



# REVISTA DE INVESTIGACIÓN POTENCIA & ENERGIA



## ÁREA ENERGIA

ENERGÍAS ALTERNATIVAS RENOVABLES Y CONVENCIONALES. MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS Y NO ROTATIVAS. APROVECHAMIENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS.

## ÁREA REDES

REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES, COMERCIALES Y DOMICILIARIAS. MANTENIMIENTO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN E INSTALACIONES ELÉCTRICAS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

## ÁREA CONTROL

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL, INTELIGENCIA ARTIFICIAL, APLICACIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. APLICACIONES DE LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.

# POTENCIA & ENERGÍA



## REVISTA POTENCIA & ENERGÍA

*"Artículos de investigación de la de carrera de Electricidad Industrial, que busca innovar y optimizar los sistemas eléctricos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la industria y el hogar "*

Potencia y Energía es una publicación semestral, auspiciada por la Carrera de Electricidad Industrial, para promover actividades de investigación, vinculación tecnológica e interacción social en la Facultad de Tecnología - UMSA.

Recibe trabajos escritos de docentes y estudiantes, que se publican bajo la responsabilidad de sus autores. Acogiendo temáticas libres sobre: 1) Investigación en eficiencia energética, redes industriales & eléctricas, materiales magnéticos, máquinas eléctricas y electrónica de potencia. 2) Investigación y desarrollo desde la Inteligencia Artificial a la Automatización Industrial. 3) Desarrollo de Energía Alternativa y Renovable.



<https://electricidadindustrial.umsa.bo/>



712 497 86

## COMITÉ EDITORIAL

M.Sc. Javier Marcelo Flores Monrroy  
EDITOR REVISTA POTENCIA & ENERGÍA

Lic. Juan Oswaldo Tiñini Apaza  
DIRECTOR DE CARRERA ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

## REVISTA POTENCIA & ENERGIA

Av. Arce #2299  
La Paz – Bolivia  
Cajón Postal 6911, Fax: 2441992  
Teléfono Carrera de Electricidad Industrial: 2443538  
Email: [electricidad@umsa.bo](mailto:electricidad@umsa.bo)

**Recepción de Trabajos escritos:**  
Secretaría Electricidad Industrial, 5to Piso Bloque A, Av. Arce 2299

## REVISTA POTENCIA & ENERGIA

**Depósito Legal: N° 4-3-117-2023 PO.**

Reservados todos los derechos de acuerdo a ley  
La Paz – Bolivia  
ISNI: 0000000121637383      ISSN: 2960-091X  
AÑO 1 VOL. 1, N° 1  
2023

## PRESENTACIÓN

Estimado lector,

La Carrera de “Electricidad Industrial” de la UMSA, tiene la satisfacción de presentar la revista de Investigación Tecnológica POTENCIA & ENERGIA en su 1ra. versión. El enfoque temático se concentra dentro las líneas de investigación establecidas en nuestro Instituto de Investigación y Aplicaciones Eléctricas que están divididas en 3 Áreas: 1). AREA ENERGIA: Generación de energía eléctrica por medio de inducción auto excitada. Desarrollo de energías alternativas y renovables. Estudio de materiales electromagnéticos. Protocolos de Peritaje de máquinas eléctricas rotativas y no rotativas, motores de inducción,



transformadores eléctricos de potencia trifásica y monofásica. 2). AREA REDES: Eficiencia energética en instalaciones eléctricas. Calidad energética en redes de distribución eléctrica. Generación distribuida. Seguridad industrial en redes de media y alta tensión. Nuevas técnicas de ejecución y mantenimiento en redes de distribución eléctrica. Protocolos de mantenimiento en redes de distribución 3). AREA CONTROL: Convertidores de potencia aplicado a sistemas eléctricos. Desarrollo de inteligencia artificial aplicado a la automatización industrial. Desarrollo de los sistemas SCADA (supervisión, control y adquisición de datos), HMI (interfaz hombre-máquina) en sistemas eléctricos. Instrumentación calibración bajo estándares nacionales e internacionales. Protocolos de medición de calidad de energía, medición puesta a tierra, contrastación de medidores, otros. Este trabajo es el resultado del aporte de los docentes de nuestra carrera. Como director de carrera es para mí un gran orgullo presentar la 1ra. versión de la revista, que busca aportar a la investigación científica en temas relacionados a la Electricidad y su aplicación al amplio mercado de la Industria Eléctrica.

