



## Análisis estadístico de la caída de tensión en un sistema eléctrico de baja tensión

### *Statistical analysis of the voltage drop in a low voltage electrical system*

Juan M - Astorga

Recibido: Diciembre del 2012

Aprobado: Febrero del 2013

#### Resumen/ Abstract

En este trabajo se presenta un enfoque estadístico para la evaluación de la caída de tensión en un sistema eléctrico de baja tensión, basado en la aplicación de dos herramientas básicas del control estadístico de procesos conocidas como cartas de control y análisis de capacidad de procesos. Se muestran los resultados para dos sistemas de prueba, se realizan las pruebas de normalidad y autocorrelación parcial para las muestras, se interpretan los resultados de las cartas de control Xbarra-S y se evalúa la capacidad del proceso considerando las bases del mejoramiento de la calidad. Los sistemas de prueba usados en este trabajo son un sistema eléctrico monofásico de baja tensión y un sistema eléctrico trifásico de baja tensión. El objetivo principal de este trabajo es evaluar el estado de control estadístico de la variable de proceso "caída de tensión", como herramienta para el mejoramiento continuo de los procesos eléctricos.

**Palabras clave:** análisis de capacidad de procesos, caída de tensión, cartas de control Xbarra-S, control estadístico de procesos.

*This paper presents a statistical approach for the evaluation of the voltage drop in a low voltage electrical system, based on the application of two basic tools of statistical process control known as control charts and process capability analysis. The results for two test systems are shown, testing of normality and partial autocorrelation for samples are performed, the results of the control charts Xbar-S are interpreted and the process capability analysis are assessed considering the foundations for the quality improvement. The test systems used in this work are one electrical system single-phase low voltage and one electrical system of three-phase low voltage. The main objective of this paper is to evaluate the state of statistical control of the process variable "voltage drop", as a tool for continuous improvement of the electrical process.*

**Key words:** process capability analysis, voltage drop, Xbar-S control charts, statistical process control.

#### INTRODUCCION

Uno de los principales indicadores que permite medir la eficiencia de una instalación eléctrica en un sistema de distribución de baja tensión es la caída de tensión. La caída de tensión en una instalación eléctrica corresponde a la diferencia entre el voltaje del lado fuente y el voltaje del lado carga [1] y depende de la longitud del alimentador, de la sección del conductor y de la corriente que circula desde la fuente hacia la carga. Se puede obtener la caída de tensión para un sistema monofásico o trifásico usando las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$VD_{1\phi} = I_{1\phi}(K_R R \cos \theta + K_X X \sin \theta)L \quad (V) \quad (1)$$

$$VD_{3\phi} = I_{3\phi}(R \cos \theta + X \sin \theta)L \quad (V) \quad (2)$$

En la ecuación (1),  $VD_{1\phi}$  es la caída de tensión para un sistema monofásico (en Volt),  $I_{1\phi}$  es la corriente que circula por un alimentador monofásico (en Ampere),  $K_R$  y  $K_X$  son factores de corrección que dependen del grado de utilización de la corriente que circula por el neutro,  $R$  es la resistencia del conductor (en  $\Omega/\text{Km}$ ),  $X$  es la reactancia del conductor ( $\Omega/\text{Km}$ ),  $\theta$  es el ángulo de la impedancia del conductor (en grados) y  $L$  es la longitud del conductor (en Km). Para sistemas con neutro aterrizado se tiene que  $K_R = K_X = 2$  [1]. En la ecuación (2),  $VD_{3\phi}$  es la caída de tensión para un sistema trifásico (en Volt),  $I_{3\phi}$  es la corriente que circula por un alimentador trifásico (en Ampere),  $R$  es la resistencia del conductor (en  $\Omega/\text{Km}$ ),  $X$  es la reactancia del conductor (en  $\Omega/\text{Km}$ ),  $\theta$  es el ángulo de la impedancia del conductor (en grados) y  $L$  es la longitud del conductor (en Km). En Chile, los sistemas eléctricos de baja tensión (entiéndase por baja tensión aquellos voltajes menores o iguales que 1.000 Volt) están regulados por la Norma Eléctrica Chilena 4/2003, en ella se indica, en la sección 7.1.1.3 que la caída de tensión no debe superar el 3% de la tensión nominal de la alimentación, siempre que la caída de tensión total en el punto más desfavorable de la instalación no supere el 5% de la tensión nominal [2]. Dada esta condición, los sistemas eléctricos de baja tensión se diseñan para que la caída de tensión no supere el 3% del voltaje nominal, haciendo necesario monitorear y controlar la caída de tensión dentro de este rango de variabilidad de tal modo de garantizar la calidad de suministro hacia las instalaciones.

El artículo se desarrolla de la siguiente manera. En la primera parte del desarrollo se presentan las características principales de las cartas de control Xbarra-S (considerando que en este trabajo los registros se ordenaron en 24 subgrupos) y de los índices de capacidad de procesos, en la sección siguiente se describen los sistemas de prueba que se utilizaron para la adquisición de datos y toma de muestras, luego se presentan los principales resultados obtenidos del procesamiento de datos utilizando el software estadístico de distribución libre R, finalmente, se exponen las principales conclusiones de la investigación.

