

EL ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO: SU ABORDAJE CON ALUMNOS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Área temática: La Educación en la Ingeniería Industrial

Ferreri, Noemí M.^{*}, Carnevali, Graciela H.^{*}

*Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario.
Pellegrini 250, Rosario. nferreri@fceia.unr.edu.ar*

RESUMEN

El análisis de la capacidad para cumplir con ciertas especificaciones constituye una herramienta de gran utilidad para el control y la mejora de los procesos de producción o medición. Para llevarlo a cabo, no alcanza con calcular algún indicador como Cp o Cpk. En primer lugar se requiere que el proceso sea estable, lo cual se evalúa aplicando gráficos de control. Si estos señalan que el proceso está estabilizado, entonces se estiman los valores del índice de capacidad correspondiente. Si el proceso no está estabilizado o no resulta capaz, deben llevarse a cabo estudios estadísticos que, combinados con el conocimiento ingenieril del proceso, ayudan a encontrar y corregir las causas de los problemas. Luego, se vuelve a evaluar su estabilidad y su capacidad, cerrando un ciclo que puede denominarse "ciclo de análisis de la capacidad".

La Estadística aporta tanto el pensamiento como los métodos que se integran en todo ese ciclo y constituye por ello una disciplina fundamental. El abordaje de este tema en los cursos de Estadística destinados a alumnos de Ingeniería Industrial adquiere doble importancia: permite integrar todos los conocimientos desarrollados en el curso y aplicarlos en la resolución de un problema al que muy probablemente se enfrentarán en su ejercicio profesional. Para llevarlo a cabo se propone a los alumnos, organizados en grupos, un problema en el que se considera un proceso de producción de barras metálicas, las cuales deben cumplir ciertas especificaciones en relación a su longitud. Cada grupo recibe un conjunto diferente de datos y realiza los análisis correspondientes.

En este trabajo se describe el problema propuesto y el trabajo con los alumnos y se muestra cómo las diferentes herramientas estadísticas se van integrando en la evaluación de la capacidad, destacando la importancia tanto del pensamiento como de los métodos estadísticos en la industria.

Palabras Claves: capacidad de proceso, pensamiento estadístico, métodos estadísticos, enseñanza, Ingeniería Industrial

ABSTRACT

The analysis of the ability to meet certain specifications is a very useful tool for the control and improvement of production or measurement processes. To carry it out, calculating an indicator like Cp or Cpk it's not enough. First it is required that the process is stable, which is assessed using control charts. If the graphics indicate that the process is stable, then the value of the corresponding capability index can be estimated. If the process is not stabilized or it's not capable to meet the specifications, statistical studies must be carried out, combined with process knowledge, to find and correct problem causes. Then its stability and capability must be evaluated again, closing a cycle that can be called "process capability analysis cycle".

Statistics provides both thinking and methods which are integrated throughout this cycle and is therefore a fundamental discipline. The approach to this issue in statistics courses aimed at Industrial Engineering students assumes double importance: allows them to integrate all the knowledge developed in the course and apply it in the resolution of a problem that they will likely face in their professional practice. To carry it out, the students, organized in groups, receive a problem where a production process of metal bars, which must meet certain specifications relative to its length, is considered. Each group also receives a different set of data and makes the corresponding analysis. This paper describes the proposed problem and the work with the students and shows how the different statistical tools are integrated in the assessment of process capability and the importance of both statistical thinking and methods in industry.

1. INTRODUCCION

El estudio de la capacidad de un proceso, junto con el análisis de su estabilidad y otras herramientas estadísticas se utilizan con el propósito de controlar y reducir la variabilidad de procesos y productos, mejorando así su calidad. El objetivo del análisis de la estabilidad es detectar la presencia de causas asignables de variación, logrando que en él sólo operen las causas comunes. Para ello cuenta con los gráficos de control que, adecuadamente diseñados y aplicados, constituyen un sistema permanente e inteligente que detecta precozmente la aparición de causas asignables de variabilidad y ayuda a identificar su origen con el fin de eliminarlas.