Con gran alegría y satisfacción hago llegar mis felicitaciones a todos los que contribuyeron para consolidar la revista de Investigación, a docentes y equipo editor animándolos a todos seguir trabajando en las próximas versiones.

Es un aporte más de mi gestión como director de carrera. Finalmente ponemos a consideración de nuestros lectores la Revista POTENCIA & ENERGIA.

**Lic. Juan Oswaldo Tiñini Apaza**  
**DIRECTOR**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL**

## EDITORIAL



Es un honor para mí presentarles la primera edición de nuestra revista POTENCIA & ENERGÍA, escrita por los destacados docentes de nuestra carrera. Como decano de la Facultad de Tecnología, puedo afirmar con orgullo que los artículos que presentamos aquí son el fruto del trabajo, la experiencia y conocimientos de nuestros profesionales.

La electricidad industrial es un campo en constante evolución, y los avances tecnológicos y las nuevas tendencias del mercado están desafiando continuamente a nuestros profesionales a estar a la

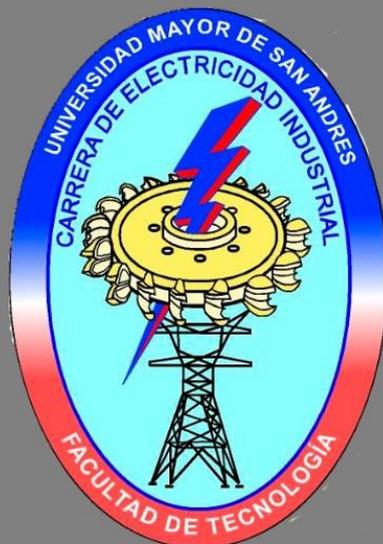
vanguardia de la innovación. En esta edición de la revista, nuestros docentes han explorado una amplia gama de temas, desde el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia hasta la aplicación de redes industriales.

**Lic. Eduardo Antonio Quinteros Rodríguez**  
**DECANO**  
**FACULTAD DE TECNOLOGÍA**

Con gran satisfacción presentamos la primera edición de la Revista POTENCIA & ENERGÍA, una publicación sobre investigación en el campo de la electricidad aplicada a la industria. Nuestra revista se ha concebido con el objetivo de ser un punto de encuentro para profesionales, investigadores, estudiantes y entusiastas del mundo de la electricidad industrial, donde podrán explorar las últimas tendencias, tecnologías y mejores prácticas en este emocionante campo. Estamos comprometidos en ofrecerles un espacio de aprendizaje, inspiración y debate, impulsando el desarrollo y la innovación en el ámbito eléctrico industrial. Les invitamos a sumergirse en las páginas de esta primera edición, y confiamos en que la Revista POTENCIA & ENERGÍA se convertirá en una referencia en su búsqueda de conocimiento y excelencia. ¡Bienvenidos a este nuevo y emocionante viaje!



**M.Sc. Javier Marcelo Flores Monrroy**  
**EDITOR**  
**REVISTA POTENCIA & ENERGIA**



# índice

## POTENCIA & ENERGÍA

EL GENERADOR DE INDUCCIÓN COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA (N.S. Mamani V.)	1
DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL PARA LOS CONTROLADORES SIMATIC S7-1200 DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL (J.M. FLORES M.)	7
INTERNET DE LAS COSAS PARA MONITOREAR CONDICIONES EN UN MOTOR TRIFÁSICO (C.B. MORALES R.)	11
ELEMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS INDUSTRIAS DE LA CIUDAD DE VIACHA (C. MENDOZA C.)	15
PROPUESTA DE MEDICIONES DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES DE TRANSFORMACION ENERGIZADAS (F.A. PARISACA C.)	19
MODELO DIDÁCTICO PARA LA LEY DE GAUSS EN LA DETERMINACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO (J.E. CHAMBI B.)	24
CONTROL DE PERDIDAS DE ENERGIA ELECTRICA EN REDES DE BAJA TENSION (R. CONDORI P.)	28

@ <https://electricidadindustrial.umsa.bo/>

712-49786



## CONVOCATORIA REVISTA “POTENCIA & ENERGÍA” Segunda Edición 2023

La carrera de Electricidad Industrial convoca a los señores Docentes y Estudiantes, a participar en la **Segunda Edición** de la **REVISTA “POTENCIA & ENERGÍA”**, gestión **2023**. Enviando trabajos escritos que presenten resultados de procesos de investigación para su posterior publicación: Teóricas, experimentales, comparativas, analíticas, divulgación y de solución concreta a diferentes problemas en el área de la electricidad y su aplicación técnica y tecnológica.