## DESARROLLO

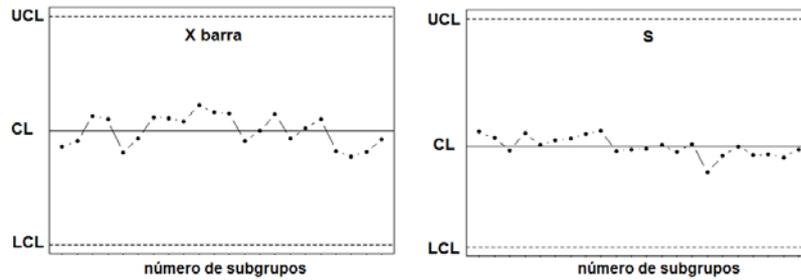
### CARTAS DE CONTROL $\bar{X} - S$

Las cartas de control fueron introducidas en 1924 por W.A. Shewhart de los laboratorios Bell Telephone [3] con el fin de monitorear el valor medio de la característica de calidad y la variabilidad del proceso, de tal modo de atribuir las variaciones detectadas durante el registro de las observaciones a causas aleatorias o a causas asignables [4]. Para el control de variables ordenadas en subgrupos es aconsejable trabajar con cartas de control tipo Xbarra-R ó Xbarra-S. Las cartas de control Xbarra-S son muy útiles cuando el tamaño de los subgrupos es mayor que 12, ya que permite reflejar de mejor manera el comportamiento de la variabilidad del proceso [4]. Las ecuaciones (3) y (4), permiten calcular los parámetros de las cartas Xbarra y S, respectivamente [4].

$$UCL = \bar{X} + \frac{3\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}} = \bar{X} + A_3 \bar{S} \quad , \quad CL = \bar{X} \quad , \quad LCL = \bar{X} - \frac{3\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}} = \bar{X} - A_3 \bar{S} \quad (3)$$

$$UCL = \bar{S} + \frac{3\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2} = B_4 \bar{S} \quad , \quad CL = \bar{S} \quad , \quad LCL = \bar{S} - \frac{3\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2} = B_3 \bar{S} \quad (4)$$

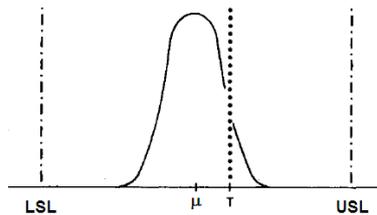
En las ecuaciones(3) y (4), UCL, CL y LCL son los límites de control superior, central e inferior, respectivamente,  $c_4$  es una constante que depende del tamaño del subgrupo,  $n$  es el número de subgrupos,  $\bar{X}$  barra es la media de las medias de los subgrupos,  $\bar{S}$  barra es la media de las desviaciones estándar de los subgrupos y las constantes  $A_3$ ,  $B_3$  y  $B_4$  son factores de construcción de las cartas de control X barra – S. La figura 1, muestra una carta de control Xbarra – S típica.



**Fig.1. Cartas de control X barra – S.**

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE PROCESOS**

El análisis de capacidad de procesos, es una herramienta estadística que permite estudiar la variabilidad de la “variable de proceso” con respecto a los requerimientos de las especificaciones del producto considerando los límites de las especificaciones, el valor nominal (o Target) y la distribución de la muestra. La figura 2, muestra un gráfico típico para el análisis de capacidad de procesos, donde LSL corresponde al límite inferior de las especificaciones,  $\mu$  corresponde al valor medio del proceso, T es el valor nominal o Target y USL es el límite superior de las especificaciones.



**Fig. 2. Gráfica típica para el análisis de capacidad de procesos.**

Para estudiar el desempeño de un proceso se utilizan algunos índices introducidos por Victor E. Kane en 1986 [5], estos son: índice de capacidad potencial del proceso  $C_p$ , índice de capacidad real del proceso  $C_{pk}$  y el índice de centrado del proceso K, además, es común incluir en el análisis de capacidad de procesos el índice de Taguchi ( $C_{pm}$ ), introducido por G. Taguchi en 1985 [6].

**Índice  $C_p$**

El índice de la capacidad potencial del proceso  $C_p$ , compara la variación de las especificaciones del proceso con la variación real observada. Se obtiene al dividir el ancho de las especificaciones entre la amplitud de la variación natural del proceso como se muestra en la ecuación 5.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \tag{5}$$

Donde  $\sigma$  representa la desviación estándar del proceso.

En la tabla 1, se describe la categoría de la calidad del proceso, según el valor del índice  $C_p$  [7].

<b>Tabla 1. Interpretación del índice de capacidad potencial del proceso <math>C_p</math></b>		
<b>Índice</b>	<b>Categoría</b>	<b>Interpretación</b>
$C_p \geq 2$	Clase Mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
$C_p > 1,33$	Clase 1	Adecuado, se puede reducir la inspección.
$1 < C_p < 1,33$	Clase 2	Parcialmente adecuado, es suficiente la inspección por muestreo.
$0,67 < C_p < 1$	Clase 3	No adecuado para el trabajo, se producirán unidades defectuosas $C_p$ debe aumentar al menos a 1. El proceso requiere de modificaciones serias.
$C_p \leq 0,67$	Clase 4	Muy mala, el proceso requiere de modificaciones muy serias.

