

DISEÑO ROBUSTO PARA EL MEJORAMIENTO CONTINUO DE LA CALIDAD

Federico Picado*

***E**l diseño robusto ha sido aplicado con éxito en las etapas iniciales del diseño de productos y procesos con el fin de reducir variabilidad transmitida que se manifiesta en las etapas de manufactura y uso final del producto perjudicando la productividad y calidad. En este artículo, se discuten los métodos actuales —conjuntamente con técnicas del diseño experimental— aplicados al mejoramiento continuo de la calidad. Se ejemplifica su aplicación con un caso real de diseño robusto de un proceso industrial.*

INTRODUCCION

Todos los procesos productivos generan algún tipo de información la cual debe ser analizada e interpretada para luego tomar alguna decisión al respecto. Este conjunto de datos, por lo general, cambia con el tiempo. Las modificaciones que se producen en el tiempo se conocen como **variabilidad**. Cuando usted tiene en sus manos un conjunto de datos de este tipo, usted tiene un **problema estadístico**, esté de acuerdo o no. Muchas decisiones son tomadas erróneamente porque no se utilizaron los adecuados métodos de análisis.

La variabilidad en el control de la calidad en los sistemas de producción es el enemigo que hay que vencer. En los procesos industriales, controlar la variabilidad es más difícil que controlar el valor promedio y ésta puede ser la causa de altos costos de manufactura y de problemas de calidad.

La variabilidad debe ser minimizada a toda costa si es que se desea obtener un buen sistema de control de calidad. Sin embargo, algunos métodos de detección de cambios en la variabilidad son aplicados en los lugares equivocados, cuando las raíces del problema están en otro lugar.

En la mayoría de nuestras industrias, los esfuerzos en control de calidad han estado fuertemente centrados en "resolver problemas" en la etapa de manufactura, con muy poca atención en el otro lado del espectro que es el diseño del producto y el diseño del proceso. Es allí precisamente donde los conceptos de diseño robusto encuentran su valiosa aplicación.

Antes de proceder a describir con más detalle el concepto de diseño robusto, es bueno analizar el por qué del problema mencionado anteriormente.

MODELO DE CONTROL DEL PRODUCTO

El modelo tradicional de control de calidad en nuestras industrias es el modelo de control de producto, en el que las salidas de los procesos —tales como material procesado, ensambles, producto semi-elaborado o producto final—, son sometidas a algún método de inspección, procedimiento que usualmente es llevado a cabo por el departamento de control de

* Departamento de Producción Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En los procesos industriales, controlar la variabilidad es más difícil que controlar el valor promedio y ésta puede ser la causa de altos costos de manufactura y de problemas de calidad.

calidad. El producto defectuoso es retenido, ya sea para ser reprocesado o para ser desechado.

Aunque este sistema podría mantener los procesos subsiguientes libres de defectos, el costo de este modelo es muy elevado. Además, este sistema nunca llegará a detectar ni a corregir los orígenes del material o producto defectuoso, los cuales permanecerán activos en el sistema. Es importante destacar que bajo este modelo, la calidad y productividad no van de la mano. Al existir elevada inspección, unido a material o producto retenido para ser reprocesado, la productividad en la empresa bajará. Es claro, que esta práctica de control de calidad debe ser superada.

MODELO DE CONTROL DEL PROCESO

Este modelo se basa en el concepto de **mejoramiento continuo** del proceso y lleva el concepto de calidad a las primeras etapas de diseño del producto. El modelo de control del proceso es dirigido a la identificación y eliminación de las causas de los problemas que generan material defectuoso. Su objetivo principal es la **prevención** de producto defectuoso y no la retención del mismo.

La posición competitiva de la empresa puede aumentar cuando las causas de los problemas son identificadas y se toman las acciones apropiadas en el diseño del producto, del proceso y en la manufactura. DeVor (1992) señala que únicamente, bajo este modelo, la calidad y productividad de la empresa aumentarán.

Por otra parte, Kackar (1985) define dos métodos de control de calidad, a saber.

Control de calidad en-línea

Estas son las actividades del control de calidad concentradas básicamente en

las etapas de manufactura, su objetivo principal es el de mantener el proceso en control estadístico y detectar imperfecciones en el producto. Entre estas técnicas encontramos los gráficos de control (variables y atributos), diagramas de causa y efecto, diagramas de Pareto, diagramas de dispersión, histogramas, gráficos de flujo del proceso, estratificación de datos.

Control de calidad fuera-de-línea

Estas son las actividades de control de calidad y costos, aplicadas en las etapas de diseño del producto y diseño del proceso. Los objetivos principales de este tipo de método son mejorar la manufacturabilidad y confiabilidad del producto y reducir los costos de desarrollo del producto. Entre estos métodos podemos mencionar: revisiones del diseño, análisis de sensibilidad, ensayos de prototipos, ensayos acelerados del producto, simulación, estudios de confiabilidad, técnica QFD (Quality Function Deployment), técnica Benchmarking, diseño robusto, aplicación de técnicas del diseño de experimentos. Sin embargo, estos métodos no han sido bien desarrollados ni aplicados en la mayoría de nuestras industrias como lo han sido los métodos de control de calidad en-línea. Precisamente, uno de los fundamentos del éxito de las industrias japonesas con productos de alta calidad en ámbito mundial ha sido el énfasis en la aplicación de métodos de control de calidad fuera de línea.

