciones establecen que la presión de rotura, que puede considerarse una variable con distribución normal, debe estar entre 55 y 65 unidades. Un analista observa los límites de control del primer gráfico y concluye que el proceso es capaz de cumplir las especificaciones.

¿Está de acuerdo con la conclusión del analista? En caso contrario realice el análisis correspondiente.

e) El día 26 se tomó otra muestra de tamaño 5, obteniéndose un promedio de 58 unidades y un rango de 7,5. Realice los tests de hipótesis correspondientes, por 5 pasos, detallando cada uno de los pasos que lleve a cabo.

f) En la empresa preocupa que la presión promedio de rotura aumente a 62 unidades.

f-1) Obtenga el riesgo de no detectar este aumento.

f-2) Si este riesgo debe disminuirse, ¿qué opciones tiene? Mencíonelas.

g) Alguien afirma que si se utilizan gráficos de amplitud 2σ en vez de 3σ , se reduce el tiempo promedio requerido para observar un punto fuera de los límites de control, por lo cual el gráfico presenta un mejor desempeño. ¿Qué opina de esta afirmación? Explique claramente.

h) Indique si las siguientes afirmaciones son verdaderas o no. Justifique su respuesta.

h-1) Para un proceso estable, $C_p = 2$. Entonces, el proceso resulta **siempre** capaz de cumplir con las especificaciones.

h-2) LCP es **siempre** función del riesgo de error tipo I (α)

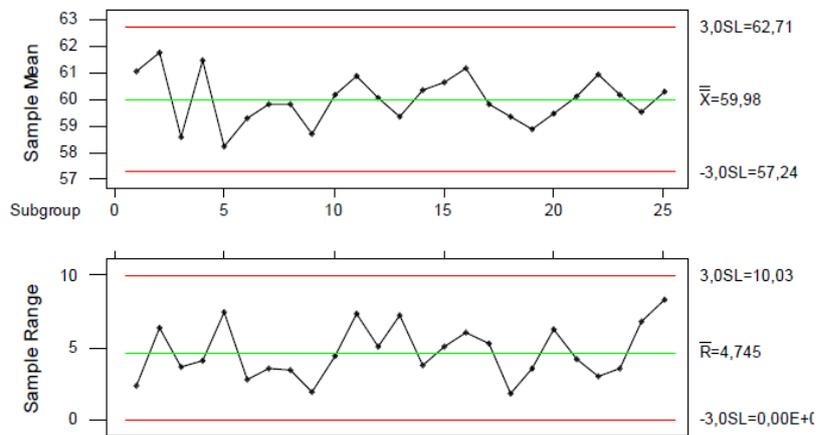


Figura 4. Gráficos de control obtenidos para el proceso de producción de alambres

3.2 El análisis del problema propuesto. Indicadores asociados

El estudio de la estabilidad de un proceso a través de gráficos de control se lleva a cabo en el marco de un estudio más amplio que tiene como objetivo general el análisis de la capacidad. Es decir que el problema a resolver es saber si un proceso determinado es capaz de cumplir con ciertas especificaciones; pero, como se muestra en la Figura 5, antes de evaluar la capacidad, se debe determinar su estabilidad y si alguna de estas propiedades no se cumple, se deben aplicar otras herramientas como análisis de regresión, diseño de experimentos, etc. para obtener información que oriente las modificaciones que deben realizarse en el proceso.

