

SPC, control estadístico: caso de estudio de un inversor trifásico

Dr. Juan Carlos Pérez Merlos¹, Dra. Mireya Salgado Gallegos², Ing. Marco Antonio López López³

Resumen: Una herramienta para control de la calidad es el control estadístico que a través de gráficas de referencia de medias y rangos e índices, identifica qué tan probable un proceso cumple con las especificaciones definidas por un cliente. En este documento se describe una aplicación de Statistical Process Control (SPC) en un inversor trifásico, y después se recolectaron datos del voltaje de salida. El resultado mostró que la fase 1 y 2 no cumplieron el criterio de estabilidad. La fase 3 cumplió con dicho criterio, ya que en la gráfica de medias y rangos los datos están dentro de los límites de control. Se concluye que el circuito puede cumplir el requerimiento del cliente y lograr un comportamiento mayor a 1.33 en Cpk, que es un valor aceptado en la industria; los resultados significan que se tiene una confiabilidad aproximada de salidas dentro de una especificación del 99.997 %.

Palabras clave: Control estadístico, inversor trifásico, aplicación de la estadística.

Case Study: Statistical Process Control (SPC) as a Quality Control Tool for a Three-Phase Inverter

Abstract: A known tool for quality control is utilization of Statistical Process Control (SPC) that, through reference graphs of means, ranges, and indexes, identifies how likely a process meets the specifications defined by a customer. This study describes the application of a three-phase inverter. Data of the output voltage was collected and analyzed. The results showed that phases 1 and 2 did not meet the stability criteria. Phase 3 met the criterion, since the data was within the control limits in the graph of means and ranges. It is concluded that the circuit can meet the customer's requirement and achieve a behavior greater than 1.33 in Cpk, an accepted marker of value in industry, indicating an approximate reliability of outputs within a 99.997% specification.

Keywords: Statistical Process control, SPC, three-phase inverter, application of statistics.

Introducción

La teoría básica del control estadístico de procesos (Statistical Process Control, SPC) tuvo su inicio en los años 20's con el Dr. Walter A. Shewhart, pero no fue sino hasta la Segunda Guerra Mundial cuando comenzó a aplicarse prácticamente en la industria especialmente difundido por Edwards Deming. Ambos observaron que las mediciones repetidas de un proceso mostraban variaciones. Shewhart trabajó inicialmente con procesos de manufactura, pero después él y Deming se dieron cuenta que sus observaciones se podía aplicar a cualquier tipo de procesos. Concluyeron que si un proceso es estable, su variación puede ser predecible y se puede describir por una o varias distribuciones (Benneyan, Lloyd, & Plsek, 2003).

Benneyan et al. (2003) comentan que Shewhart desarrolló una herramienta estadística relativamente simple (la carta de control) para ayudar a distinguir entre variaciones debido a una causa común o a una especial. Una carta de control consta de dos partes: una serie de mediciones graficadas en orden temporal; y un machote de carta de control, la cual consiste en tres líneas horizontales llamadas línea central, (típicamente la media), la superior (límite de control superior) e inferior (límite de control inferior) (Benneyan et al., 2003).

De acuerdo con Guajardo (2003) citado por Saumeth et al. (Saumeth, Afanador, Ospino, & Barraza, 2012), en 1960 se crean los primeros círculos de calidad por Kaoru Ishikawa y posteriormente en 1962 empiezan a ponerse en práctica estos sistemas participativos en las empresas japonesas. Los círculos de calidad, se basan en un sistema participativo de gestión mediante el cual los trabajadores se reúnen en grupos pequeños para realizar sugerencias y solucionar problemas relacionados con aspectos del propio trabajo.

Juran (1990), citado por Saumeth et al. (Saumeth et al., 2012), menciona que el SPC pretendía ir más allá de una inspección, tratando de identificar y eliminar las causas que generan los defectos. En ese tiempo, la calidad era vista como el cumplimiento de especificaciones. Con este nuevo enfoque se recurrió a técnicas estadísticas y se aprovecharon los conceptos básicos del control estadístico de la calidad desarrollados por W. Shewhart; no se trataba

¹ El Dr. Juan Carlos Pérez Merlos es profesor investigador de la licenciatura en Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. icjic63@yahoo.com (autor corresponsal)

² La Dra. Mireya Salgado Gallegos es profesora de la licenciatura en Ingeniería en Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. msalgadog@uaemex.mx

³ Ing. Marco Antonio López López es egresado de la licenciatura en Ingeniería en Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. marcoantonilopez2@gmail.com

de eliminar la variabilidad en la producción, sino de diferenciar entre variaciones aceptables o comunes y variaciones especiales que indican la presencia de algún fallo.