**COBERTURA DE LA REVISTA DE ACUERDO A LAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** 1) **AREA ENERGIA:** Generación de energía eléctrica por medio de inducción autoexcitada. Desarrollo de energías alternativas y renovables. Protocolos de peritaje para motores de inducción trifásica y monofásica. Protocolos de peritaje para transformadores eléctricos de potencia trifásico y monofásico. Estudio de materiales magnéticos. **AREA REDES:** Eficiencia energética en instalaciones eléctricas. Calidad energética en redes de distribución eléctrica. Generación distribuida. Seguridad industrial en redes de media y alta tensión. Nuevas técnicas de ejecución y mantenimiento en redes de distribución eléctrica. **AREA CONTROL:** Convertidores de potencia aplicado a sistemas eléctricos. Desarrollo de inteligencia artificial aplicado a la automatización industrial. Desarrollo de los sistemas SCADA (supervisión, control y adquisición de datos), HMI (interfaz hombre-máquina) en sistemas eléctricos. Instrumentación calibración bajo estándares nacionales e internacionales. Protocolos de medición de calidad de energía, medición puesta a tierra, contrastación de medidores, otros.

**AVANCES DE LA INVESTIGACIÓN:** Puede ser clasificada en una de las etapas siguientes: Concepción de ideas y perspectivas de impacto. Coordinación de elementos en la investigación fundamental. Implementación investigativa aplicada. Investigación y Desarrollo (I&D). Explotación comercial. Proyectos totalizadores y de convenios. Investigación operativa. Perspectiva productiva. Simulación. Mecanizado. Automatización. Optimización. Estandarización.

### ORGANIZACIÓN:

1. **Título:** Debe hacer la mayor referencia posible al contenido de la investigación.
2. **Autor:** Incluye nombre de (los) autor (es) e institución (es) a las que pertenecía durante la realización del trabajo y direcciones actuales.
3. **Resumen:** Informe conciso (250 palabras) de resultados y temas cubiertos en la investigación. Resaltando en lo posible las palabras claves. Opcional: Abstract (Inglés)
4. **Introducción:** Debe considerar. El interés o la importancia que reviste el tema objeto de investigación. Los antecedentes bibliográficos, metodológicos o de indagaciones precedentes. Formulación de los objetivos, hipótesis o interrogantes que persigue satisfacer la investigación.
5. **Desarrollo:** Debe considerar. El plan que animó la investigación. En los casos de investigaciones donde se incluyen prácticas o experimentaciones, describir brevemente las condiciones materiales, los procedimientos empleados y los resultados obtenidos.

**(5.1) Cuerpo del informe:** Resaltando toda aquella información que es necesaria para dar respuesta a los objetivos, hipótesis e interrogantes planteadas, y especialmente para justificar las conclusiones a las que él investigador o grupo de investigadores arribarán.

**(5.2) Inclusiones adicionales de importancia:** Gráficos, cuadros, fotografías, tablas en los casos que las características del tema así lo requieran. Uso de citas textuales y notas a pie de página.

6. **Conclusiones:** Debe considerar. La generación de los aspectos más importantes tratados en el desarrollo (cuerpo del informe).  
Una clara relación entre los resultados y objetivos que motivan la investigación. (Opciones para el autor: mostrarlas enumeradas o en forma de texto redactado).
7. **Bibliografía:** Debe considerar: Bibliografía citada, bibliografía consultada, bibliografía virtual. Según el marco teórico elegido para la investigación.

### FORMATO PARA LA PRESENTACIÓN:

- **Extensión de los trabajos:** máximo veinte hojas (carta).
- **Márgenes:** Derecho (25mm.), Izquierdo (30 mm.), Superior (30 mm.), Inferior (25 mm.). **Soporte físico:** Una copia en papel bond y otra en formato Word para Windows (via Whatsapp: 71249786, 73575270).
- **Tipo de letra:** Arial 10 para título, 9 para los contenidos y subtítulos.