DISEÑO DEL PRODUCTO

Una gran cantidad de problemas que se presentan usualmente en las etapas de manufactura podrían ser solucionados si se da una adecuada atención en las etapas iniciales de desarrollo del producto. El objetivo de los métodos de mejoramiento

La variabilidad debe ser minimizada a toda costa si es que se desea obtener un buen sistema de control de calidad.

del diseño del producto, es hacer que el rendimiento del producto sea insensible a variables ambientales, deterioro del producto e imperfecciones en la manufactura. En esta etapa se deben tener muy bien definidas las necesidades o requerimientos del consumidor con respecto al producto. Una vez determinado el grado de satisfacción en relación con una característica del producto, se debe definir el estado ideal o valor meta desde el punto de vista del consumidor. Entre menor sea la **variabilidad** con respecto al valor meta, mayor será la calidad.

METODOS TAGUCHI

El objetivo principal de los métodos de Taguchi es la reducción de la variabilidad como medio para mejorar la calidad. Algunas de las ventajas de los métodos Taguchi son las siguientes:

- Diseño de productos y procesos que sean robustos a condiciones ambientales.
- Diseño y desarrollo de productos que sean robustos a variaciones en los componentes, lo cual reducirá las variaciones en los sistemas de producción.
- Minimización de la variación alrededor de un valor meta (media).
- Uso de función de pérdida como medio para determinar el impacto económico de la variación.
- Uso de indicadores de la razón de ruido (S/N) para evaluar el rendimiento del producto o proceso.

Taguchi (1989 y 1990) considera tres etapas en el diseño de ingeniería de un producto o proceso:

- 1- **Diseño del sistema:** los principios científicos y de ingeniería son usados para determinar la configuración

básica con base en las necesidades del consumidor.

- 2- **Diseño de parámetros:** los valores específicos nominales del producto o proceso son determinados para minimizar la variabilidad transmitida de factores no-controlables o de ruido. Esta etapa se conoce como **diseño robusto**.
- 3- **Diseño de tolerancias:** en esta etapa se determinan las mejores tolerancias para los parámetros específicos del producto o proceso. La técnica de función de pérdida de la calidad se emplea en esta etapa.

Los métodos de Taguchi han sido utilizados en las industrias automovilística y electrónica. Estos métodos hacen énfasis en el uso de diseño experimentales, básicamente los arreglos ortogonales. Entre los diseños más comunes encontramos: cuadrados latinos, cuadrados greco-latinos, cuadrados hiper-greco-latinos, experimentos factoriales 2^k , experimentos factoriales fraccionarios 2^{k-p} , experimentos factoriales 3^k . Un ejemplo del uso de las técnicas Taguchi puede ser encontrado en Shina (1990).

Desventajas de los métodos Taguchi

Algunos autores como Hunter (1985) y Montgomery (1990) resaltan los aportes de los métodos Taguchi pero también indican los puntos débiles que los diseños experimentales sugeridos por Taguchi pueden presentar. Entre ellos podemos citar:

- 1- Cuando el modelo matemático de los factores del producto o proceso es conocido y bien estudiado, los métodos Taguchi son muy efectivos para mejorar el producto o proceso. Sin embargo, cuando el modelo no es conocido o no ha sido bien

En la mayoría de nuestras industrias, los esfuerzos en control de calidad han estado fuertemente centrados en "resolver problemas" en la etapa de manufactura, con muy poca atención en el otro lado del espectro que es el diseño del producto y el diseño del proceso.

- desarrollado, es mejor hacer uso de experimentos estadísticamente diseñados conjuntamente con técnicas adecuadas de análisis.
- 2- En general, los diseños de Taguchi son de Resolución III, esto significa que algunos efectos o factores principales están confundidos con interacciones de dos o más factores. Esta es una característica de la familia de diseños de los cuadrados latinos, donde se supone que no existe interacción entre los factores. Muchas veces, es importante determinar y analizar las interacciones (interdependencias) entre dos factores. Se recomienda utilizar diseños de Resolución IV o más, los cuales permiten analizar efectos principales sin confundir interacciones de dos factores, especialmente en las etapas iniciales de diseño de un producto o proceso.
 - 3- Los indicadores de la razón de ruido son ineficientes para identificar efectos de dispersión.
 - 4- Algunos diseños de Taguchi requieren un número alto de ensayos. Se deben buscar métodos más simples, efectivos, y fáciles de aplicar y aprender. Se deben usar diseños experimentales que permitan obtener "conocimiento del proceso".

TECNICAS MODERNAS PARA EL DISEÑO ROBUSTO

Kackar (1985) y Plante (1992) presentan tres métodos de diseño robusto utilizando el concepto de indicadores de la razón de ruido, los cuales pueden ser empleados en las etapas iniciales del diseño de productos y procesos.

Durante el proceso de diseño robusto necesitamos determinar los parámetros que minimizarán la variación y cumplirán con los requerimientos del consumidor.

Definiciones:

- Y= Variable dependiente que describe la característica del producto o proceso que se analizará mediante el diseño robusto.
- T= Valor meta (media) para Y suministrado por el consumidor.
- σ_y^2 = Varianza de Y.
- μ_y = La media de Y.
- X_i = El parámetro que puede ser controlado o ajustado en el diseño. (i=1,...,k). Factores de control.
- Z_j = La variable que no puede ser controlada o ajustada en el diseño. Factores de ruido externo. (j=1,...,m).

Entonces Y será una función definida como:

$$Y = f(x_1, \dots, x_k, z_1, \dots, z_m)$$

Procedimiento:

Encontrar los valores de x_i (diseño de parámetros) tal que minimicen la relación:

$$E [(Y-T)^2] = \sigma_y^2 + (\mu_y - T)^2$$

donde $E [(Y-T)^2]$ es el valor esperado.