Miranda (2007) citado por Saumeth et al. (2012), opina que la idea era mantener un proceso en su estado planificado, de forma que siga siendo capaz de cumplir los objetivos establecidos. Era tal la importancia que incluso Deming afirmaba que “sin control estadístico el proceso estaba en un caos inestable, enmascaraba cualquier intento de realizar mejoras”, lo que condujo a la aparición del control de la calidad.

Sardana (2011) define que SPC es una aplicación de métodos estadísticos que permite monitorear y controlar un proceso, es una herramienta que apoya el aseguramiento de la calidad en la producción y a la mejora continua (Sardana, Kumar, Bajwa, & Gulati, 2011).

Garbin et al. (1988) citados por Saumeth et al. (2012), comentan que la calidad ha experimentado un profundo cambio hasta llegar a lo que hoy se conoce por excelencia, inicialmente el enfoque era hacia la calidad del producto, después hacia la satisfacción de las necesidades o expectativas de los clientes y posteriormente hacia todos los grupos de interés de la organización. Los responsables de la calidad también han ido cambiando, primero era responsabilidad única de la persona que elaboraba el producto pasando por los inspectores para luego convertirse en responsabilidad de todos los que hacen parte de la empresa.

Los años 1990 se caracterizaron por una proliferación de estudios, trabajos y experiencias sobre el Modelo de Gestión de la Calidad Total (GCT o TQM: Total Quality Management). La preocupación por la calidad se generalizó en todos los países querían obtener las enseñanzas de los japoneses e implementarlas en sus empresas.

En los inicios del año 2000 la calidad ha dejado de ser una prioridad competitiva para convertirse en un requisito imprescindible para competir en muchos mercados. Es decir, tener calidad no garantiza el éxito, sino que supone una condición previa para competir en el mercado. Por esto muchas organizaciones enfocan sus esfuerzos en lograr el mejoramiento de la calidad, entre ellas la ISO por sus siglas en inglés (*International Organization for Standardization*, ISO).

En principio, la calidad se define como la “propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permite juzgar su valor” (Rangel, Camargo, & Lizcano, 2014). Por su parte, como representante destacado de las organizaciones de normalización la ISO, plantea que la calidad puede entenderse como el “grado en que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos” (Rangel et al., 2014). Besaldush (Besalduch, 2010) y Garvin (Garvin, 1988), agrupan las definiciones de calidad en cinco enfoques básicos: trascendente, en el producto, basado en el cliente, en la producción y el enfoque basado en el valor.

En México, el tema de "control total de calidad" y otras de sus acepciones se ha puesto de moda en los últimos años. Lo anterior no se debe a la casualidad sino a la necesidad de subsistencia en mercados abiertos y competitivos. Anteriormente, los consumidores, ya sea de productos o servicios, mostraban interés únicamente en el precio. Actualmente, se evalúa precio y calidad, debiendo existir un equilibrio entre estas dos variables.

Lo cierto es que la calidad ha pasado de ser un lujo a ser una necesidad. Hasta hace unos años, la documentación sobre el tema de "calidad" se basaba en industrias de manufactura. Sin embargo, la cultura de calidad, y en particular el control estadístico de procesos, se pueden aplicar a cualquier industria o sector económico.

Sardana et al. (Sardana et al., 2011), presentan un estudio de un proceso de manufactura para reducir la tasa de rechazo de sellos de goma usando el análisis de varianza (ANOVA) a través de las cartas de X y R para determinar qué tanto la variación de cada producto afectaba en el factor de calidad que contribuía al rechazo del producto, usaron 400 muestras divididos en 4 subgrupos, se encontró que la variación estaba dentro de los límites de control.

De Paula et al. (de Paula Alvarenga, de Abreu, Piekarski, Bittencourt, & de Matos, 2014), aplicaron SPC para el aseguramiento de la calidad en los paquetes de mantequilla de 200g; usaron la prueba *t-Student* para determinar las diferencias entre 8 lotes y 32 muestras. Además, el resultado mostró que los índices Cp y Cpk fueron igual a 1.23, valor mayor que 1. Asimismo, encontraron que la media de los paquetes oscilaba en 208.94 gr, lo cual era pérdida para la empresa.