### Índice Cpk

El índice Cpk es considerado una versión corregida del índice Cp, ya que toma en cuenta el centrado del proceso. Cpk siempre va a ser menor o igual que Cp. Cuando el valor de Cpk es muy menor que Cp la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones, por el contrario, cuando el valor de Cpk es muy cercano a Cp la media del proceso está muy cerca del centro de las especificaciones. La ecuación 6, muestra el cálculo del índice Cpk.

$$C_{pk} = \text{Mínimo} \left( \frac{\mu - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \mu}{3\sigma} \right) \quad (6)$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  representan la media y la desviación estándar del proceso, respectivamente.

En la tabla 2, se describe la capacidad real del proceso, según el valor del índice Cpk [6].

Tabla 2. Interpretación del índice Cpk	
Índice	Interpretación
Cpk > 1,25	Capacidad satisfactoria (para procesos existentes).
Cpk > 1,45	Capacidad satisfactoria (para procesos nuevos).
Cpk < 1	El proceso no cumple, por lo menos, una de las especificaciones.
Cpk ≤ 0	La media del proceso se encuentra fuera de las especificaciones.

### Índice K (índice de centrado del proceso)

Es un indicador que mide que tan centrada está la distribución de un proceso con respecto a las especificaciones de una característica de calidad dada. El índice de centrado del proceso se obtiene por medio de la ecuación (7):

$$K = \frac{2(\mu - T)}{(USL - LSL)} \cdot 100\% \quad (7)$$

Si K es positivo, entonces la media del proceso ( $\mu$ ) es mayor que el valor nominal (T), si K es negativo la media del proceso ( $\mu$ ) es menor que el valor nominal (T). Se consideran aceptables valores de K menores a 20%.

### Índice Cpm (índice de Taguchi)

El índice de Taguchi es similar al Cpk, pero considera en forma simultánea el centrado y la variabilidad del proceso. Se calcula por medio de la ecuación (8).

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\tau} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (8)$$

Si Cpm < 1 el proceso no cumple con las especificaciones, ya sea por problemas de centralización o exceso de variabilidad. Si Cpm > 1 el proceso cumple con las especificaciones y la media se encuentra dentro de la tercera parte central de la banda de las especificaciones. Si Cpm > 1,33 el proceso cumple con las especificaciones y la media se encuentra dentro de la quinta parte central de la banda de las especificaciones.

## PRUEBAS DE NORMALIDAD Y AUTOCORRELACION PARCIA

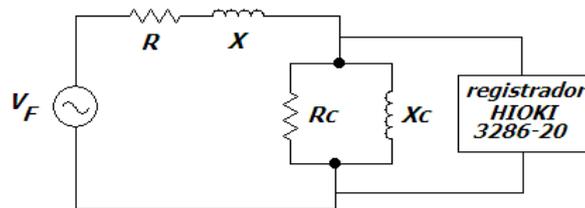
Para aplicar la teoría de cartas de control y el análisis de capacidad de procesos es necesario realizar las pruebas de normalidad y de autocorrelación parcial sobre las muestras [4]. La primera prueba tiene por objetivo validar la aceptación de la hipótesis de normalidad para el conjunto de datos en estudio, mientras que la segunda prueba tiene como fin probar si existe dependencia entre las observaciones de las muestras. En este trabajo, se utiliza el software de distribución libre R [8], específicamente, las herramientas del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk [9], el paquete

“plugin e-pack” para la prueba de autocorrelación parcial y el paquete “plugin qcc” para el análisis de capacidad de procesos y cartas de control. Una vez procesados los datos en el software R, los criterios de aceptación de los test de normalidad y autocorrelación parcial serán los siguientes:

- Se aceptará la hipótesis de normalidad cuando el p-valor sea mayor que 5%, es decir, cuando  $p\text{-value} > 0.05$  [4].
- Se aceptará la independencia de las observaciones mientras el factor de autocorrelación parcial (partial ACF, representado por barras verticales en el gráfico que entrega el software R) se encuentre dentro del rango de las bandas de confianza del 5% [4].

### RESULTADOS DEL SISTEMA DE PRUEBA MONOFASICO

El sistema de prueba monofásico se desarrolló como piloto en el laboratorio de circuitos eléctricos de la carrera de Tecnólogo en Electricidad del Instituto Tecnológico de la Universidad de Atacama y se estructuró de la siguiente manera:  $V_F$  (fuente de tensión de corriente alterna 220V RMS, 50 Hz),  $R_C$  y  $X_C$  (carga de prueba tipo resistiva inductiva), R y X (conductor de alimentación N°14 AWG) y Medida (Registrador marca HIOKI modelo 3286-20). Ver figura 3.