En general, se busca determinar los valores de los parámetros para cada x_i significativa de tal manera que la influencia de las z_j sea minimizada en la respuesta Y.

METODOS PARA EL DISEÑO ROBUSTO

Método 1

- i- Estimar el efecto de las interacciones $x_i \cdot x_{i+1}$ y $x_i \cdot z_j$ en μ_y .
- ii- Usar un diseño factorial completo o un factorial fraccionario.
- iii- Graficar las interacciones significativas y visualmente determinar los valores

El modelo de control del proceso es dirigido a la identificación y eliminación de las causas de los problemas que generan material defectuoso.

de los parámetros en aquellas x_i que minimicen la variabilidad en Y .

- iv- Ajustar las restantes x_i al valor meta (media).

Método 2

- i- Estimar el efecto de x_i y z_j en μ_y .
- ii- Estimar el efecto de x_i en σ_y^2 . (se requieren réplicas).
- iii- Usar un diseño factorial completo o un factorial fraccionario.
- iv- Determinar los valores de los parámetros en aquellas x_i significativas que minimicen variabilidad.
- v- Ajustar las restantes x_i al valor meta (media).

Método 3

- i- Estimar el efecto de x_i y z_j en μ_y .
- ii- Transformar Y en una variable de rendimiento P , dependiendo del valor meta T , como sigue:

- a- *El menor valor, el mejor, $T=0$;*
donde se busca minimizar:
 $E [(Y-0)^2] = P = Y^2$

En un producto específico o sistema de producción, esto podría ser: desperdicio de material, pérdida de resistencia, contenido de humedad, peso, defectos, producto defectuoso, trabajo en proceso, inventarios, costos, tiempo de espera, tiempos de ajuste, tiempos de procesamiento, transporte, reprocesos, quejas de clientes, atrasos en entregas, cambios de diseños, rotación de personal, maquinaria y equipo dañado, fracción defectuosa, dispersión, variabilidad, etc.

- b- *El mayor valor, el mejor, $T \rightarrow \infty$*
donde se busca minimizar:
 $E [(1/y-0)^2] = P = 1/y^2$

En un producto específico o sistema de producción, esto podría ser: productividad, rendimientos, ventas, resistencia, utilización de material, utilidades, calidad superior, eficiencias, satisfacción del cliente, vida útil de herramientas de corte, satisfacción del trabajador, flujo de caja, rendimientos en procesos químicos, etc.

- c- *Valor nominal, T ;*
donde se busca minimizar:
 $E [(Y-T)^2] = P = (Y - T)^2$

En un producto específico o sistema de producción, esto podría ser: dimensiones específicas en partes, materiales, y producto final, contenidos de humedad, resistencia, esfuerzos, ajustes, tiempos de entrega, horas en servicio, cumplimiento de estándares o especificaciones, niveles de calidad y productividad.

- iii- Estimar el efecto de cada x_i en P .
- iv- Estimar el efecto de x_i en σ_y^2 . (Se requieren réplicas).
- v- Usar un diseño factorial completo o un factorial fraccionario.
- vi- Determinar los valores de los parámetros en aquellas x_i significativas que minimizan la variable de rendimiento P .
- vii- Ajustar las restantes x_i al valor meta (media).

Algunas veces es necesario transformar logarítmicamente la variable de rendimiento P usada en a, b, c, con el fin de evitar problemas de escala, varianzas heterogéneas y no linealidades. Para cada caso se recomienda transformar P como:

- a. $Y^2 \Rightarrow 2 \cdot \ln Y$
- b. $1/y^2 \Rightarrow -2 \cdot \ln Y$
- c. $(Y-T)^2 \Rightarrow 2 \cdot \ln (Y-T)$



Las técnicas de diseño robusto requieren que la persona que las utilice tenga ciertos conocimientos básicos de regresión lineal y de diseños factoriales. Esto enfatiza aún más la importancia de la estadística en el campo del control de la calidad. El análisis puede ser ejecutado usando un paquete estadístico, hoja electrónica o calculadora programable. A continuación se presenta la aplicación del diseño robusto en un ejemplo real, lo que permitirá visualizar su importancia y valor.

EJEMPLO DE APLICACION

En una planta ensambladora de circuitos impresos en un tablero, las partes son insertadas manualmente o automáticamente en un tablero plano con un circuito impreso en él. Después de que la mayoría de las partes son insertadas, el tablero es pasado por una máquina de soldadura tipo onda. Este proceso es un medio para conectar electrónica y mecánicamente todas las partes en el circuito. Los tableros son colocados en una faja transportadora y son llevados a una serie de pasos. En primer término son bañados en una mezcla fluida para remover óxido. Para minimizar torceduras, los tableros son precalentados antes de aplicar la soldadura. El proceso de soldadura se lleva a cabo mientras los tableros pasan por la soldadura tipo onda. Después, los tableros son llevados a un mecanismo similar a una lavadora de platos para remover los residuos. Debido a los diferentes factores que controlan el proceso, éste es un excelente candidato para experimentación. Para un proceso de soldadura tipo onda, que no ha sido estudiado estadísticamente, es común que entre un 10 y un 20% del personal en la línea de ensamblaje esté involucrado en retocar la soldadura.