Palacios et al. (Palacios & Gisbert Soler, 2018), aplicaron el control estadístico de la calidad al proceso de montaje de bicicletas eléctricas con el fin de mejorar la calidad, evitar el rechazo de productos, desperdicios y reprocesos, para así entregar al cliente final, productos seguros y confiables que no atenten contra la salud de los mismos y que además funcionen correctamente en el entorno para el cual fueron diseñadas.

Ortega et al. (Ortega & Gissella, 2017), investigaron la cantidad de producto existente en los quesos frescos que ofertan en las muestras de 500 gramos, para ello emplearon la herramienta estadística de control de calidad. Se analizaron 15 muestras de quesos frescos de diferentes fabricantes, la conclusión fue: de las 15 muestras, 14 presentan un porcentaje faltante de producto que va desde 20.26 a 2.71% y sólo una muestra cumplió con lo que se declara en la etiqueta.

Llamosa et al. (Llamosa, Contreras, & Arbelaez, 2007) describieron de manera detallada la aplicación del método de promedios y rangos para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad en el Laboratorio de Metrología usando Variables Eléctricas en la Universidad Tecnológica de Pereira.

Como se puede observar, el control estadístico tiene una amplia aplicación poco explotada en las diferentes áreas del conocimiento, lo cual se corrobora en la bibliografía ya que no se recuperó ningún trabajo relacionado a inversores trifásicos; por tanto, en este trabajo se describe una aplicación del SPC sobre un inversor trifásico que fue construido.

Desarrollo

Descripción del método

Para el desarrollo de la aplicación de SPC sobre el inversor se siguió la siguiente metodología:

- Investigación documental
- Diseño y construcción del inversor trifásico
- Propuesta de parámetros de salida del inversor
- Selección de la (s) variable (s)
- Medición y recolección de datos
- Pruebas y análisis de resultados
- Conclusiones.

Desarrollo

Se diseñó el inversor trifásico en Matlab^{MR}, y para alimentarlo se diseñó y construyó una fuente conmutada tipo Buck como se muestra en la Figura 1. El inversor fue simulado como se presenta en la Figura 2 y enseguida se construyó. Tanto la fuente como el inversor fueron controlados por un microprocesador aplicando modulación ancho de pulso (PWM).

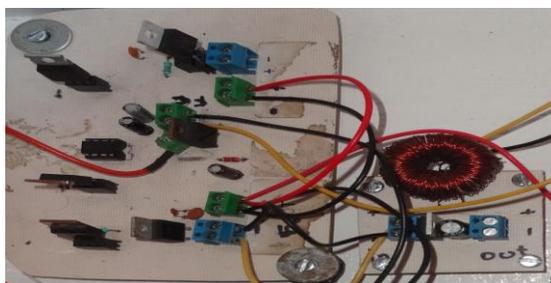


Figura 1. Construcción de la fuente Buck.

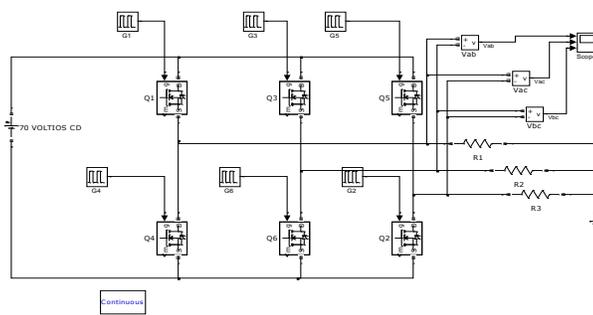


Figura 2. Inversor trifásico simulado en MatLab^{MR}.

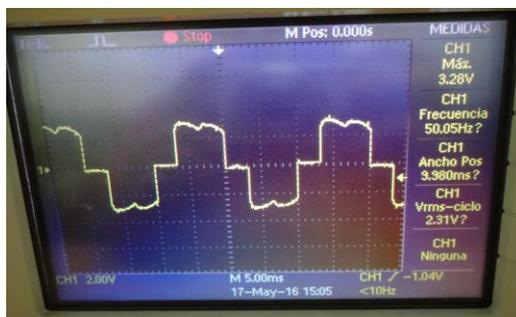


Figura 3. Señal de salida del inversor trifásico.