**RECEPCIÓN TRABAJOS PARA SU PUBLICACIÓN SEGUNDA EDICIÓN: jueves 31 de agosto 2023**  
**Secretaría de Carrera, Av. Arce 2299, Quinto piso bloque A.**  
**Teléfono 2443538. Email: tininijta@gmail.com**

# EL GENERADOR DE INDUCCIÓN COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Néstor Saturnino Mamani Villca\*

**RESUMEN**

A partir del modelo clásico del motor de inducción[1], mediante cálculos fasoriales se transforma, al circuito equivalente por fase[2] del generador de inducción de estado estacionario a frecuencia variable; por el método de tensiones de nodo, se desarrollan ecuaciones algebraicas iterativas, con las cuales se determinan: la frecuencia angular eléctrica, el deslizamiento, la tensión generada y la potencia activa, para diferentes condiciones de carga. Mediante los ensayos de laboratorio de la máquina se obtienen los parámetros y la curva de magnetización, que nos permite conocer el punto de operación del generador de inducción; para el propósito se modela la curva de saturación mediante una ecuación polinomial de tercer orden. Finalmente se muestra que el voltaje en bornes, se desarrolla, gracias a los capacitores de excitación, que provee la potencia reactiva necesaria, para sostener la potencia activa generada.

**PALABRAS CLAVE:** Generador de inducción, estado estable, magnetización, saturación, regulación de tensión.

**ABSTRACT**

From the classic model of the induction motor, phase equivalent circuit the stationary state induction generator at variable frequency is transformed by means of fasorial calculations; by the node voltage method, iterative algebraic equations are developed, with which they are determined: the electric angular frequency, slip, the voltage generated and the active power, for different load conditions. Through the laboratory tests of the machine the parameters and the magnetization curve are obtained, which allows us to know the operating point of the induction generator; for the purpose the saturation curve is modeled using a third-order polynomial equation. Finally it is shown that the voltage in terminals, build, thanks to the excitation capacitors, which provides the necessary reactive power, to support the active power generated.

**KEYWORDS:** Induction generator, steady state, magnetization, saturation, voltage regulation.

**RESUMO**

A partir do modelo clássico do motor de indução, através de cálculos fasoriais, é transformado no circuito equivalente por fase do gerador de indução de estado estacionário a frequência variável; pelo método de tensões nodais, desenvolvem-se equações algébricas iterativas, com as quais se determinam: a frequência angular elétrica, o escorregamento, a tensão gerada e a potência ativa, para diferentes condições de carga. Através dos ensaios de laboratório da máquina, obtêm-se os parâmetros e a curva de magnetização, que nos permite conhecer o ponto de operação do gerador de indução; para o propósito, a curva de saturação é modelada através de uma equação polinomial de terceira ordem. Finalmente, é mostrado que a tensão nos terminais se desenvolve graças aos capacitores de excitação, que fornecem a potência reativa necessária para sustentar a potência ativa gerada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador de indução, estado estacionário, magnetização, saturação, regulação de tensão..

**History of the article:** Received 31/03/2023. Style review 17/04/2023. Accepted 20/03/2023

**INTRODUCCIÓN**

La máquina de inducción, es ampliamente usada como motor: en la industria para tracción y en aplicaciones comerciales para accionamiento de aparatos. Sin embargo, su conversión como generador de energía eléctrica, todavía no es practicable, debido a que está en etapa de investigación y desarrollo tecnológico.

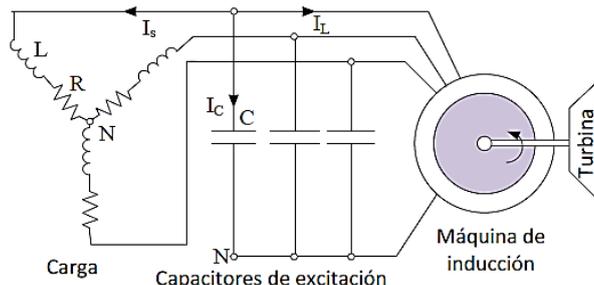
El generador de inducción, tiene notables ventajas sobre los alternadores síncronos convencionales: es robusto, de construcción simple, necesita mantenimiento mínimo porque el rotor no tiene escobillas, de fácil operación, tiene alta relación potencia por unidad, bajo costo, de alta confiabilidad y no necesita excitación separada de corriente directa; debido a estas ventajas el generador de inducción auto-excitado, ha surgido como un candidato propio para la generación de potencia aislada.

En el aspecto social el uso del generador de inducción en una micro-central o pico-central hidráulica, eólica y geotérmica, ofrece una nueva perspectiva para el desarrollo socio-económico en zonas con pocos habitantes y alejados de la red de voltaje de distribución eléctrica, que es la premisa de la generación distribuida.