El objetivo del experimento es **minimizar** el número de defectos de soldadura por millón de uniones. Los

parámetros que van a ser usados han sido cuidadosamente considerados y seleccionados en una sesión de tormenta de ideas. Seguidamente, fueron escogidos cinco factores controlables. Se decidió ensayar cada factor a dos niveles (2^5) e incluir las interacciones entre la temperatura del punto de la soldadura y la velocidad de la faja transportadora. Los factores controlables y sus correspondientes niveles se presentan en el Cuadro 1.

Para efectos del experimento, solo se consideraron dos de los diferentes tipos de ensambles que se llevan a cabo con el proceso de soldadura tipo onda.

El objetivo es determinar los valores de los parámetros controlables del proceso de soldadura que son aptos para ambos tipos de ensamble; el diseño también indicará si el tipo de ensamble interactúa con algún factor controlable.

La velocidad de la faja transportadora y la temperatura del punto de la soldadura sufrirán variación casi desde el inicio del experimento; esto ocurre porque es difícil ajustar la velocidad de la faja con algún grado de precisión así como mantener la temperatura de la soldadura.

De modo que el equipo de ingenieros escogieron incluir tolerancias en estas variables, y además se seleccionó el tipo de ensamblaje como un parámetro no-controlable. Los parámetros no-controlables y sus respectivos niveles se presentan en el Cuadro 2.

El diseño experimental y los resultados se muestran en el Cuadro 3. Se utilizó un diseño factorial fraccionario de la forma $2^{8-3} = 2^5 = 32$, resolución IV.

Para el análisis del diseño experimental se utilizó el paquete estadístico SAS versión 6.06. Para cada modelo especificado se reportarán únicamente los factores significativos. El nivel utilizado fue $\alpha=0,05$. Se utilizará el método 3 de diseño robusto. Ya que el objetivo del experimento es minimizar el número de defectos; se utilizará el procedimiento de "El menor

CUADRO 1. Factores controlables en el proceso de soldar circuitos impresos en un tablero.

Variable	Factor	Nivel	
		Bajo	Alto
X1	Temperatura del punto de soldadura	248,8°C	265,5°C
X2	Velocidad faja transportadora	2,19 m/min	3,04 m/min
X3	Densidad de mezcla	0,9	1,0
X4	Temperatura de precalentamiento	93,3°C	65,5°C
X5	Altura de la onda	1,52 cm	1,27 cm

valor, el mejor", $T=0$, donde Y será transformada en una variable de rendimiento $P=Y^2$.

1. Estimar el efecto de x_i y z_j en μ_y .

Modelo: $Y = \mu_y + X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + Z1 + Z2 + Z3 + X1Z1 + X2Z1 + X3Z1 + X4Z1 + X5Z1$

Los factores significativos fueron los siguientes:

Factor	Estimado	Valor P
Intercepción	197,125	0,0001
X1	-27,500	0,0018
X3	56,875	0,0001
X5	-22,750	0,0071

2. Estimar el efecto de x_i en P.

Modelo: $P = \mu + X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + Z1 + Z2 + Z3$

Los factores significativos fueron los siguientes:

Factor	Estimado	Valor P
Intercepción	44652	0,0001
X1	-10921	0,0015
X3	22271	0,0001
X5	-8551,625	0,0096

3. Estimar el efecto de X_i en σ_y^2

Modelo: $\sigma_y^2 = \mu + X1 + X2 + X3 + X4 + X5$

CUADRO 2. Parámetros no controlables en el proceso de soldadura tipo onda

Variable	Factor	Nivel	
		Bajo	Alto
Z1	Tipo de producto	Ensamble # 1	Ensamble # 2
Z2	Tolerancia en velocidad de faja	-0,06 m/m	0,06 m/m
Z3	Tolerancia en temperatura punto soldadura	-15°C	-20,5°C

CUADRO 3. Resultados experimentales para el proceso de soldadura tipo onda.

Ensayo	X1	X2	X3	X4	X5	Z1	Z2	Z3	Y*
1	1	1	1	1	1	1	1	1	275
2	1	1	1	1	1	1	-1	-1	193
3	1	1	1	1	1	-1	1	-1	197
4	1	1	1	1	1	-1	-1	1	194
5	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	136
6	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	132
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	136
8	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	136
9	1	-1	1	1	-1	1	1	1	264
10	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	264
11	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	261
12	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	185
13	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	42
14	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	127
15	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	125
16	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	47
17	-1	1	1	-1	1	1	1	1	293
18	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	204
19	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	216
20	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	295
21	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	157
22	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	231
23	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	159
24	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	234
25	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	322
26	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	247
27	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	326
28	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	328
29	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	104
30	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	105
31	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	187
32	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	186

(*) Número de defectos de soldadura por millón.

No se detectaron factores significativos.

Los factores significativos fueron X1, X3, y X5. Para determinar los valores robustos recomendados para estos factores controlables se debe graficar su comportamiento tal como se muestra en las Figuras 1, 2 y 3. Seleccionar los niveles de los factores que minimizan la variable de respuestas Y. (Se pudo utilizar P, pero los resultados serían los mismos).

Factor X1: Se recomienda utilizar X1 al nivel alto o sea ajustar proceso a una temperatura de soldadura de 265,5°C.

Factor X3: Se recomienda utilizar X3 al nivel bajo o sea utilizar densidad de mezcla de 0,9.

Factor X5: Se recomienda utilizar X5 al nivel alto o sea ajustar proceso a una altura de onda de 1,27 cm.

Los otros factores controlables X2 y X4 pueden ser ajustados de acuerdo con un análisis económico que determine su valor óptimo. Por ejemplo X4 al nivel alto podría representar un ahorro de energía en el proceso.