Lograr que en un proceso sólo operen las causas comunes de variación, es decir, que se encuentre bajo control estadístico, no constituye el último objetivo de un programa de calidad, ya que un proceso bajo control no necesariamente es capaz de satisfacer los requerimientos del cliente o las especificaciones de producción. Se debe contrastar la variabilidad del proceso con la pretendida según las especificaciones, a través de índices de capacidad.

La falta de estabilidad o de capacidad da lugar a la aplicación de otras herramientas estadísticas con el objetivo de identificar los factores que las provocan para actuar sobre ellos.

El estudio de la capacidad de un proceso se articula entonces con los gráficos de control y con la aplicación de otras herramientas, formando parte de una estrategia para la mejora continua [1]. La forma en que se da esta articulación puede presentarse a través del “ciclo de análisis de la capacidad”, el cual se desarrolla en la siguiente sección. Subyacente al ciclo, está el pensamiento estadístico, que es la filosofía que precede la aplicación de cualquiera de las herramientas estadísticas.

Llevado a un curso de Estadística para futuros Ingenieros Industriales, el análisis de la capacidad de un proceso permite a los alumnos aplicar de manera integrada las distintas herramientas estadísticas aprendidas e ir desarrollando el pensamiento estadístico, competencia fundamental para su futuro desempeño profesional [2]. De ahí su importancia y la necesidad de abordarlo durante la formación universitaria.

En este trabajo se propone hacerlo a través de problemas para que los alumnos resuelvan y discutan grupalmente y, a modo de ejemplo, se describe un problema propuesto para el trabajo con los estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Rosario, durante el primer cuatrimestre del año 2015. En la tercera sección se presentan los contenidos necesarios para llevar adelante el análisis de la capacidad de un proceso, se describe el caso y el trabajo con los alumnos durante 2015 y se muestra cómo las diferentes herramientas estadísticas se van integrando en la evaluación de la capacidad, destacando la importancia tanto del pensamiento como de los métodos estadísticos en la industria.

2. EL CICLO DE ANALISIS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO

En la práctica, siempre existen variaciones en las entradas de un proceso y en consecuencia también existen variaciones en las salidas o productos. Las variaciones se deben al efecto de un sistema de causas o factores. Si este sistema se mantiene estable a través del tiempo se trata de causas comunes de variabilidad; en caso contrario, se trata de causas esporádicas. El trabajo que deba hacerse en el proceso para reducir el efecto de los distintos factores o eliminarlos depende de si son de uno u otro tipo, y, por lo tanto las herramientas estadísticas que deben aplicarse en primer lugar deben indicar si el proceso es estable o no [3]. Estas herramientas son los gráficos de control, que buscan detectar la presencia de causas esporádicas de variabilidad y, bien diseñados, pueden orientar sobre acciones correctivas. Si estos indican que el proceso está estabilizado o bajo control estadístico, entonces se utilizan los indicadores de capacidad que constituyen la herramienta que permite evaluar si el proceso puede cumplir con las especificaciones para alguna/s característica/s de interés. Los gráficos de control y los indicadores de capacidad son herramientas “en línea”, ya que se aplican a medida que el proceso se va desarrollando.

Si el proceso no es estable o no es capaz, existe una gran variedad de herramientas estadísticas fuera de la línea (diseño de experimentos, análisis de regresión, etc) para descubrir las causas de los problemas y orientar su solución. Las herramientas en línea y fuera de la línea se articulan en lo que se puede llamar el “ciclo de la capacidad del proceso” (CC), que se esquematiza en la Figura 1.

Como se observa en dicha figura, el monitoreo del proceso con gráficos de control cumple un importante papel para comprender el comportamiento del mismo y de su variabilidad a través del tiempo y constituye la base para el análisis de la capacidad. Los gráficos dan pie a un estudio fuera de la línea cuando señalan que el proceso no está estabilizado. Una vez que se detectan y corrigen las causas del problema, se vuelven a aplicar con el objetivo de evaluar si las mejoras en el proceso han dado el resultado buscado y si es así, si el proceso mejorado se mantiene estable en el tiempo [4]. Los indicadores de capacidad también dan pie a estudios fuera de la línea cuando indican que el proceso no es capaz.