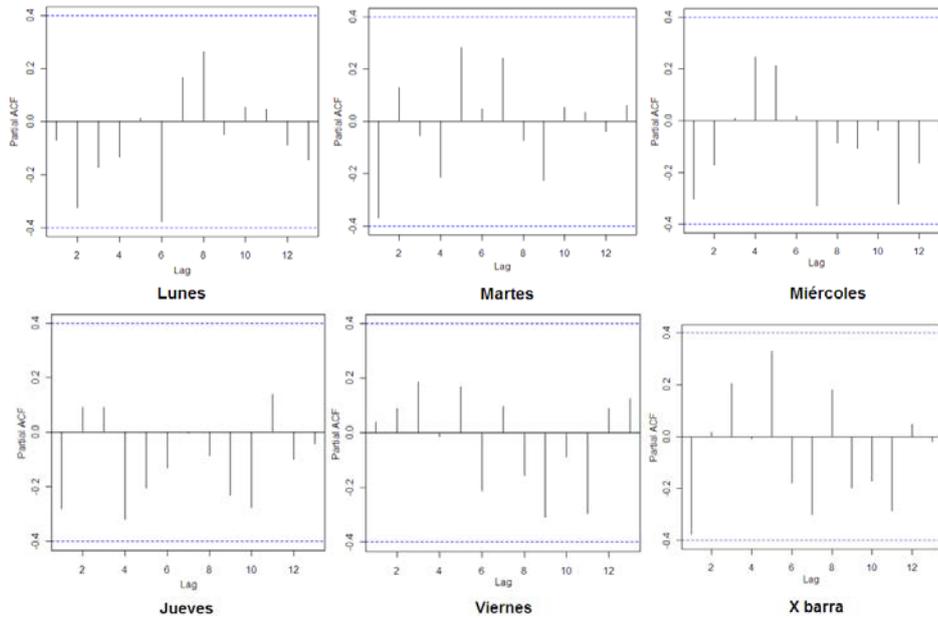
**Fig. 3. Circuito eléctrico monofásico de medición y registro.**

Las observaciones se tomaron durante 5 días consecutivos, de lunes a viernes, con tiempos de muestreo de una hora. En la tabla A.1, del Anexo A. “Datos sistemas de prueba”, se muestran los registros de voltaje del sistema monofásico para los días lunes a viernes.

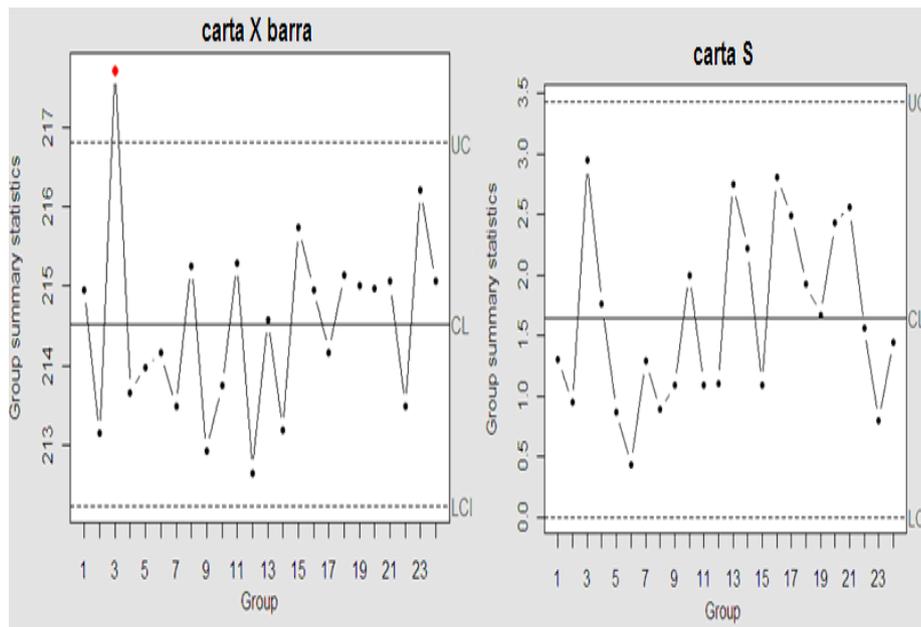
La tabla 3, muestra los resultados del p-valor para cada día de registro, luego de aplicar el Test de Normalidad de Shapiro-Wilk a las muestras de voltaje usando el software R [8].

<b>Tabla 3. Resultados del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para la muestra monofásica.</b>						
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	X barra
p-valor	0,2034	0,1040	0,1978	0,5721	0,7255	0,2254

La figura 4, muestra los resultados gráficos del comportamiento del factor de autocorrelación parcial (partial ACF) para la muestra monofásica de voltaje. Al observar los resultados de la tabla 3 y de la figura 4, se puede concluir que la hipótesis de normalidad se acepta y que las observaciones de la muestra monofásica de voltaje son independientes, por lo cual, podemos construir las cartas de control X barra-S. figura 5.



**Fig. 4. Gráfica del factor de autocorrelación parcial (partial ACF) muestra monofásica.**



**Fig. 5. Gráfica de control X barra - S para la muestra monofásica.**

En la figura 5, se muestran las cartas de control X barra- S para la muestra monofásica, considerando 24 subgrupos para 5 días de medición consecutiva. En la figura 6, se muestra el comportamiento del proceso frente a los límites de especificaciones de voltaje, que para este caso, corresponden a  $LSL=213,4(V)$  y  $USL=220(V)$ , según lo señalado por la Norma Eléctrica Chilena 4/2003 [2]. Para procesos con límites de especificación bilaterales, es común asumir como valor nominal o Target la media de los límites de especificación [10], de acuerdo a esto, el valor Target para el sistema de prueba monofásico sería 216,7 (V).