El modelo recomendado para el proceso es robusto, los parámetros recomendados van a minimizar la variabilidad

FIGURA 1. Factor
X1. Nivel Bajo
(-1)= 248,8° C.
Nivel Alto (+1)=
265,5° C.

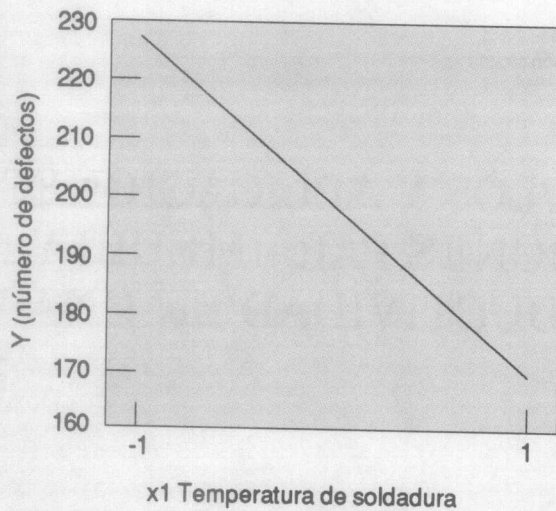


FIGURA 2. Factor
X3. Nivel Bajo
(-1)= 0,9. Nivel
Alto (+1)= 1,0.

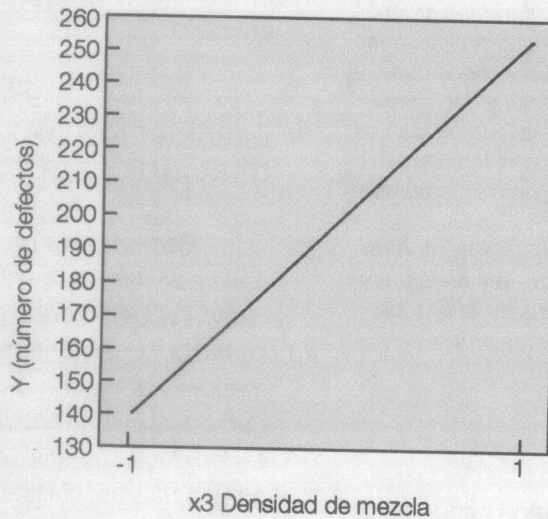
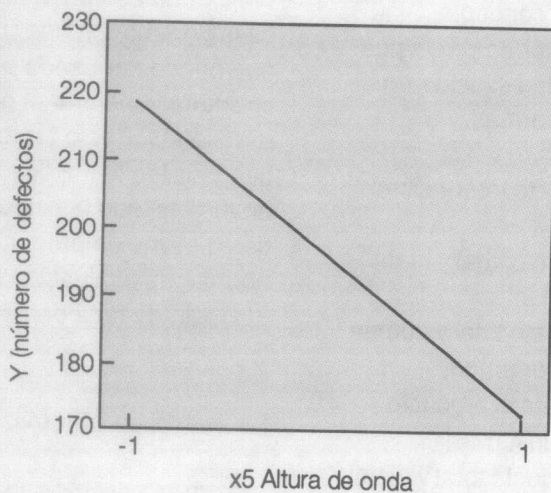


FIGURA 3. Factor
X5. Nivel Bajo
(-1)= 1,52 cm.
Nivel Alto
(+1)= 1,27 cm.



transmitida al proceso. Sin embargo, la validación final del modelo se debe hacer con ensayos confirmatorios antes de tomar una acción final en el proceso.

CONCLUSION

Los métodos de diseño robusto han demostrado ser una herramienta muy poderosa para la reducción de variabilidad y obtención de conocimiento en las etapas iniciales de diseño del producto y procesos. Mediante la aplicación de estos métodos conjuntamente con el diseño experimental, es posible hablar de un verdadero mejoramiento continuo de la calidad.

LITERATURA CONSULTADA

- DeVor, R. *et al. Statistical Quality Design and Control*. 1 ed. New York: Macmillan, 1992.
- Hunter, J. *Statistical Design Applied to Product Design*. *Journal of Quality Technology*. Vol. 17, no. 4, 210-221. Oct., 1985.
- Kackar, R. *Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method*. *Journal of Quality Technology*. Vol. 17, no. 4, 176-188. Oct., 1985.
- Montgomery, D. C. *Introduction to Statistical Quality control*. 2 ed. New York: Wiley, 1990.
- Plante, R. *TQM: Class Notes. MGMT 590-Q*. Spring Semester. Purdue University. West Lafayette, Indiana. 1992.
- Shina, S. *Uso del método de Taguchi para incrementar la resistencia del pegamento RTV en operaciones de adherencia de partes y componentes*. Traducido del inglés por Jorge Acuña. *Tecnología en Marcha*. Vol. 10, no. 2, p. 3-7, 1990.
- Taguchi, G. *Robust Quality*. *Harvard Business Review*. 65-75. January-February. 1990.
- Taguchi, G. *et al. Quality Engineering in Production Systems* 1 ed. New York: McGraw-Hill. 1989.

EJEMPLOS Y APLICACIONES DE TRES OPCIONES PARA MEDIR Y MEJORAR PRODUCTIVIDAD EN UNA EMPRESA

Benigno Chavarría*

Este artículo provee ejemplos y resultados de algunas aplicaciones hechas de tres opciones usadas para medir y mejorar la productividad en diferentes organizaciones. Adicionalmente, estas tres opciones son fáciles y factibles de aplicar con lo que ayudan a conocer las fortalezas y debilidades que tiene la empresa. Por otro lado, estas tres herramientas han sido aplicadas tanto en empresas de manufactura, como en empresas de servicio.