La señal de salida del inversor se puede observar en el osciloscopio (Figura 3); ésta se utilizó para alimentar a un motor trifásico de 200 Watts en una configuración delta como se muestra en la Figura 4. Para el análisis y aplicación del SPC, se decidió usar la variable voltaje de salida.

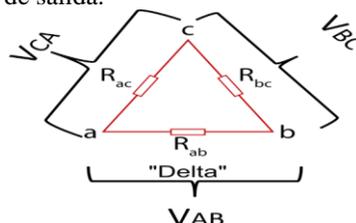


Figura 4. Fases de salida del inversor trifásico.

Las salidas del inversor se ajustaron a una frecuencia de 50 Hz a un ciclo de trabajo del PWM del 50% y a un voltaje de 25.5 Vrms (el valor cuadrático medio, en inglés denominado *Root Mean Square*, abreviado RMS o rms).

Como se mencionó, para este trabajo se tomó el voltaje a la salida del inversor trifásico, sin embargo, otros datos de interés que se pudieron haber tomado son la corriente en cada fase, la corriente o voltaje en algunos puntos de interés como podría ser la salida de la fuente o cualquier punto crítico que quiera ser analizado y que sea importante para el desempeño del circuito.

Para un estudio inicial de proceso se deben tomar piezas o mediciones consecutivas únicamente de un punto del circuito, es decir, no se deben mezclar los datos. Si se quieren tomar más puntos de interés, se deben realizar mediciones por separado para analizar punto a punto y poder encontrar cuáles son los datos o características en las cuales se realizará un análisis de desempeño.

El sistema de medición fue el mismo durante la recolección de datos, también el equipo de medición y las personas que recolectaron los datos durante cada corrida de manera sistematizada con cronómetro en mano para asegurar que los datos fueran tomados cada 5 segundos. El equipo de medición se consideró que era confiable y estaba certificado.

Para el análisis se formaron 13 subgrupos de 7 mediciones cada uno. Se tomaron en total 91 datos por cada fase (1, 2 y 3) y se realizaron las mediciones cada 5 segundos. El requerimiento del cliente es una salida de fase a fase de 23 a 28 Vrms con una nominal de 25.5 Vrms que es el valor medio entre 23 y 28 Vrms y una tolerancia de 5 Vrms. Lo que se busca es tener un Cpk mayor a 1.33 que es el índice estándar de los requerimientos industriales.

En la Tabla 1 se muestran los datos recolectados y el cálculo de medias y rangos para la fase 1; de la misma manera se analizaron los datos para la fase 2 y 3.

Tabla 1. Tabla con datos con cálculo de medias y rangos por subgrupo, fase 1.

Fase	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fecha	May	May												
Unidades	Vrms	Vrms												
# de sub Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
L e c t r i c a s	1	26.48	26.81	26.13	26.01	25.41	26.02	26.80	26.57	26.68	26.03	26.29	26.64	26.53
	2	25.66	26.25	26.34	26.13	25.62	26.53	26.96	26.59	26.66	26.81	25.80	26.47	25.75
	3	26.61	26.58	25.66	27.04	26.03	26.73	26.37	26.49	26.33	26.24	26.66	26.81	26.37
	4	26.67	26.62	24.95	25.85	25.72	26.70	26.72	26.59	26.58	26.10	26.67	26.50	25.90
	5	26.65	26.52	25.50	25.86	25.93	26.68	26.32	26.64	26.39	26.27	26.14	26.20	26.55
	6	26.51	25.83	26.07	26.65	25.32	26.84	26.22	26.39	26.79	26.58	26.79	26.38	26.48
	7	26.79	25.73	26.18	25.23	25.91	26.94	26.67	26.79	26.60	26.23	26.65	26.66	25.66
Suma	185.37	184.34	180.83	182.77	179.94	186.44	186.06	186.06	186.03	184.26	185.00	185.66	183.24	
Media	26.48	26.33	25.83	26.11	25.71	26.63	26.58	26.58	26.58	26.32	26.43	26.52	26.18	
Rango	1.13	1.08	1.39	1.81	0.71	0.92	0.74	0.40	0.46	0.78	0.99	0.61	0.89	

Las fórmulas utilizadas para los cálculos fueron las que se presentan en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

$$\bar{X} = \frac{X_1+X_2+\dots+X_n}{n} \quad \text{ec. 1}$$

$$R = X_{\text{mayor}} - X_{\text{menor}} \quad \text{ec. 2}$$

$$\bar{R} = \frac{R_1+R_2+\dots+R_k}{k} \quad \text{ec. 3}$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1+\bar{X}_2+\dots+\bar{X}_k}{k} \quad \text{ec. 4}$$

X_1, X_2, \dots, X_n : son valores individuales de las lecturas recolectadas, \bar{X} : el promedio o la media; R : el rango; \bar{R} : el promedio del rango; $\bar{\bar{X}}$: promedio del proceso; y n : número de elementos.