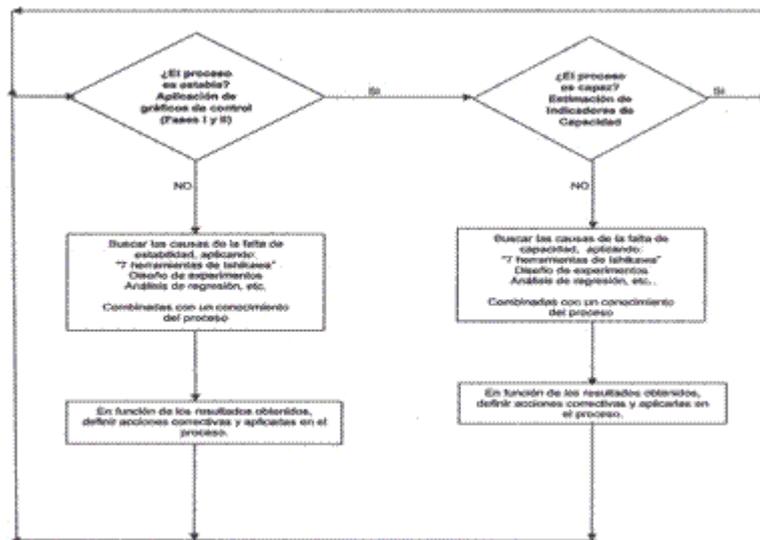


Figura 5. Los análisis que deben llevarse a cabo para determinar si un proceso es capaz [5]

En este problema se presenta un proceso de producción de alambre donde la característica de interés es la presión de rotura (cuantitativa continua y con distribución normal). Con el objetivo general de analizar la capacidad de este proceso para cumplir con ciertas especificaciones dadas, se comienza por el análisis de su estabilidad: se llevan gráficos \bar{X} -R de amplitud 3σ y se presentan los gráficos obtenidos a partir de las primeras 25 muestras de tamaño 5 (Fase I). De estas se advierte que el proceso está bajo control, por lo cual se pueden estimar los parámetros característicos de la distribución de la presión de rotura, y evaluar su capacidad para cumplir con las especificaciones dadas.

Luego, conociendo los parámetros se entra en Fase II por lo que cada vez que se marca un punto en el gráfico se lleva a cabo una prueba de hipótesis.

Como en todo problema de naturaleza estadística, para su resolución deben transitarse las etapas del Ciclo PPDAC (Planteo del Problema, Planificación del Estudio Estadístico, Recolección de los Datos, Análisis de los Datos y Conclusiones) [6]; pero en este caso, todas las cuestiones relativas

a las etapas de planteo, planificación y recolección de los datos ya fueron resueltas, tanto para el estudio de la estabilidad como para el estudio de la capacidad. Los alumnos sólo debían analizar los datos y obtener conclusiones (A su vez, como el proceso es estable y capaz, no hace falta llevar a cabo ninguna acción correctiva que requiera de un estudio estadístico previo).

Es decir que, al diseñar el problema, se aplicaron indicadores para evaluar las dificultades en las etapas de Análisis de Datos y de Conclusiones; aunque también se evaluaron algunos conceptos teóricos ya que, subyacente al buen uso del ciclo PPDAC, está la comprensión conceptual de todos los conceptos involucrados [6]. En la Tabla 2 se mencionan los indicadores utilizados en el diseño del problema propuesto

Tabla 2 *Indicadores utilizados en el diseño del problema propuesto a los alumnos*

Relativos a la etapa de "Análisis de los Datos"	<ul style="list-style-type: none"> - Uso apropiado de los gráficos para determinar la estabilidad del proceso - Uso apropiado de la información de los gráficos para la estimación de los parámetros del proceso - Obtención correcta de los indicadores de capacidad
Relativos a la etapa de "Conclusiones"	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboración de conclusiones correctas sobre la estabilidad del proceso - Elaboración de conclusiones correctas sobre la capacidad del proceso
Relativos a los conceptos teóricos subyacentes	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de las diferentes propiedades de un proceso bajo control - Identificación de las razones por las cuales los gráficos de promedios y rangos se deben analizar conjuntamente - Mención de la relación entre LCP, riesgo α y riesgo β - Mención de la diferencia entre límites de control y límites naturales - Mención de las limitaciones del indicador C_p

3.3 Las dificultades de los alumnos en la resolución del problema propuesto

El problema propuesto fue resuelto, de manera individual, por 85 alumnos de Ingeniería Industrial, que cursaban la asignatura "Decisiones Estadísticas y Control de la Calidad" durante el primer cuatrimestre del año 2016. Las respuestas de los alumnos se analizaron exhaustivamente, con el objeto de identificar las dificultades presentadas. En la Tabla 3 se analizan las respuestas sobre diferentes conceptos asociados a los gráficos de control; mientras que en la Tabla 4 se analiza la resolución del problema planteado sobre el proceso de producción de alambres.