Finalmente, se muestra un resumen de los resultados, retroalimentación y mejoramiento de la productividad alcanzados aplicando estas tres opciones a diferentes empresas.

INTRODUCCION

La productividad puede ser definida como la relación **producto total medible entre los insumos totales medibles**.

Tomando en cuenta este concepto, Sink (1985) afirma que cualquier empresa puede mejorar su productividad si actúa en alguna de las siguientes formas:

- a- Aumentando el producto total y disminuyendo insumos,
- b- Aumentando el producto total y manteniendo insumos constantes,
- c- Aumentando el producto total y aumentando insumos en menor grado,
- ch- Manteniendo constante el producto total y disminuyendo insumos,
- d- Disminuyendo el producto total y disminuyendo los insumos en mayor grado.

Máster en Ingeniería Industrial. Profesor de los cursos de Simulación y Productividad de la Universidad de Costa Rica.

Por lo tanto, es necesario buscar buenas opciones para la medición y mejoramiento de la productividad en una empresa.

DESCRIPCION DE LAS TRES HERRAMIENTAS

"Para mejorar productividad, Usted debe administrar. Para administrar efectivamente, Usted debe controlar. Para controlar consistentemente, Usted debe medir. Para medir válidamente, Usted debe definir. Para definir precisamente, Usted debe cuantificar" (Riggs, p. 61). En otras palabras, si Usted mide en su empresa, Usted puede conocer y mejorar los resultados de ésta.

Con base en la afirmación anterior, es importante proveer una herramienta que pueda ser usada para dar información oportuna y mejorar el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, las tres opciones que pueden ser aplicadas en nuestras empresas, son las siguientes: 1) La matriz de objetivos de productividad, 2) Las normas de evaluación de empresas, y el 3) Costo de falta de calidad.

La matriz de objetivos de productividad

Esta herramienta desarrollada por el Centro de Productividad de Oregón

Si Usted mide en su empresa, Usted puede conocer y mejorar los resultados de ésta.

(Riggs), permite promover el trabajo de grupo en la empresa. Consiste en una matriz que tiene una serie de indicadores que pueden medir los diferentes departamentos o grupos de la organización. Además, se requiere seleccionar un máximo de ocho indicadores y proveer una ponderación a cada uno de ellos.

De acuerdo con el modelo, la organización puede realizar una evaluación periódica (semanal o mensual) del departamento o grupo de trabajo. Por ejemplo, la Figura 1 muestra la aplicación de esta matriz para una dependencia de la Subdirección Planta Interna del I.C.E. (Organización A en Cuadro 2).

Por otro lado, algunas etapas que se recomiendan para aplicar este instrumento son las siguientes:

- 1- Identificar un máximo de 8 criterios adecuados para la evaluación del grupo de trabajo.
- 2- Definir un nivel inicial y óptimo para cada criterio. El nivel inicial deberá ser colocado en la línea 3 y el nivel óptimo en la línea 10 de la columna de grado.
- 3- Determinar los niveles intermedios (de 0 a 10) agregando o sustrayendo al nivel inicial o nivel óptimo el resultado obtenido aplicando la ecuación 1.

$$\frac{|\text{Nivel óptimo} - \text{Nivel Inicial}|}{7} \quad \text{Ecuación 1}$$

- 4- Distribuir un total de 100 puntos entre los indicadores seleccionados.
- 5- Determinar el nivel actual de medición de cada criterio para el período de evaluación.
- 6- Determinar la puntuación correspondiente a cada columna e identificarla.
- 7- Calcular la contribución de cada criterio. Esta contribución puede ser

calculada por medio del peso multiplicado por la puntuación obtenida en la escala.

- 8- Sumar las contribuciones parciales de cada criterio para obtener el puntaje total.
- 9- Dividir la suma total entre 1000 para determinar el el porcentaje de actuación.

Normas para la evaluación de empresas

Esta es la segunda opción que puede ser utilizada para hallar y resolver problemas y por lo tanto mejorar productividad. Adicionalmente, Bodinson afirma (1991, pág. 11) que este tipo de herramienta puede ayudar a incrementar los estándares, el mercado, utilidades y productividad de la empresa.

La Figura 2 muestra un resumen o perfil de productividad que evalúa las características y funciones vitales de la empresa (Organización D en Cuadro 2). Este resumen fue usado para evaluar y hallar las áreas críticas en el mejoramiento de la productividad. Algunas de las áreas principales que una evaluación de este tipo debería incluir son las siguientes:

- a) Gerencia,
- b) Organización y sus funciones,
- c) Control de calidad,
- ch) Distribución en planta,
- d) Manejo de materiales,
- e) Control de inventarios,
- f) Métodos de trabajo,
- g) Medición del trabajo,
- h) Programas de mantenimiento,
- i) Seguridad industrial,
- j) Administración de los recursos humanos,
- k) Programación y control de la producción,
- l) Administración de la productividad y otros.