Para generar las gráficas de promedios y rangos se utilizaron las ecuaciones 5, 6, 7 y 8.

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad \text{ec. 5}$$

$$LCL_R = D_3 \bar{R} \quad \text{ec. 6}$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad \text{ec. 7}$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad \text{ec. 8}$$

UCL_R : Límite de control superior del rango; LCL_R : Límite de control inferior del rango; $UCL_{\bar{X}}$: Límite de control superior del promedio; $LCL_{\bar{X}}$: Límite de control inferior del promedio

Donde: D_4, D_3 y A_2 son constantes que varían dependiendo del tamaño de los subgrupos. En la Tabla 2 se muestran los valores de los factores A y D para tamaños de 2 a 10. Para el caso particular, los subgrupos fueron de 7 mediciones.

Tabla 2. Variación de las constantes que dependen del tamaño del subgrupo.
 Fuente: Leavenworth (Leavenworth & Grant, 2000).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_4	3.27	2.57	2.28	2.11	2.00	1.92	1.86	1.82	1.78
D_3	*	*	*	*	*	.08	.14	.18	.22
A_2	1.88	1.02	.73	.58	.48	.42	.37	.34	.31
d_2	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

Con las ecuaciones antes descritas se procedió a calcular el promedio, rango y los límites superior e inferior de medias y rangos y usando las constantes D_4, D_3 y A_2 de la Tabla 2 para los subgrupos de 7 datos.

Pruebas y resultados

El estudio anterior se realizó para las tres fases obteniendo los resultados que a continuación se desglosan.

De los resultados mostrados en la Tabla 1 y de la Figura 5 se observa que dado que el valor nominal especificado por el cliente que es 25.5 Vrms y el promedio del proceso es $\bar{\bar{X}} = 26.330$ Vrms, el promedio de los promedios del proceso tiene un valor de 0.83 Vrms más que la nominal, que es el valor ideal que el cliente desea. Los límites de control del promedio se encuentran cargados al límite superior de la especificación.

Tabla 1. Tabla con datos con cálculo de medias y rangos por subgrupo, fase 1 (repetida para facilitar la lectura).

Fase	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Fecha	May													
Unidades	Vrms													
# de sub Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
L e c t u r a s	1	26.48	26.81	26.13	26.01	25.41	26.02	26.80	26.57	26.68	26.03	26.29	26.64	26.53
	2	25.66	26.25	26.34	26.13	25.62	26.53	26.96	26.59	26.66	26.81	25.80	26.47	25.75
	3	26.61	26.58	25.66	27.04	26.03	26.73	26.37	26.49	26.33	26.24	26.66	26.81	26.37
	4	26.67	26.62	24.95	25.85	25.72	26.70	26.72	26.59	26.58	26.10	26.67	26.50	25.90
	5	26.65	26.52	25.50	25.86	25.93	26.68	26.32	26.64	26.39	26.27	26.14	26.20	26.55
	6	26.51	25.83	26.07	26.65	25.32	26.84	26.22	26.39	26.79	26.58	26.79	26.38	26.48
	7	26.79	25.73	26.18	25.23	25.91	26.94	26.67	26.79	26.60	26.23	26.65	26.66	25.66
Suma	185.37	184.34	180.83	182.77	179.94	186.44	186.06	186.06	186.03	184.26	185.00	185.66	183.24	
Media	26.48	26.33	25.83	26.11	25.71	26.63	26.58	26.58	26.58	26.32	26.43	26.52	26.18	
Rango	1.13	1.08	1.39	1.81	0.71	0.92	0.74	0.40	0.46	0.78	0.99	0.61	0.89	

De la Tabla 1 se observa que el subgrupo 4 es el que tiene el mayor rango representando poco menos del 40 % de la tolerancia especificada por el cliente, por lo tanto, si se mantuviera esta variación y el promedio del proceso centrado a la nominal, la variación del proceso se mantendría dentro de los límites especificados por el cliente.