Como un proceso es un concepto dinámico, este ciclo se replica permanentemente.

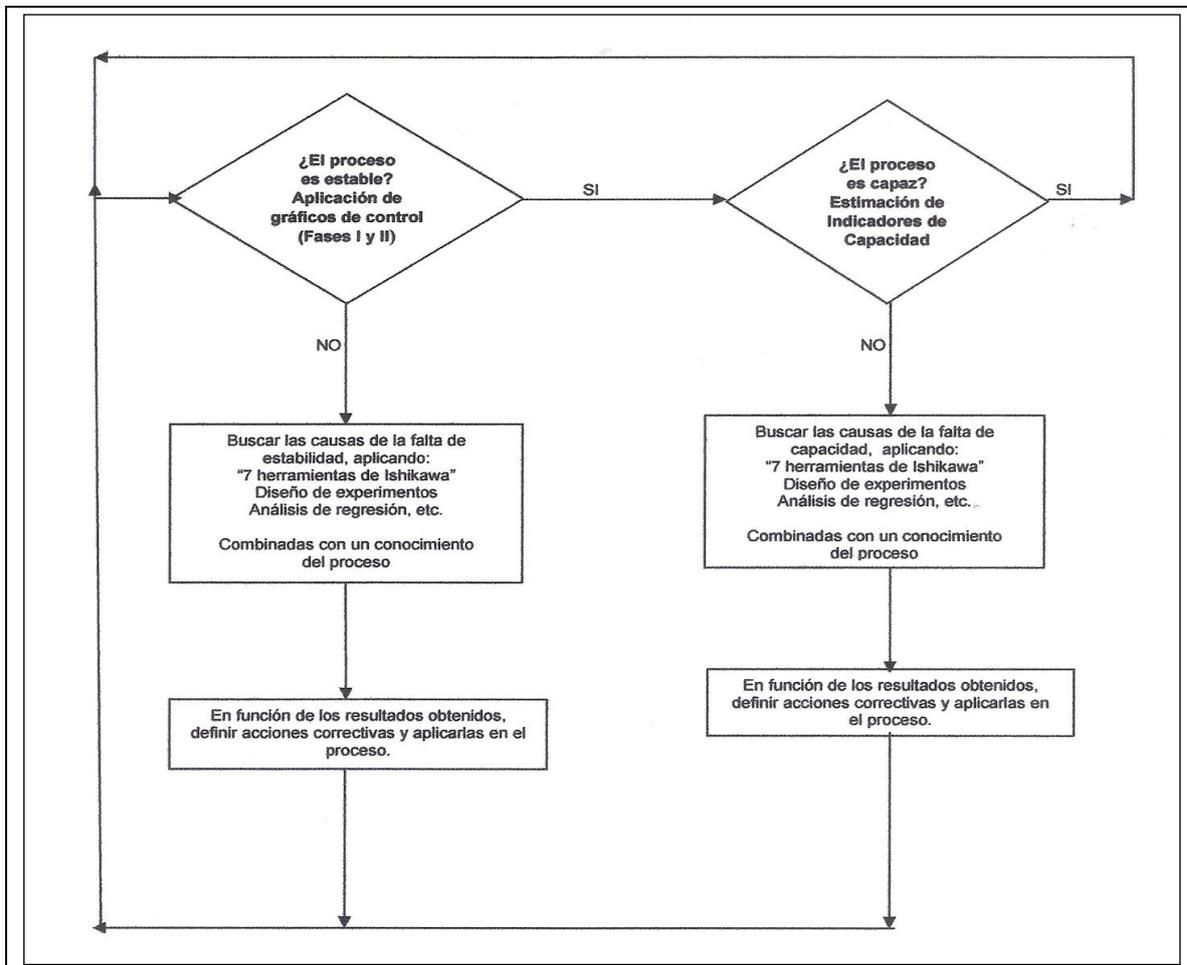


Figura 1 El "ciclo de la capacidad de un proceso" (CC)