Criterios de productividad * →

Nivel actual de medición

1	2	3	4	5	6	7	8
51,6	96	95	1,0	4,5	4,6	0	5

Nivel óptimo 10

55	100	100	<u>2,0</u>	5,15	4,0	<u>0</u>	0
54	98,16	98,43	2,21	5,04	4,1	0,29	0,71
<u>52</u>	<u>96,32</u>	96,86	2,43	4,95	4,2	0,57	1,42
51	94,48	<u>95,29</u>	2,64	4,86	4,3	0,86	2,14
49	92,65	93,71	2,86	4,77	4,4	1,14	2,85
46	90,81	92,14	3,07	4,69	4,5	1,43	3,55
46	88,97	90,57	3,29	4,59	<u>4,6</u>	1,71	4,27
45	87,13	89	3,50	<u>4,5</u>	4,7	2,0	<u>5</u>
44	85,29	87,43	3,71	4,41	4,8	2,29	5,71
42	83,45	85,80	3,93	4,32	4,9	2,57	5,42
41	81,61	84,29	4,14	4,23	5,0	2,66	7,14

9

8

7

6

5

4

3 Nivel inicial

2

1

0 Nivel deficiente

Grado

8	8	7	10	3	4	10	3
20	20	10	15	10	10	10	5
160	160	70	150	30	40	100	15
80	80	70	100	30	40	100	30

Puntuación total

725

Peso

Contribución

% contribución

% desempeño

72,50

* Descripción de criterios de productividad:

- 1 % calidad dada la los clientes
- 2 % reparación de averías cumpliendo estándar
- 3 % órdenes ejecutadas cumpliendo estándar
- 4 No. averías entre 1000 líneas telefónicas
- 5 No. horas hombre entre 1000 líneas telefónicas
- 6 No. horas mantenimiento preventivo entre 100 líneas telefónicas
- 7 % averías pendientes
- 8 No. horas extra por empleado

FIGURA 1. La matriz de objetivos aplicada a la organización A.

Area	Principios básicos	Puntos por evaluar	Puntos obtenidos	% de desempeño	
I. Finanzas	I.1	Administración	48	24,6	51,25
	I.2	Finanzas	73	36,6	50,14
	I.3	Presupuesto	100	86,5	86,50
	I.4	Planeamiento	65	58,5	90,00
	I.5	Control	65	55,1	84,77
	I.6	Organización	73	59,3	81,23
	I.7	Contabilidad General	43	40,6	94,42
II. Manufactura	II.1	Organización	98	83,7	85,41
	II.2	Pronósticos	100	58	58,00
	II.3	Evaluación y control	95	70,5	74,21
	II.4	Métodos de trabajo	87	54,03	62,10
	II.5	Distribución en planta	98	58,89	60,09
	II.6	Manejo de materiales	75	38,15	50,87
	II.7	Bodegas	90	66,59	73,99
	II.8	Mantenimiento	298	134	45,00
	II.9	Control de inventarios	268	197	73,50
III. Investigación y desarrollo	III.1	Diseño del proceso	75	51	68,00
	III.2	Diseño del producto	73	67	91,78
	III.3	Recursos	100	49	49,00
IV. Recursos humanos	IV.1	Descripción de tareas	65	12,8	19,69
	IV.2	Incentivos	95	27,5	28,95
	IV.3	Selección	87	51	58,62
	IV.4	Entrenamiento	100	48	48,00
	IV.5	Administración	87	69,6	80,00
V. Sistemas información	V.1	Organización	52	35,25	67,79
	V.2	Autoridad	52	45,5	87,50
	V.3	Procedimientos	98	71	72,45
VI. Mercadeo	VI.1	Ventas	95	59,6	62,74
	VI.2	Calidad de servicio	43	15,8	36,74
	VI.3	Estudios de mercadeo	98	56,4	57,55
VII. Control de calidad	VII.1	Conceptos	100	50	50,00
	VII.2	Organización	90	40,8	45,33
	VII.3	Auditorías	100	42,4	42,40
	VII.4	Procedimientos	65	39,5	60,77
	VII.5	Inspección proceso	95	35	36,84
	VII.6	Inspección final	100	50	50,00
	VII.7	Inspección recepción	48	22,1	46,04
	VII.8	Producto defectuoso	73	73	100,00
	VII.9	Laboratorios	78	78	100,00
	VII.10	Certificación	52	14,2	27,31
	VII.11	Estándares nacionales	80	80	100,00
VIII. Productividad	VIII.1	Compromiso	100	59	59,00
	VIII.2	Concepto	95	39,9	42,00
	VIII.3	Medición	98	48,44	49,43
	VIII.4	Costos de calidad	100	28	28,00
IX. Seguridad industrial	IX.1	Seguridad industrial	65	31,4	48,31
	IX.2	Higiene industrial	65	36,6	56,31
Total de puntos			4200	2550	
% desempeño			60,72		

FIGURA 2. Perfil de productividad de la organización D aplicando normas de evaluación de empresas.

La matriz de objetivos de productividad promueve el trabajo de equipo en una organización.

Se recomienda realizar este tipo de evaluación por lo menos una vez al año con el objetivo de medir el grado de mejoramiento de la productividad.

Costo de falta de calidad

Es importante hallar el costo de falta de calidad, con el objetivo de proveer todas las mejoras para reducirlo. Crosby (1979, p. 18) afirma que *la calidad se mide por medio del costo de falta de calidad, el cuál es el costo de no cumplir con las especificaciones de los clientes*. Además, el mismo autor agrega que el costo de falta de calidad para una empresa norteamericana varía entre el 15 y el 20% de las ventas anuales.

En relación con los tipos de costos de calidad, estos pueden ser clasificados y medidos en cuatro categorías:

- a) Costos por fallas internas,
- b) Costos por fallas externas,
- c) Costos de prevención, y
- ch) Costos de evaluación.

Por lo tanto, una organización debería invertir en actividades de prevención y evaluación para reducir altos costos en fallas internas y externas.