**DESARROLLO**

**Generador de inducción en régimen de estado estable**

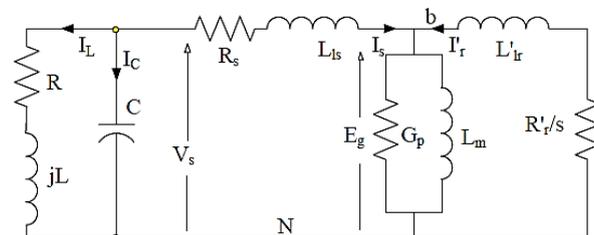
Se conectan capacitores de excitación en bornes de la máquina de inducción, que proporciona la energía reactiva necesaria, para sostener el voltaje desarrollado, que se inicia por el magnetismo remanente del hierro [3], como se muestra en la Figura 1.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 1:** Circuito equivalente del generador de inducción trifásico

La Figura 2 representa el circuito equivalente por fase, obtenida a partir de las figuras 1 y 2. Sin embargo el generador en funcionamiento presenta voltaje y frecuencia variables, que dependen de la capacitancia de excitación, carga y velocidad angular del rotor.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2:** Circuito equivalente del generador de inducción trifásico por fase

**Modelo del generador en función de la frecuencia angular eléctrica**

El deslizamiento se define de la siguiente forma:

$$s = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (1)$$

donde:

- $\omega$ : es la frecuencia angular eléctrica de estator en rad/s.
- $\omega_r$ : frecuencia angular del rotor proporcional al movimiento de la turbina, en rad/s.

En la figura 2, la f.e.m. inducida en términos fasoriales [4] es:

$$\dot{E}_g = -\dot{I}_r' \left( \frac{R_r'}{s} + j \omega L_{lr}' \right) \quad (2)$$

Reemplazando la expresión (1) en (2), se tiene:

$$\dot{E}_g = -\dot{I}_r' \left( \frac{\omega R_r'}{\omega - \omega_r} + j \omega L_{lr}' \right) \quad (3)$$

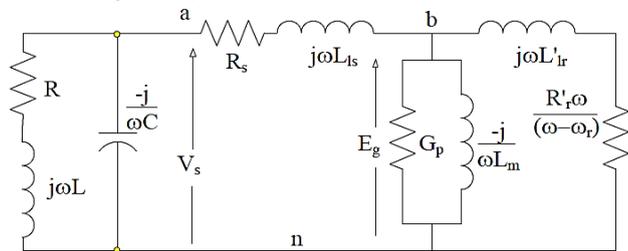
donde:  $L_{ls}$ , es la inductancia de dispersión del rotor reflejado al estator. El voltaje en bornes del estator está dado por:

$$\dot{V}_s = \dot{I}_s (R_s + j \omega L_{ls}) + \dot{E}_g \quad (4)$$

donde:  $L_s$ , es la inductancia de dispersión del estator. La tensión sobre la carga y la excitación está dada por:

$$\dot{V}_s = \dot{I}_L (R + j \omega L) = \dot{I}_C \frac{1}{j \omega C} \quad (5)$$

Las ecuaciones fasoriales (3) y (5) se expresan en función de la frecuencia angular, en el circuito equivalente de la Figura 4. Si el generador es manejado por una turbina regulada, en la cual la velocidad angular del rotor  $\omega_r$  es constante, esperaríamos que la frecuencia angular eléctrica sea constante, pero este parámetro varía además con la carga R-L y la capacitancia de excitación C.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3:** Circuito equivalente del generador de inducción trifásico por fase y por frecuencia

### Tensiones de Nodo

De la figura 3, previamente se define la admitancia entre a y n:

$$\dot{Y}_a = \frac{1}{R + j \omega L} + j \omega C \quad (6)$$

La admitancia entre a y b:

$$\dot{Y}_s = \frac{1}{R_s + j \omega L_{ls}} \quad (7)$$

La admitancia magnetizante consta de la conductancia de pérdidas  $G_p$  y la susceptancia magnetizante  $B_m$ , que están en paralelo, dado por:

$$\dot{Y}_m = G_p - j \frac{1}{\omega L_m} = G_p - j B_m \quad (8)$$

La admitancia de rotor, es:

$$\dot{Y}_r = \frac{1}{\frac{R_r' \omega}{\omega - \omega_r} + j \omega L_{lr}'} = G_r - j B_r \quad (9)$$

$$\text{donde: } G_r = \frac{\frac{R_r' \omega}{\omega - \omega_r}}{\left( \frac{R_r' \omega}{\omega - \omega_r} \right)^2 + (\omega L_{lr}')^2} \quad (10)$$

$$\text{y } B_r = \frac{\omega L_{lr}'}{\left( \frac{R_r' \omega}{\omega - \omega_r} \right)^2 + (\omega L_{lr}')^2} \quad (11)$$