El rango promedio es casi un quinto de la tolerancia especificada y el límite de control superior del rango es poco más del 40% de la tolerancia especificada, lo cual significa que si el proceso se mantiene centrado y los datos se encuentran dentro de los límites de control los voltajes a la salida de la fase 1 estarán dentro de los límites especificados por el cliente.

En la Figura 5 se muestra como quedó la gráfica de medias y rangos con sus respectivos límites de control para la fase 1. En las gráficas se señalan los puntos fuera de los límites de control.

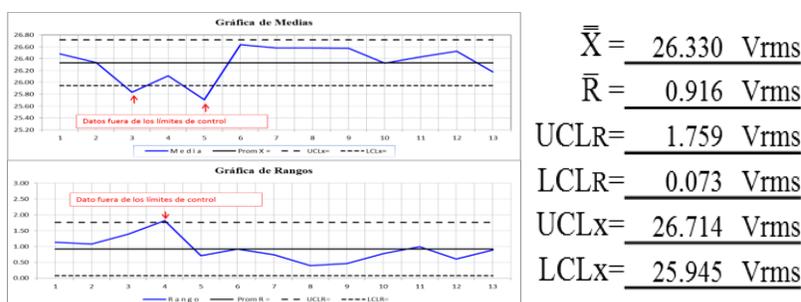


Figura 5. Gráfica X, R, y valores del proceso de la fase 1.

De la misma manera se obtuvieron los datos para la fase 2 y se calcularon los límites de medias y rangos como se muestra en las Figura 6.

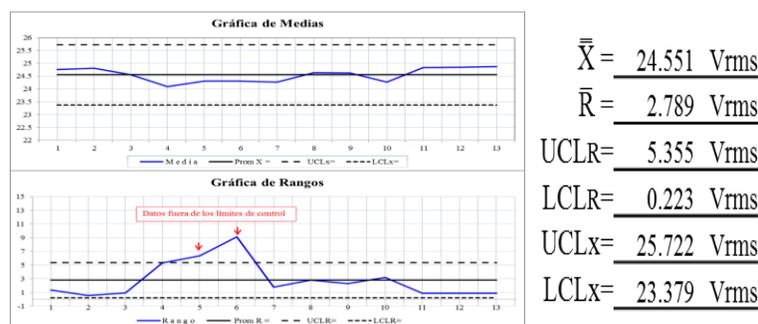


Figura 6. Gráfica X, R y valores del proceso de la fase 2.

De los resultados obtenidos para la fase 2, se observó que dado que la nominal especificada por el cliente es 25.5 Vrms y el promedio del proceso es $\bar{\bar{X}} = 24.551 \text{ Vrms}$; el promedio del proceso tiene 0.949 Vrms menos que la nominal definida por el cliente.

Los límites de control del promedio se encuentran cargados al límite inferior de la especificación debido a que el promedio del proceso también se encuentra cargado al límite inferior de especificación.

El rango promedio es casi el 60 % de la tolerancia especificada y el límite de control superior del rango es poco más de la tolerancia especificada, lo cual significa que, aunque la gráfica de rangos se encuentre dentro de los límites de control pueden existir datos cuyos valores estén fuera de los límites de especificación.

De los datos de la fase 2, se pudo observar que el subgrupo 6 es que tiene el mayor rango representando casi el doble de la tolerancia especificada por el cliente, por lo tanto, con esta variación y aún con el promedio del proceso centrado a la nominal, la variación del proceso arrojaría valores fuera de los límites especificados por el cliente.

Asimismo, para la fase 3 se obtuvieron las gráficas de medias y rangos que se muestran en la Figura 7 con los valores calculados.

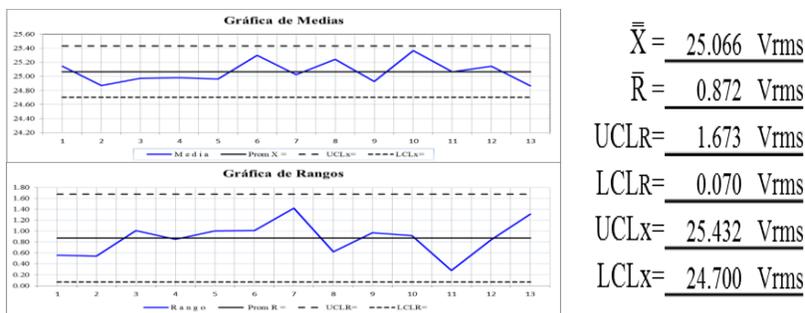


Figura 7. Gráfica X, R y valores del proceso de la fase 3.