3. EL ABORDAJE DEL ANALISIS DE LA CAPACIDAD EN UN CURSO PARA ALUMNOS DE INGENIERIA INDUSTRIAL

Abordar el análisis de la capacidad de un proceso en un curso de Estadística para futuros Ingenieros Industriales supone en primer lugar que los alumnos conozcan un conjunto de herramientas estadísticas, las cuales, se apoyan en principios de la disciplina (Sección 3.1). Este conocimiento es muy importante pero no resulta suficiente. La clave está en que puedan contar con instancias en las cuales integrar esos conocimientos en ocasión de resolver problemas concretos (Sección 3.2). Uno de esos problemas, propuesto en el primer cuatrimestre de 2015 a los alumnos de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, es un ejemplo de ello (Sección 3.3).

3.1. Contenidos requeridos para el análisis de la capacidad del proceso

Para que los alumnos puedan llevar a cabo el análisis de la capacidad de un proceso, deben conocer como mínimo algunas herramientas estadísticas de nivel básico e intermedio [5], las cuales se presentan en la Tabla 1, junto con los principales conceptos asociados.

Los gráficos de control se utilizan para el análisis de la estabilidad del proceso. En la primera fase, se recolectan datos del proceso, tomados con cierta periodicidad, para evaluar su comportamiento, detectar valores atípicos, postular un modelo para la variable en estudio, estimar sus parámetros y definir el tipo de gráfico y el esquema de muestreo que se utilizará en la siguiente fase [6]. En esta se busca detectar desvíos respecto del modelo asumido en la primera y el concepto subyacente es el de prueba de hipótesis con todos los elementos asociados (hipótesis, estadístico de prueba, regla de decisión, riesgos asociados, etc.).

Los indicadores C_p , C_{pk} y otros se aplican para el análisis de la capacidad del proceso. Es importante que los alumnos conozcan qué mide cada uno de ellos y en qué casos se aplican [7]. Asociados a este tema están los conceptos de distribuciones de probabilidad, medidas de centrado y de variabilidad y también todo lo relativo a la estimación por intervalo de confianza, puesto que los indicadores de capacidad siempre se estiman a partir de información muestral.

Cuando el proceso no es estable o no es capaz, se pueden aplicar una gran variedad de herramientas estadísticas. Básicamente, los alumnos deben conocer las 7 herramientas de Ishikawa [5], ideas básicas del diseño de experimentos, análisis de regresión lineal y pruebas de hipótesis para dos o más poblaciones.

Tabla 1. Herramientas estadísticas aplicadas en el ciclo de análisis de la capacidad (CC) y conceptos asociados.

	Herramientas estadísticas	Conceptos estadísticos asociados
Análisis de estabilidad del proceso	Gráficos de control Fase I	Análisis descriptivo de las observaciones obtenidas en la etapa preliminar Detección de valores atípicos Propuesta de un modelo probabilístico para la variable de interés. Prueba de bondad de ajuste. Definición del tipo de gráfico. Estimación de los parámetros del modelo elegido.
	Gráficos de control Fase II	Pruebas de hipótesis sobre parámetros Estadístico de prueba Errores tipo I y tipo II. Riesgos α y β . Valores críticos o límites de control. LCP, frecuencia de muestreo Relación entre los riesgos y el tamaño de la muestra.
Análisis de capacidad del proceso	Indicadores de capacidad	Diferentes índices de capacidad: qué miden, en qué casos se aplican Distribuciones de probabilidad. Variabilidad muestra a muestra. Necesidad de informar sobre la precisión de las estimaciones puntuales: Estimación por intervalo de confianza. Relación entre el tamaño de la muestra, el nivel de confianza y la precisión de los intervalos obtenidos.
Estudios orientados a la detección y solución de los problemas asociados a la falta de estabilidad o a la falta de capacidad	Análisis de datos. Estudios de una única población. Estudios comparativos de dos o más poblaciones.	Análisis descriptivo de los datos obtenidos. Las 7 herramientas de Ishikawa. (*) Pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para parámetros de una única población. Pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para la comparación de dos o más poblaciones. Análisis de regresión. Diseño de experimentos.