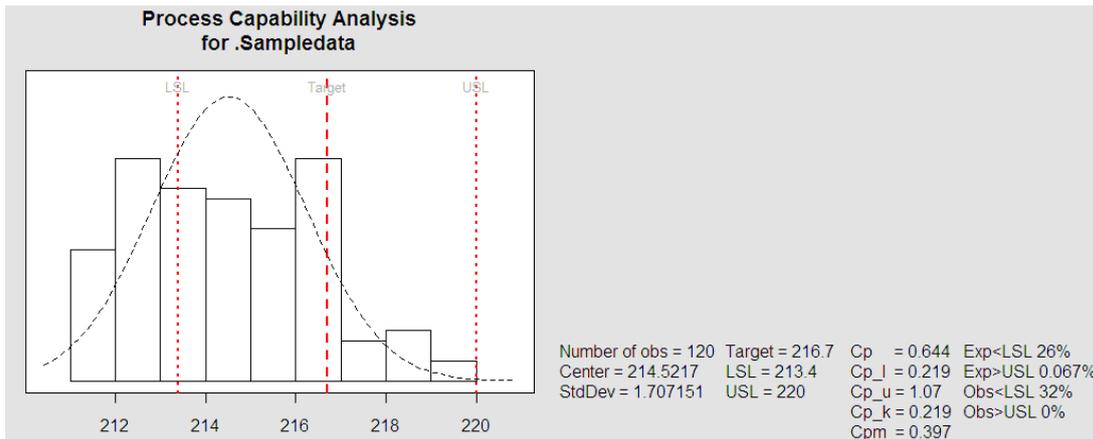


Fig. 6. Análisis de capacidad de proceso para la muestra monofásica.

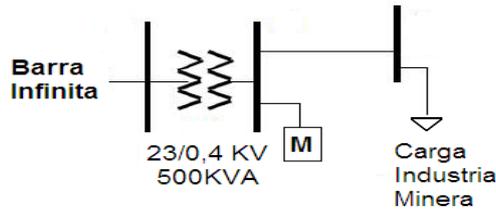
**ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE PRUEBA MONOFASICO**

La tabla 4, muestra un resumen con la interpretación de los resultados del sistema de prueba monofásico.

Tabla 4. Análisis de resultados del sistema de prueba monofásico	
Índice	Interpretación
p-valor	Según lo observado en la tabla 3, el p-valor para cada día de muestreo es mayor que 0,05, por lo tanto, la hipótesis de normalidad se acepta.
Partial ACF	De acuerdo con la figura 5, el factor Partial ACF para cada día de muestreo se encuentra dentro del intervalo de confianza, por lo tanto, las observaciones son independientes.
Carta X barra	Al observar la figura 6, se puede apreciar que la observación nº3 sobrepasa el límite de control superior, por lo tanto, la variable de proceso voltaje se encuentra fuera de control estadístico.
Carta S	Al observar la figura 6, se puede apreciar que todas las observaciones se encuentran dentro de los límites de control, por lo tanto, la variabilidad del proceso se encuentra bajo control estadístico.
Cp=0,644	Capacidad muy mala, el proceso requiere modificaciones serias.
Cpk=0,219	El proceso no cumple, por lo menos, una de las especificaciones.
K=66,01%	Problemas serios de centralización negativa.
Cpm=0,218	El proceso no cumple las especificaciones por problemas de centralización.

**RESULTADOS DEL SISTEMA DE PRUEBA INDUSTRIAL TRIFASICO**

La carga de prueba industrial que se usó para el muestreo, corresponde a una planta metalúrgica de la mediana minería de la región de Atacama, ubicada en la ciudad de Copiapó, Chile. El sistema de muestreo se describe en el diagrama unilíneal de la figura 7.



**Fig. 7. Diagrama unilineal de medición y registro para el sistema de prueba trifásico.**

Las observaciones se tomaron durante 7 días consecutivos, de lunes a domingo, con tiempos de muestreo de una hora para cada una de las tres fases en el lado de baja tensión (400 Volt) del transformador. La carta X barra – S queda constituida por 24 subgrupos que representan las 24 horas y 7 muestras que representan los 7 días de registro.

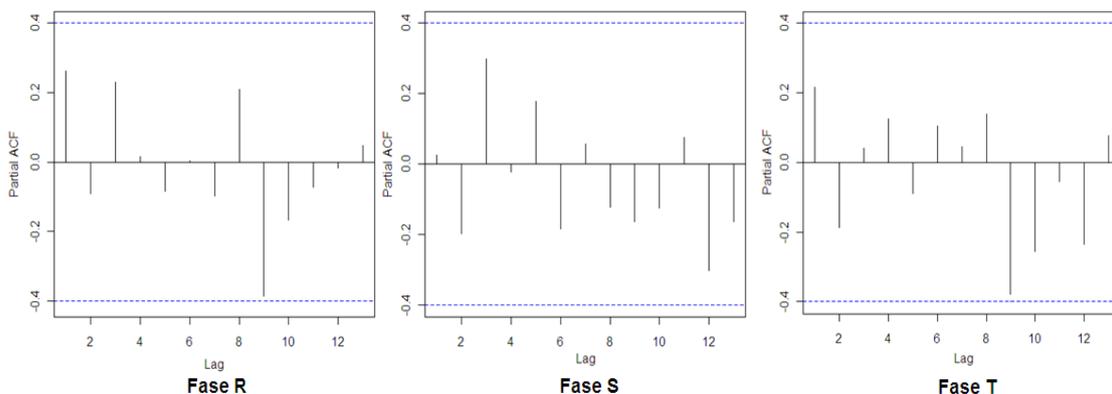
En la tabla A.2, del Anexo A. “Datos sistemas de prueba”, se muestran los registros de voltaje del sistema trifásico para las tres fases.