Del análisis de varios conceptos asociados a los gráficos de control (Tabla 3), puede concluirse que:

El 70 % de los alumnos pudo definir adecuadamente qué se entiende por un "proceso bajo control", indicando propiedades o características del mismo (estabilidad, predecibilidad, etc.). El error cometido por casi el 30 % de los alumnos fue considerar que un proceso bajo control es aquel para el cual todos los puntos caen dentro de los límites de los gráficos, confundiendo el concepto en sí con la forma de evaluarlo.

El 13 % de los alumnos señaló las dos razones por las cuales se deben analizar conjuntamente el gráfico de promedios y el de rangos. Los restantes sólo dieron una sola de las razones, inclinándose mayoritariamente por la primera (el proceso estará estabilizado si tanto el centrado como la variabilidad lo están).

En relación a evaluar la performance del gráfico de control, a través de LCP, más del 95 % de los alumnos respondió adecuadamente que esta medida puede ser función tanto del riesgo α como del riesgo β , según el proceso se encuentre bajo control o no (la relación entre LCP y los riesgos se muestra en la Tabla 1). Sólo el 2 % de los alumnos asoció a esta medida con la frecuencia de muestreo únicamente.

¿Qué ocurre entonces con el valor de LCP cuando el riesgo α aumenta? El 60 % de los alumnos respondió correctamente que el riesgo β disminuye y entonces se reduce el tiempo para detectar un cambio en el proceso; pero también se reduce el tiempo para que "suene una falsa alarma".

Tabla 3 *Respuestas relativas a diferentes conceptos asociados a los gráficos de control*

Conceptos evaluados	N° de alumnos que respondieron correctamente	N° de alumnos que respondieron incorrectamente	N° de alumnos que no respondieron
¿Qué es un proceso bajo control? (pregunta a)	59 (69,41 %)	25 (29,41 %)	1 (1,18 %)
¿Por qué se deben analizar conjuntamente el gráfico de promedios y el de rangos? (pregunta b)	11 (12,94 %)	70 (82,35 %)	4 (4,71 %)
Sobre la performance del gráfico..			
La longitud de corrida promedio, ¿es función del riesgo α ? (pregunta h-2)	82 (96,47 %)	2 (2,35 %)	1 (1,18 %)
¿Qué pasa si aumenta α ? (por ejemplo, si se pasa de un gráfico de 3σ a un gráfico de 2σ) (pregunta g)	51 (60,00 %)	30 (35,29 %)	4 (4,71 %)
¿Cómo hacer para disminuir β ? (pregunta f-2)	41 (48,24 %)	42 (49,41 %)	2 (2,35 %)
¿Se pueden comparar los límites de control con los límites naturales para analizar la capacidad de un proceso? (pregunta d)	70 (82,35 %)	11 (12,94 %)	4 (4,71 %)
¿Qué indica un valor de $C_p=2$? (pregunta h-1)	76 (89,41 %)	9 (10,59 %)	--

El resto de los alumnos no comprendió la relación entre LCP y los riesgos ya que respondió que solo uno de los tiempos se reducía.

¿Cómo hacer para que el riesgo β disminuya? El 48 % de los alumnos mencionó que además de aumentar α (con las consecuencias negativas mencionadas recién), se podía aumentar el tamaño de la muestra (opción más conveniente). El resto pensó en una sola de las alternativas y consideró erróneamente modificar la frecuencia de muestreo, que cambia el valor de LCP pero no el del riesgo β .