De los resultados mostrados en la Figura 6, el promedio del proceso es $\bar{\bar{X}} = 25.066 \text{ Vrms}$, el promedio del proceso tiene un valor de 0.434 Vrms menos que la nominal.

De los datos obtenidos para la fase 3 se observa que el subgrupo 7 es que tiene el mayor rango representando poco menos del 30 % de la tolerancia especificada por el cliente, por lo tanto, si se mantuviera esta variación y el promedio del proceso se mantuviera centrado a la nominal la variación del proceso se mantendría dentro de los límites especificados por el cliente.

El rango promedio es casi un quinto de la tolerancia especificada y el límite de control superior del rango es poco más del 30% de la tolerancia especificada, lo cual significa que si el proceso se mantiene centrado y los datos se encuentran dentro de los límites de control los voltajes a la salida de la fase 3 estarán dentro de los límites especificados por el cliente. Esta fase está dentro de los límites de control y se procedió a calcular los índices de capacidad del proceso

De acuerdo con Hernández et al. (Hernández Pedrera & Da Silva Portofilipe, 2012), el Cp es el índice de capacidad potencial, que es definido como el ancho de la tolerancia dividida por la capacidad del proceso, independientemente del centrado del proceso. Típicamente es expresada como la ec. 9.

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6 \hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 9}$$

El índice de capacidad real Cpk es muy útil para determinar si un proceso es capaz o no de cumplir con los requerimientos del cliente y es definido como el mínimo de CPU (upper capability index) o CPL (lower capability index), relaciona a escala la distancia entre la media del proceso y el límite de especificación más cercano a un medio de la distribución total del proceso.

$$CPU = \frac{USL - \bar{\bar{X}}}{3 \hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 10}$$

$$CPL = \frac{\bar{\bar{X}} - LSL}{3 \hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 11}$$

$$Cpk = \min (CPU - CPL) \quad \text{ec. 12}$$

USL y LSL son las especificaciones superior e inferior, $\bar{\bar{X}}$ es el promedio del proceso, y $\hat{\sigma}$ es la desviación estándar del proceso, calculada usando $\frac{\bar{R}}{d_2}$, siendo d_2 una constante obtenida de la Tabla 1 que depende de las muestras de los subgrupos. Para calcular tolerancias unilaterales y bilaterales se utilizaron las ec. 13 a la 16.

$$Z = \frac{USL - \bar{\bar{X}}}{\hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 13}$$

$$Z = \frac{\bar{\bar{X}} - LSL}{\hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 14}$$

$$Z_{USL} = \frac{USL - \bar{\bar{X}}}{\hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 15}$$

$$Z_{LSL} = \frac{\bar{\bar{X}} - LSL}{\hat{\sigma} \bar{R} / d_2} \quad \text{ec. 16}$$

Donde: USL: Límite superior de especificación, LSL: Límite inferior de especificación, Los valores Z se obtienen de la distribución normal estándar.

Tomando en cuenta el requerimiento del cliente de una salida en voltaje de 23 Vrms a 28 Vrms se tienen los siguientes resultados para los índices del proceso:

De la ec. 15 se obtiene Z_{USL} , de la ec. 16 se obtiene Z_{LSL} , de la ec. 10 se obtiene el CPU o índice de capacidad superior, de la ec. 11 se obtiene CPL o índice de capacidad inferior, de la ecuación 9 se obtiene Cp que es el índice de capacidad y es definido como el ancho de la tolerancia dividida por la capacidad del proceso y de la ecuación 12 se obtiene Cpk este es el índice de desempeño que cuenta para el centrado del proceso. De la Tabla 2 se toma el valor para el índice d_2 para subgrupos de 7 datos. Los resultados de los cálculos se muestran en la Figura 8.