Por ejemplo, suponga que una empresa tiene ventas que alcanzan

cien millones de colones anuales; sin embargo, el costo de falta de calidad actual es del 20% con respecto a las ventas. Por otro lado, la organización tiene el objetivo de reducir el costo de 20% a 15% realizando una inversión de un millón de colones en actividades de prevención y evaluación. El Cuadro 1 muestra un ejemplo hipotético.

A partir de este caso se puede afirmar que vale la pena dedicar esfuerzos al proceso de medición y a la inversión en actividades de prevención y evaluación para aumentar la calidad de los productos o servicios, y así mejorar la productividad de la empresa.

El costo de falta de calidad fue medido por primera vez en seis diferentes empresas (Ver Cuadro 2). Por falta de datos disponibles no se incluyen costos de prevención y evaluación, lo que hace pensar que el costo real de falta de calidad debe ser mayor al presentado en el Cuadro 2.

RESULTADOS ALCANZADOS APLICANDO LAS TRES OPCIONES

El Cuadro 2 muestra un resumen sobre la actuación de seis empresas estudiadas a las que se les aplicaron las tres opciones de medición simultáneamente.

CUADRO 1. Ejemplo de reducción de costos por falta de calidad.

Elemento	Situación actual	Situación propuesta	Diferencia
A. Ventas	¢ 100	¢ 100	0
B. Inversión	0	1	-1
C. Costo de falta calidad	20	15	5
Saldo a favor (A-B-C)	¢ 80	¢ 84	\$ 4

La aplicación de normas internacionales permite obtener una evaluación del Sistema actual de Productividad por medio de un análisis detallado de las áreas más importantes de la empresa.

CUADRO 2. Resumen de resultados aplicando las tres opciones

Resultados utilizando:					
No.	Tipo de Organización (Producto)	MOP ¹	Normas ²	Costo calidad ³	Fecha ⁴
1	A= Telecomunicaciones	73%	75%	5%	2/90
2	B= Pinturas	60%	70%	5%	5/90
3	C= Frutas	74%	81%	5%	10/90
4	D= Plásticos	74%	60%	7%	10/90
5	E= Industria Automotriz	34%	69%	3%	8/91
6	F= Plásticos	36%	50%	8%	8/91

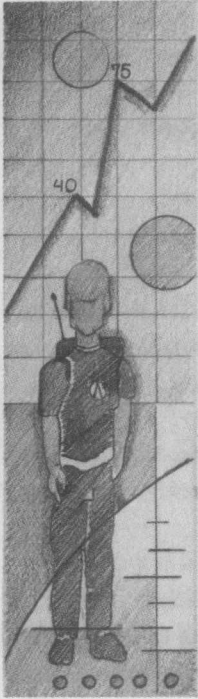
- 1 % Desempeño obtenido aplicando la matriz de objetivos de productividad.
- 2 % Evaluación obtenida aplicando las normas de evaluación de empresas.
- 3 % Costos de calidad. Este costo no incluye costos de evaluación y prevención.
- 4 Fecha de medición.

CONCLUSION

Es importante dedicar esfuerzo en nuestras empresas al estudio de la factibilidad de aplicar Sistemas de Medición de la Productividad, los cuales pueden ayudar a mejorar el desempeño y los resultados de la organización. Además, estas tres opciones deben ser analizadas y aplicadas en forma oportuna.

LITERATURA CONSULTADA

- Ballakur, A. **Productivity and Quality Improvement in Electronic Assembly**. Atlanta, Georgia. I.I.E. 1988.
- Belcher, J. **Productivity Plus**. Texas, Gulf Publishing. 1988.
- Bodinson, G. *Warning: Ignoring ISO Standards may be harmful to your company's future*. **Industrial Management**. (March-April). (Vol. 33, no. 2) p. 11-12. Atlanta, Georgia, I.I.E. 1991.
- Crosby, P. **Quality is free**. New York, McGraw Hill. 1979.
- Denton, K. *Measuring Non conforming costs reduced manufacturer's cost of quality in Product by \$200.000*. **Industrial Engineering** (August): Vol. 20-no. 8. Atlanta, Georgia, I.I.E. p. 37. 1988.
- Edosomwan, J. **Productivity and Quality Improvement**. England, IFS Publications. 1989.
- Edosomwan, J. **Integrating Productivity and Quality Management**. New York, Marcel Dekker, Inc. 1987.
- Feigenbaum, A. **Total Quality Control**. New York, Mc Graw Hill. 1983.
- I.I.E. **Artículos sobre Administración de la Productividad y Calidad**. Atlanta, Georgia, I.I.E., De 1986 al presente.
- I.I.E. **Proceedings of World Productivity Forum**. Washington, D. C., I.I.E. 1987.



Kendrick, J.; Creamer, D. **Measuring company productivity** Handbook with case studies. Studies in Business Economics, no. 89. New York, National Industrial Conference Board. 1986.

Riggs, J. **Productivity by Objectives**. New Jersey, Prentice Hall. 1983.

Sink, D. **Productivity Management**. New York, John Willey & Sons. 1985.

Sink, D. **Planning and Measurement in your Organization of the Future**. Atlanta, Georgia, I.I.E. 1989.

Sourwine, D. *Ensuring Financial as well as Operational success of Productivity Improvements Projects*. **Industrial Engineering** (July): Vol. 20 no. 7. Atlanta, Georgia, I.I.E. p. 34-40. 1988.

Sumanth, D. **Productivity Engineering and Management**. New York, Mc Graw Hill. 1989.

V.P.C. **Artículos sobre Productividad y Calidad**. Blacksburgh, Virginia, V.P.C. De 1989 al presente.