Para evaluar la capacidad de un proceso estabilizado, más del 80 % de los alumnos reconoció que no es posible comparar los límites naturales con los de control (aunque de estos, un pequeño porcentaje no supo justificar el porqué). Los que respondieron equivocadamente, mezclaron los conceptos de variable, estadístico y parámetro (usándolos indistintamente).

En el caso del indicador de capacidad C_p , casi el 90 % de los alumnos respondió que ese solo valor no alcanzaba para concluir que un proceso era capaz; pero el resto pensó erróneamente que sí.

Del análisis del proceso de producción de alambres (Tabla 4), puede concluirse que:

A partir del gráfico construido con 25 muestras preliminares (Fase I), más del 90 % de los alumnos concluyeron acertadamente que el proceso estaba bajo control ya que no se observaron puntos fuera de los límites ni corridas. Los alumnos que no llegaron a esta conclusión analizaron incorrectamente los patrones aleatorios.

Por estar el proceso bajo control, prácticamente los mismos alumnos respondieron acertadamente que los datos de las 25 muestras preliminares podían utilizarse para estimar los parámetros del proceso. Entre los que no respondieron correctamente, algunos señalaron que no se verificaba la normalidad (hecho que no se podía evaluar de la simple lectura del gráfico) o que sólo por haber tomado muchas muestras preliminares ya se podían estimar los parámetros (sin tener en cuenta la estabilidad).

Tabla 4 Evaluación de la estabilidad y la capacidad del proceso de producción de alambres

El proceso de producción de alambres...	N° de alumnos que respondieron correctamente	N° de alumnos que respondieron incorrectamente	N° de alumnos que no respondieron
Fase I			
¿El proceso está bajo control? (Pregunta a)	79 (92,94 %)	2 (2,36 %)	4 (4,71 %)
¿Se pueden utilizar esas 25 muestras para estimar los parámetros del proceso? (Pregunta b)	78 (91,76 %)	3 (3,53 %)	4 (4,71 %)
¿Cuánto valen esas estimaciones? (Pregunta b)	59 (69,41 %)	22 (25,88 %)	4 (4,71 %)
Fase II			
¿Cuáles son las hipótesis nula y alternativa que se ponen en juego al llevar los gráficos de control de promedios y rangos? ¿Qué decisión se debe tomar sobre ellas a partir de la información de la muestra n° 26? (preguntas e-1 y e-2)	16 (18,82 %)	43 (50,59 %)	26 (30,59 %)
¿Cuánto vale el riesgo β ? (pregunta f-1)	43 (50,59 %)	35 (41,18 %)	7 (8,23 %)
¿El proceso, resulta capaz de cumplir con las especificaciones? (pregunta d)	67 (78,82 %)	17 (20,00 %)	1 (1,18 %)

A la hora de estimar los parámetros, aproximadamente el 70 % de los alumnos lo hizo adecuadamente. En el resto, los errores observados fueron: buscar el valor de la tabla en función de la cantidad de muestras y no del tamaño muestral (11 casos), usar el rango medio como estimador del desvío estándar (7 casos) o confundir desvío estándar de la variable con desvío estándar de la media (4 casos).

En este punto cabe señalar que, independientemente de haber llegado a estimaciones correctas o incorrectas, 50 de los 85 alumnos (58,82 %) no utilizó adecuadamente la simbología.

Con el proceso estabilizado y los parámetros estimados (Fase II), los límites de control obtenidos pueden considerarse “definitivos”, por lo que cada vez que se marque un nuevo punto se estará llevando a cabo una prueba de hipótesis.

En general, sólo 16 alumnos (18,8 %) plantearon correctamente las hipótesis tanto sobre la media como sobre la variancia y pudieron llevar adelante todos los pasos con la información muestral, de la manera en que se llevan a cabo en los gráficos de control. El 50 % de los alumnos no lograron llevar adelante todas las etapas de las pruebas de hipótesis o bien, las llevaron a cabo sin tener en cuenta la información que daban los gráficos de control. En este punto, más del 30 % no pudo responder a las consignas propuestas.