La tabla 5, muestra los resultados del p-valor para cada día de registro y para cada fase, luego de aplicar el Test de Normalidad de Shapiro-Wilk usando el software R [8].

Al observar los resultados de la tabla 5, y de la figura 8, se puede concluir que la hipótesis de normalidad se acepta y que las observaciones de la muestra trifásica de voltaje para cada fase son independientes, por lo cual, podemos construir las cartas de control X barra-S para cada fase. De la tabla 5, se puede observar que todos los valores de p-valor son mayores que 5%, lo que indica que la hipótesis de normalidad para las muestras trifásicas se acepta.

De la figura 8, se puede concluir que las observaciones no están correlacionadas, por lo tanto, las muestras son independientes. De las figuras 9 y 10, se puede observar que todas las observaciones se encuentran dentro de los límites de control, por tanto el proceso se encuentra dentro de control estadístico tanto para la media de los voltajes como para la variabilidad de las muestras.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	X barra
p-valor fase R	0,2572	0,1029	0,5158	0,3905	0,3469	0,8426	0,06521	0,5850
p-valor fase S	0,8663	0,06364	0,2428	0,1360	0,8634	0,1223	0,8576	0,3289
p-valor fase T	0,2403	0,9377	0,1141	0,8528	0,3758	0,6912	0,6129	0,1906



**Fig. 8. Gráfica del factor de autocorrelación parcial (partial ACF) muestra trifásica.**

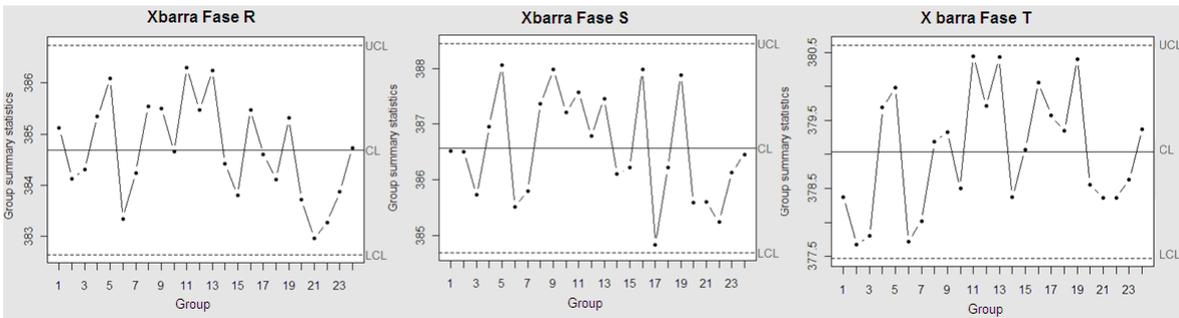


Fig. 9. Gráfica de control X barra para las fases R,S y T, muestra trifásica.

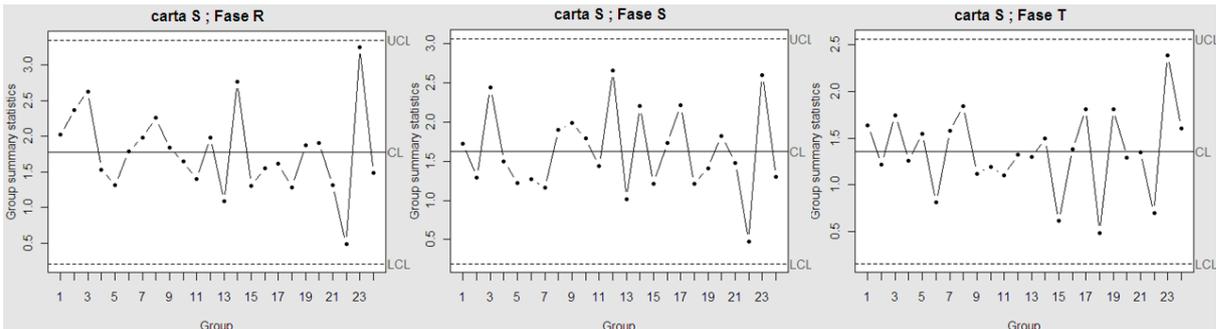


Fig. 10. Gráfica de control S para las fases R,S y T, muestra trifásica.

En la figura 11, se muestra el comportamiento del proceso frente a los límites de especificaciones de voltaje trifásico, que para este caso, corresponden a LSL=388(V) y USL=400(V), según lo señalado por la Norma Eléctrica Chilena 4/2003 [2]. Para procesos con límites de especificación bilaterales, es común asumir como valor nominal o Target la media de los límites de especificación [10], de acuerdo a esto, el valor Target para el sistema de prueba trifásico sería 394 (V).