(*) De las 7 herramientas se excluyen los gráficos de control, ya considerados en el análisis de la estabilidad del proceso.

3.2. El ciclo de la capacidad de proceso: una propuesta para la integración

En la Sección 3.1 se presentaron algunos de los contenidos necesarios para analizar la capacidad de un proceso. Sin embargo, no alcanza con que los alumnos los conozcan y puedan aplicar cada uno de ellos adecuadamente. Se requiere su articulación en pos de la solución de problemas concretos. De ahí la importancia de que en los cursos de Estadística destinados a futuros ingenieros industriales, los alumnos tengan la posibilidad de resolver diferentes problemas y enfrentarse a una variedad de situaciones que se pueden dar en la práctica profesional.

Frente al problema de evaluar si un determinado proceso es capaz en relación a ciertas especificaciones ya definidas, comienza a rodar CC. Se articulan gráficos de control (Fase I y Fase II), con indicadores de capacidad y con otras herramientas estadísticas si se detectan problemas. Previo a llevar adelante el ciclo, deben responderse varias preguntas: “¿cuál es la población bajo estudio?”, “¿cuál o cuáles son las variables que interesa estudiar del proceso en cuestión?”, “¿qué especificaciones deben cumplir estas variables?”. Es decir, se debe hacer un correcto planteo del problema y luego planificar adecuadamente cada uno de los análisis que se llevarán a cabo (estabilidad, capacidad, otros) seleccionando las herramientas estadísticas apropiadas en cada caso. Muchas otras cuestiones deben definirse en esta etapa, como, por ejemplo, la manera en que se medirá/n la/s variable/s de interés. De hecho para cada una de las herramientas que se

apliquen existen requerimientos y cuestiones específicas que deben definirse oportunamente. Luego, al aplicar cada herramienta se obtienen datos del proceso en estudio, que deben ser analizados convenientemente para obtener conclusiones. Con el conocimiento “ingenieril” del proceso, esas conclusiones estadísticas adquieren sentido y guían las acciones a seguir. La palabra clave es la “integración” ya que los alumnos conocen las diferentes herramientas del ciclo pero raramente tienen ocasiones de aplicarlas articuladamente. Justamente, el análisis de la capacidad es una ocasión para ello.

Ahora bien, ¿qué características deben tener los problemas que se propondrán a los alumnos?

Es deseable que en los problemas propuestos los alumnos se enfrenten a una diversidad de situaciones. En primer lugar, entonces, deben tener frente a ellos procesos estables y no estables, capaces y no capaces. Pero también hay otras cuestiones a considerar en el diseño de los problemas: las variables de interés pueden ser de distinto tipo (cualitativas, cuantitativas discretas o continuas) y los tamaños de las muestras tomadas con cierta periodicidad pueden variar de un problema a otro (mediciones individuales, muestras pequeñas, muestras grandes). También es deseable que varíen las distribuciones de probabilidad asociadas a las variables en estudio, de modo que no siempre sean aplicables los gráficos e índices relativos a la distribución normal. Naturalmente, la variedad de situaciones que se presenten, dependen de los contenidos desarrollados en los cursos de Estadística.

La posibilidad de estar frente a diferentes escenarios favorece una actitud crítica de los alumnos en relación a la posibilidad de aplicación de las herramientas estadísticas.

¿De dónde pueden obtenerse los problemas para trabajar con los alumnos?

Cualquier problema de los que se encuentran en los libros de texto de Estadística para Ingeniería, en el cual interese analizar si un cierto proceso es capaz, es útil. La tarea del docente es simular diferentes conjuntos de datos asociados a ese problema, según los criterios que se mencionan en el párrafo anterior. Sería muy útil también que los alumnos pudieran buscar procesos reales en los cuales llevar adelante el ciclo de análisis de la capacidad; pero eso no es siempre posible y de serlo, demanda mucho más tiempo.