En relación al cálculo del riesgo β asociado a la prueba de hipótesis para la media del proceso, el 50 % lo hizo correctamente. Entre los errores cometidos por los restantes, se pueden mencionar: usar el desvío estándar en vez del desvío estándar de la media muestral (12,9 %), confundir los límites naturales con los de control (10,6 %), usar un valor incorrecto para la desviación estándar (8,2 %), calcular la potencia (4,7 %), calcular el nivel de significación (3,5 %). Cabe aclarar en este caso que un mismo alumno podía cometer más de un error.

Con el proceso bajo control, se puede analizar su capacidad. Casi el 80 % lo hizo correctamente evaluando no sólo Cp sino Cpk. El resto cometió errores al obtener esos indicadores o bien, hizo un análisis incompleto (calculó sólo Cp o calculó los límites naturales sin compararlos con los de especificaciones).

Cabe aclarar que todos los porcentajes que se mencionan en los párrafos anteriores son aproximados. Los valores exactos se presentan en las Tablas 3 y 4.

4. CONCLUSIONES

Los análisis de estabilidad y de capacidad constituyen herramientas de gran utilidad para el control y la mejora de los procesos de producción o de medición; por lo que la correcta articulación de gráficos de control (Fase I y Fase II), junto con indicadores de capacidad y con otras herramientas estadísticas es una competencia deseable para los futuros ingenieros industriales.

En este trabajo se analizó un problema en el cual interesaba evaluar la estabilidad y la capacidad de un proceso de producción de alambres. El mismo se tomó en ocasión de un parcial sobre los temas mencionados y en él se consideraron indicadores relativos a las etapas de “Análisis de los Datos” y de “Conclusiones”; así como indicadores relativos a cuestiones conceptuales. En las clases, en las cuales se dispone de más tiempo, se trabaja en un marco más amplio y se consideran indicadores de todas las etapas del ciclo PPDAC.

En relación al análisis del proceso en sí, las mayores dificultades se presentaron en ocasión de identificar a los gráficos de control (Fase II) como pruebas de hipótesis. En relación a las cuestiones conceptuales, las dificultades se presentaron más frecuentemente en la evaluación de la performance del gráfico (riesgos, LCP) y al análisis conjunto de los gráficos de promedios y rangos.

La identificación de las dificultades es de utilidad en la labor de los docentes, ya que permite reorientar el trabajo en las clases y la elaboración de materiales de trabajo, en el marco de una mejora continua del proceso de enseñanza.

5. REFERENCIAS

- [1] Morán, Rogelio. (2006). *El perfil de la Ingeniería Industrial*. Conferencia desarrollada para alumnos de Ingeniería Industrial. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina
- [2] Besterfield, Dale. (1995). *Control de Calidad*. Cuarta Edición. Prentice Hall Hispanoamericana. México.
- [3] Carnevali, Graciela y Ferreri, Noemí (2016). *Gráficos de Control e Indicadores de Capacidad de Procesos*. Tercera Edición. Material de Cátedra “Decisiones Estadísticas y Control de Calidad” Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario
- [4] Montgomery, Douglas. (1991) *Introducción al Control Estadístico de la Calidad*. Primera Edición. Grupo Editorial Iberoamérica. México.
- [5] Ferreri, Noemí y Carnevali, Graciela (2015) “Evaluación de la capacidad de un proceso: Desarrollo del pensamiento estadístico: una experiencia con alumnos de Ingeniería Industrial”. *XLIII Coloquio de la Sociedad Argentina de Estadística*. Buenos Aires, Argentina
- [6] Carnevali, Graciela; Ferreri, Noemí y Fernández de Luco, Marina (2008) “Desarrollo del pensamiento estadístico: una experiencia con alumnos de Ingeniería Industrial”. *XIV EMCI Nacional y VI EMCI Internacional*. Mendoza, Argentina.