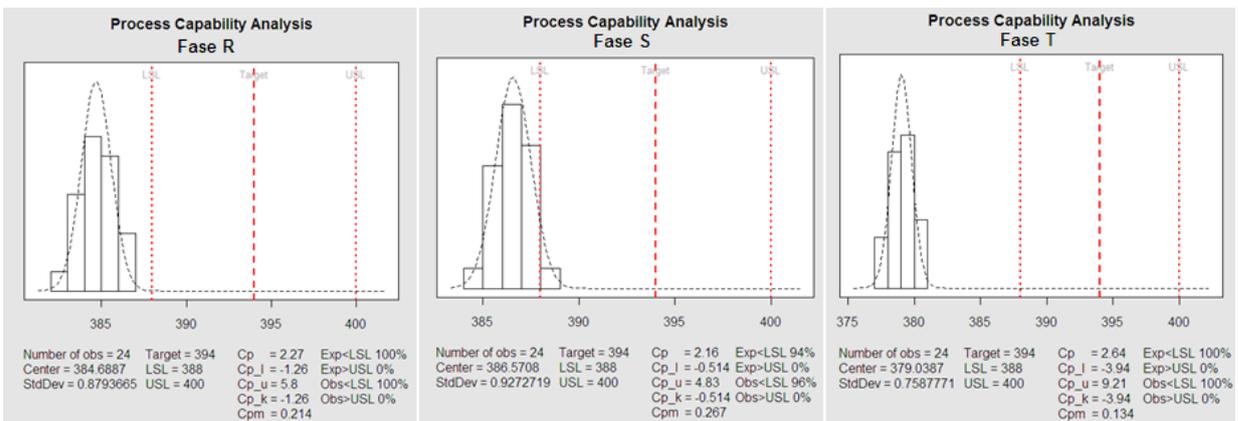


Fig.11. Análisis de capacidad de proceso para las fases R, S y T, muestra trifásica.

### ANALISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE PRUEBA TRIFASICO

La tabla 6, muestra un resumen con la interpretación de los resultados para cada fase del sistema de prueba trifásico.

<b>Tabla 6. Análisis de resultados del sistema de prueba trifásico.</b>	
<b>Índice</b>	<b>Interpretación</b>
Cp=2,27 ; fase R	Muy baja variabilidad, se tiene calidad Seis Sigma.
Cpk=-1,26 ; fase R	La media del proceso se encuentra fuera de las especificaciones.
K=155,2% ; fase R	Problemas serios de centralización negativa.
Cpm=0,214 ; fase R	El proceso no cumple las especificaciones por problemas de centralización.
Cp=2,16 ; fase S	Muy baja variabilidad, se tiene calidad Seis Sigma.
Cpk=-0,514 ; fase S	La media del proceso se encuentra fuera de las especificaciones.
K=123,8% ; fase S	Problemas serios de centralización negativa.
Cpm=0,267 ; fase S	El proceso no cumple las especificaciones por problemas de centralización.
Cp=2,64 ; fase T	Muy baja variabilidad, se tiene calidad Seis Sigma.
Cpk=-3,94 ; fase T	La media del proceso se encuentra fuera de las especificaciones.
K=249,4% ; fase T	Problemas serios de centralización negativa.
Cpm=0,134 ; fase T	El proceso no cumple las especificaciones por problemas de centralización.

## CONCLUSIONES

Al estudiar la muestra monofásica de voltaje se puede concluir que aunque el valor medio de caída de tensión (214, 52 V) se encuentra dentro del rango establecido por la norma eléctrica chilena [2], el proceso se encuentra fuera de control estadístico ya que en la carta X barra se encontró una observación que supera el límite superior de control. Con respecto a las muestras trifásicas se puede concluir que el proceso caída de tensión se encuentra bajo control, aunque ninguna de las fases cumpla con una caída de tensión menor que el 3% del voltaje nominal. Al considerar lo señalado por la norma eléctrica chilena [2], respecto de la caída de tensión en el punto más desfavorable, las fases R y S cumplen con una caída de tensión menor que el 5% del voltaje nominal. Los problemas en la muestra trifásica se presentan en el incumplimiento de los límites de las especificaciones de voltaje y en la excesiva descentralización hacia la izquierda de las muestras, aún cuando el índice de capacidad Cp es mayor que 2 [7], lo cual implica que el proceso tiene una calidad tipo Seis Sigma (esto es debido a que la variabilidad de la variable voltaje en las tres fases es muy baja). Luego de realizar el análisis estadístico de la caída de tensión para la muestras monofásicas y trifásicas se puede recomendar establecer algún tipo de regulación de voltaje para llevar la media del proceso al valor Target, de este modo, el proceso mejora aumentando su categoría en capacidad potencial, reduce los costos de explotación del sistema eléctrico debido a la descentralización y aumenta su calidad por el cumplimiento de las especificaciones. El análisis estadístico de la caída de tensión llevado a cabo en este trabajo permite esbozar las directrices y acciones que permiten la mejora del proceso ligado a la calidad del suministro eléctrico. Este tipo de enfoque se puede aplicar al estudio de otras variables eléctricas como potencia, factor de potencia y a otras relacionadas directamente con la calidad de suministro eléctrico como los son Pst y THD.