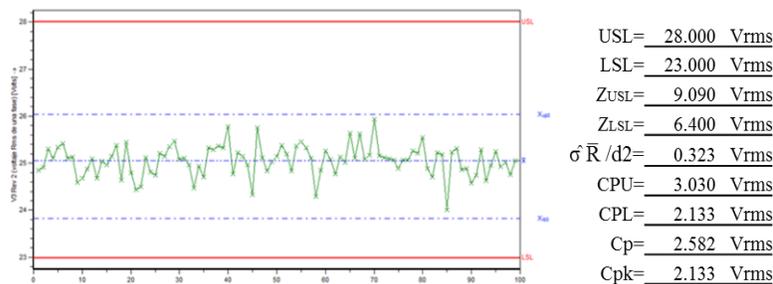


Figura 8. Gráfica de datos individuales del proceso y cálculo de los índices

Conclusiones

En este documento se describe una aplicación de Statistical Process Control (SPC) en un inversor trifásico, y después se recolectaron datos del voltaje de salida. El resultado mostró que la fase 1 y 2 no cumplieron el criterio de estabilidad. La fase 3 cumplió con dicho criterio, ya que en la gráfica de medias y rangos los datos están dentro de los límites de control.

Debido a que los datos de la fase 3 se encuentran dentro de los intervalos de las gráficas de medias y rangos es decir dentro del control estadístico y su variación es únicamente a causas comunes se pudo continuar con el cálculo de los índices de capacidad Cp y Cpk.

Las fases 1 y 2 del inversor no cumplieron con el control estadístico, por lo que se revisaron nuevamente los circuitos relacionados a estas fases para que estuvieran dentro control y aplicarles el cálculo de los índices Cp y Cpk. Se recomienda con los datos de la fase 1 y 2 realizar un ajuste o revisión en el circuito para igualar el promedio del proceso con la nominal.

Por un lado, el método de control estadístico del proceso fue el adecuado para este inversor trifásico debido a su distribución unimodal. Por otro lado, este método se puede ocupar tanto para equipo nuevo como para equipo usado.

Referencias

- Benneyan, J. C., Lloyd, R. C., & Plsek, P. E. (2003). Statistical process control as a tool for research and healthcare improvement. *BMJ Quality & Safety*, 12(6), 458-464.
- Besalduch, E. V. (2010). Control de Calidad: control estadístico de procesos: Obtenido de concretonline: <http://www.concretonline.com/>.
- de Paula Alvarenga, T. H., de Abreu, A. J., Piekarski, C. M., Bittencourt, J. V. M., & de Matos, E. A. S. Á. (2014). Statistical Process Control (SPC): a control tool against waste of inputs in brazilian dairy. *Independent Journal of Management & Production*, 5(1), 214-226.
- Garvin, D. A. (1988). *Managing quality: The strategic and competitive edge*: Simon and Schuster.
- Hernández Pedrera, C., & Da Silva Portofilipe, F. (2012). Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de su calidad. *Tecnología Química*, 36(1), 104-116.
- Leavenworth, R. S., & Grant, E. L. (2000). *Statistical quality control*: Tata McGraw-Hill Education.
- Llamosa, L. E., Contreras, L. G. M., & Arbelaez, M. B. (2007). Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025. *Scientia et Technica*, 1(35).
- Ortega, J., & Gissella, F. (2017). Aplicación de las gráficas de control de medias y rangos en el aseguramiento de la calidad del queso fresco.
- Palacios, L. M., & Gisbert Soler, V. (2018). Control estadístico de calidad: una aplicación práctica.
- Rangel, P. E. S., Camargo, V. d. C. R., & Lizcano, C. I. n. F. r. (2014). El concepto de calidad en las organizaciones: una aproximación desde la complejidad. *Universidad & Empresa*, 16(27), 157-205.
- Sardana, S., Kumar, R., Bajwa, M., & Gulati, P. (2011). Application of Spc Tool for Finding Variation in the Process Output : A Case Study. *International Journal of Industrial Engineering Research and Development*, 2(1).
- Saumeth, K. M. T., Afanador, T. S. R., Ospino, L. S., & Barraza, F. M. (2012). Calidad y su evolución: una revisión. *Dimensión empresarial*, 10(2), 100-107.

Notas Biográficas

El Dr. Juan Carlos Pérez Merlos es Ingeniero en Electrónica en Instrumentación egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán Jalisco en 1986. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en Informática en 1998 en la Universidad Autónoma del Estado de México y es Doctor en Ingeniería Industrial Tecnologías de Información en el 2018 por la Universidad Anáhuac Norte de México.

La Dra. Mireya Salgado Gallegos es Ingeniera en Computación en la Universidad Autónoma del Estado de México en 1994. Obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería en Informática en 2006 en la misma Institución y es Doctora en Ingeniería Industrial Tecnologías de Información en el 2018 por la Universidad Anáhuac Norte de México.

El Ing. Marco Antonio López López es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma del Estado de México en 2016.