¿Cómo debería trabajarse en relación a los problemas propuestos?

En principio, es deseable que los alumnos lo hagan preferiblemente en grupos, para favorecer la discusión y el pensamiento crítico; que puedan trabajar fuera del horario de clase en la resolución del problema propuesto y que se disponga del horario de clase para la presentación de la misma y la discusión. Dado que los problemas recibidos por los grupos estarían asociados a diferentes situaciones en relación a estabilidad y a capacidad, surgirían diferentes alternativas de análisis en cada uno.

El rol de los docentes es fundamental, ya que pueden favorecer la articulación del ciclo formulando preguntas como, por ejemplo, ¿qué pasaría si el proceso no fuera estable?, ¿qué pasos deberían seguirse?, ¿qué herramientas deberían aplicarse ahora para averiguar por qué el proceso no es capaz (estable)?, ¿por qué se aplicó tal tipo de gráfico y no otro?, ¿qué requerimientos deberían verificarse para aplicar tal técnica?, etc.

En síntesis, es importante que los mismos alumnos construyan el ciclo de la capacidad en ocasión de la resolución de los problemas y que discutan diferentes ideas para resolverlos, No es bueno que ellos copien un esquema de trabajo (como el presentado en la Figura 1) sin haberlo experimentado. La resolución de problemas en grupo, la discusión con sus pares y con los docentes, y el trabajo de estos formulando las preguntas que faciliten la integración son la base de esta propuesta.

3.3. La experiencia llevada a cabo con alumnos de Ingeniería Industrial

En el caso de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, de la Universidad Nacional de Rosario, Estadística se desarrolla en dos cursos cuatrimestrales de Estadística, de 7 horas semanales cada uno, a cargo del mismo grupo de docentes. En el primer curso, que se dicta en el segundo cuatrimestre del tercer año de la carrera, los contenidos básicos comprenden estadística descriptiva en una y dos variables, probabilidad y distribuciones de variables aleatorias (con los modelos más usuales), distribuciones muestrales y estimación de parámetros. En el segundo curso, que se dicta en el cuatrimestre siguiente, los contenidos básicos comprenden pruebas de hipótesis, gráficos de control e índices de capacidad de procesos, análisis de regresión lineal, comparación de dos o más poblaciones y nociones de diseño de experimentos.

La experiencia que se presenta en este trabajo se desarrolla hacia el final del segundo curso, cuando los alumnos ya han visto todos los temas mencionados.

Para todos los alumnos se propuso un problema en el cual debían evaluar si el proceso de producción era capaz de cumplir con las especificaciones fijadas. Se consideró la producción de barras metálicas, las cuales deben cumplir ciertas especificaciones en relación a su longitud. El texto del problema, adaptado de [8], es el siguiente:

“Una empresa produce barras metálicas para un cierto cliente. En el proceso de producción de las barras es importante controlar la longitud, la cual debe cumplir las especificaciones 4,95 cm. +/- 0,03 cm. Si la longitud es menor a la mínima permitida (menos de 4,92 centímetros) la barra debe desecharse. Si es mayor a la máxima deseada (4,98 centímetros o más), la barra resulta inadecuada pero puede reprocesarse en forma manual, lo cual requiere de una inspección 100% de las barras y da como resultado un aumento en el costo de los artículos.

En las últimas semanas se observó un aumento en el porcentaje de desechos y reprocesos. En un principio, se intentó resolver el problema pidiéndole al sector “Mantenimiento” que hiciera algunos ajustes en las máquinas; pero los problemas continuaron y se decidió comenzar a recolectar información sobre el proceso, la cual se acompaña en el archivo adjunto”

Si bien el planteo del problema era el mismo, cada grupo recibió un conjunto de datos diferente, consistente en 50/60 muestras de n barras cada una, tomadas a través del tiempo con cierta periodicidad. Los datos representaban diferentes situaciones del proceso en relación a su estabilidad y a su capacidad.

Los tamaños de muestra de cada grupo eran diferentes, para que pudieran aplicar diferentes tipos de gráficos (de mediciones individuales, de promedios y rangos o de promedios y desviación estándar, de proporciones) a la hora de evaluar la estabilidad del proceso.