## REFERENCIAS

- [1] GÖNEN TURAN, "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw-Hill, 1986, ISBN 0-07-023707-7.
- [2] "Electricidad. Instalaciones de consumo en baja tensión", NORMA ELECTRICA CHILENA NCH Elec. 4/2003, Santiago de Chile: Superintendencia de Electricidad y Combustibles S.E.C., Octubre de 2003.
- [3] HITOSHI KUME, "Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad", Editorial Norma, 2002, ISBN 958-04-6719-6.

- [4] MONTGOMERY DOUGLAS C., "Control estadístico de la calidad", Limusa Wiley, 2005, ISBN 968-18-6234-1.
- [5] KANE VICTOR E., "Process Capability Indices", Journal of Quality Technology, 1986, vol. 18, n.1,p.41-52,ISSN 0022-4065, [consulta en mayo de 2012],Disponible en: <http://math.kennesaw.edu/~vkane/LSS Info/KaneJQT.pdf>
- [6] TAGUCHI G., "A tutorial on quality control and assurance - the Taguchi methods", Las Vegas, Nevada: ASA Annual Meeting, 1985.
- [7] GUTIERREZ PULIDO H., DE LA VARA R., "Control estadístico de la calidad y seis sigma", McGraw-Hill, 2009, ISBN 978-970-10-6912-7.
- [8] "The R Project for Statistical Computing". [Programa de computación], R Development Core Team, [consulta en marzo de 2012], Disponible en <http://www.r-project.org>
- [9] SHAPIRO S.S., WILK M.B., "An analysis of variance test for normality (complete samples)", Biometrika, 1965, vol. 52, p. 591-611, [consulta en julio de 2012], Disponible en: <http://www.math.utah.edu/~morris/Courses/ShapiroWilk.pdf>
- [10] STOUMBOS Z.G., "Process capability indices: overview and extensions", Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2002, vol.3, p. 191-210, [consulta en agosto de 2012], Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1468121801000220>

#### AUTOR

##### **Juan M. Astorga Gómez**

Ingeniero Eléctrico, Magister (c) en Ciencias con mención en Estadística Industrial, Profesor Asistente, Instituto Tecnológico, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.  
e-mail: [juan.astorga@uda.cl](mailto:juan.astorga@uda.cl)

**ANEXO A. DATOS SISTEMAS DE PRUEBA****Tabla A.1: "Datos sistema de prueba monofásico".**

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
0:00	212,8	214,9	215,4	215,4	216,3
1:00	213,3	211,6	213,4	213,2	214,2
2:00	218,5	212,5	219,6	219,2	218,8
3:00	216,4	211,8	212,5	213,7	213,9
4:00	215,1	212,9	213,6	214,6	213,7
5:00	213,8	213,9	213,9	214,8	214,4
6:00	213,7	213,7	215,4	212,1	212,5
7:00	215,2	216,1	214,2	216,2	214,6
8:00	211,9	213	213,3	211,9	214,5
9:00	216,7	211,8	212,1	214,6	213,5
10:00	216,3	215,6	216,3	214	214,3
11:00	214,2	211,7	213,4	211,8	212,1
12:00	212,8	218,7	211,5	215,4	214,5
13:00	213,7	211,3	212,4	216,8	211,7
14:00	216,5	214,4	216,7	214,7	216,4
15:00	211,9	212,3	215,4	216,9	218,3
16:00	212,8	215,7	212,4	217,8	212,1
17:00	216,7	216,7	215,4	212	214,9
18:00	215,7	212,4	216,4	214,3	216,2
19:00	214,8	217,4	212,7	212,5	217,5
20:00	212,7	212,1	218,1	216,3	216,1
21:00	211,5	213,4	212,9	213,8	215,8
22:00	216,8	215,2	215,8	216,1	217,2
23:00	212,7	216,3	216,1	214,8	215,4

Todos los valores de la tabla A.1 medidos en Volt RMS.

**Tabla A.2: "Datos sistema de prueba trifásico".**

Hora	Voltaje medio fase R	Voltaje medio fase S	Voltaje medio fase T
0:00	385,11	386,51	378,37
1:00	384,13	386,50	377,67
2:00	384,30	385,73	377,80
3:00	385,34	386,96	379,69
4:00	386,09	388,06	379,99
5:00	383,34	385,51	377,71
6:00	384,24	385,80	378,01
7:00	385,54	387,37	379,19
8:00	385,50	387,99	379,33
9:00	384,66	387,21	378,50
10:00	386,30	387,57	380,44
11:00	385,47	386,79	379,71
12:00	386,24	387,46	380,43
13:00	384,41	386,10	378,37
14:00	383,80	386,21	379,07
15:00	385,47	387,99	380,06
16:00	384,60	384,83	379,57
17:00	384,11	386,21	379,34
18:00	385,31	387,89	380,40
19:00	383,71	385,59	378,56
20:00	382,96	385,60	378,36
21:00	383,27	385,24	378,36
22:00	383,87	386,13	378,63
23:00	384,73	386,46	379,37

Todos los valores de la tabla A.2 medidos en Volt RMS.