En todos los casos, la variable en estudio podía considerarse normalmente distribuida ya que, en los cursos sólo se desarrollan los gráficos de control y los índices de capacidad basados en dicha distribución.

Los grupos dispusieron de un tiempo, fuera del horario de clase, para analizar los datos recibidos y luego se pautaron clases donde se iban discutiendo las distintas etapas de la resolución del problema planteado, las herramientas estadísticas elegidas y el uso adecuado de las mismas. Finalmente cada grupo elaboró un informe escrito con la resolución y sus conclusiones y los resultados finales de cada grupo se expusieron en una última clase en la cual se llevó a cabo una discusión general.

El resultado de esas clases fue la articulación de los distintos contenidos para cada caso. Los alumnos, con la guía de los docentes pudieron construir el ciclo, cuyo esquema se mostró en la Figura 1. Los grupos manifestaron que no tenían claro cómo era la articulación de las diferentes herramientas hasta que tuvieron que resolver el problema propuesto.

4. CONCLUSIONES

Cuando se piensa en la capacidad de un proceso la pregunta última a responder es “¿El proceso tal y como funciona actualmente es capaz de cumplir con las especificaciones fijadas?”. Pero para dar respuesta a esa pregunta deben responderse otras: “¿el proceso es estable?”, “si no lo es, ¿qué factores provocan la falta de estabilidad?”, “¿qué factores provocan la falta de capacidad?”. Los análisis que se derivan de responder a estas preguntas se articulan a través del “ciclo de análisis de la capacidad”. Una gran variedad de herramientas estadísticas, sumadas al conocimiento del proceso, pueden aplicarse en este ciclo pero no alcanza con que los alumnos conozcan a cada una por separado. Deben poder articularlas de diferente manera según lo que el problema requiera. La resolución de este tipo de problemas concretos, aplicados a un área propia de la especialidad, como lo es el análisis de la capacidad de procesos para futuros ingenieros industriales; sumada a la puesta en común y discusión de las resoluciones, favorece la articulación de las herramientas y el desarrollo del pensamiento estadístico.

En este trabajo se destaca también la importancia del rol docente como facilitador de esta integración de conocimientos. En primer lugar, al proponer problemas de este tipo para el trabajo de los alumnos; luego, al disponer de tiempo en las clases para la discusión y por último al orientar a los alumnos con sus preguntas y observaciones.

Sin dudas, abordar el análisis de la capacidad aporta más que la simple aplicación de un conjunto de herramientas y es una propuesta de utilidad en la formación de los futuros ingenieros industriales.

5. REFERENCIAS

[1] Brännström-Stenberg, A. y Deleryd, M (1999). “Implementation of statistical process control and process capability studies: requirements or free will?”. *Total Quality Management*, 10, 439-446.

- [2] Krishnamoorthi, K. S. (2010). "Statistical thinking for engineers. What, Why and How?". 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM). Xiamen, China
- [3] Prat Bartés, A. y otros (2006). *Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad*. Barcelona, 1ra.edición. Ediciones UPC. España
- [4] Woodall, W. y Montgomery, D. (2014). "Some current directions in the Theory and Application of Statistical Process Monitoring". *Journal of Quality Technology*, 46 (1), 78-94.
- [5] Ishikawa, K. (1997). *¿Qué es el Control Total de la Calidad? La modalidad japonesa*. Bogotá, 1ra.edición. Grupo Editorial Norma, Colombia
- [6] Jones-Farmer, L. A. y otros (2014). "An overview of Phase I Analysis for Process Improvement and Monitoring". *Journal of Quality Technology*, 46 (3), 265-280.
- [7] Pearn, W. L. y Kotz, Samuel (2006). *Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices, A comprehensive exposition of Quality Control Measures*. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics. Vol 12. World Scientific, Singapur.
- [8] Evans, J. y Lindsay, W. (2008) *Administración y Control de la Calidad*. 7ma.edición. Cengage Learning Editores, México