Las tensiones de nodo en a y b, están dadas por:

$$(\dot{V}_s - \dot{E}_g) \dot{Y}_s + \dot{V}_s \dot{Y} = \dot{0} \quad (12)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{V}_s) \dot{Y}_s + \dot{E}_g (\dot{Y}_m + \dot{Y}_r) = \dot{0} \quad (13)$$

Resolviendo las ecuaciones (12) y (13), se obtiene:

$$\frac{\dot{Y}_a \cdot \dot{Y}_s}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_s} + \dot{Y}_m + \dot{Y}_r = \dot{0} \quad (14)$$

$$\dot{Y}_b + \dot{Y}_m + \dot{Y}_r = \dot{0} \quad (15)$$

Donde:

$$\dot{Y}_b = \frac{\left( \frac{1}{R + j \omega L} + j \omega C \right) \cdot \left( \frac{1}{R_s + j \omega L_{ls}} \right)}{\frac{1}{R + j \omega L} + j \omega C + \frac{1}{R_s + j \omega L_{ls}}} \quad (16)$$

$$\dot{Y}_b = G_b + j B_b = \frac{R_b}{R_b^2 + X_b^2} + j \frac{X_b}{R_b^2 + X_b^2} \quad (17)$$

$$R_b = \frac{R}{\omega C} \frac{\omega L - \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{(R)^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} + R_s \quad (18)$$

$$X_b = \frac{1}{\omega C} \frac{\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \omega L + R^2}{(R)^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - \omega L_{ls} \quad (19)$$

$$G_b + G_p + G_r = 0 \quad (20)$$

$$B_b - B_m - B_r = 0 \quad (21)$$

La ecuación de conductancias (20), es independiente de la susceptancia magnetizante  $B_m$ , la cual es útil para calcular la frecuencia angular eléctrica  $\omega$ . Con la ecuación (21), se calcula la susceptancia magnetizante  $B_m$ , luego la inductancia magnetizante  $L_m$  mediante la expresión (8), y con la curva de magnetización se determina el voltaje inducido de entrehierro  $E_g$ .

**Iteración de admitancias**

Reemplazando (10) en la ecuación (20), este se puede escribir de la siguiente forma:

$$G_b(\omega) + G_p + \frac{1}{\omega R_r'^2 + (\omega - \omega_r)^2 L_r'^2} = 0 \quad (22)$$

donde, la frecuencia angular eléctrica  $\omega$  es la incógnita y los demás parámetros son constantes, dicha ecuación se resuelve por medios iterativos. Para el procedimiento, del tercer término de esta ecuación se despeja:

$$\omega = \omega_r - \frac{G_b(\omega) + G_p}{R_r'} \left[ R_r'^2 + (\omega - \omega_r)^2 L_r'^2 \right] \omega \quad (23)$$

Los términos de  $\omega$  del miembro derecho son valores actuales y el término de  $\omega$  del miembro izquierdo es el valor futuro, expresado en términos iterativos, resulta:

$$\omega_{k+1} = \omega_r - \frac{G_b(\omega_k) + G_p}{R_r'} \left[ R_r'^2 + (\omega_k - \omega_r)^2 L_r'^2 \right] \omega_k \quad (24)$$

donde:  $\omega_k$  y  $\omega_{k+1}$  denotan el  $k$ -ésimo y  $k+1$ -ésimo iteración, respectivamente. Por tanto se puede determinar el deslizamiento con la expresión (1).

**Voltajes y potencia de salida**

La corriente del rotor se determina con ecuación fasorial (3), de la forma:

$$\overset{\circ}{I}_r = - \frac{\overset{\circ}{E}_g}{\frac{R_r'}{s} + j \omega L_r'} \quad (25)$$

Por la primera ley de Kirchooff, la corriente de estator se determina de:

$$\overset{\circ}{I}_s = \overset{\circ}{E}_g \left( G_p + \frac{1}{j\omega L_m} \right) - \overset{\circ}{I}_r \quad (26)$$

Mediante la ecuación (4) se calcula el voltaje en bornes del generador, con lo cual se obtiene la potencia de salida [5], dado por:

$$P = \Re \left( \frac{V_s^2}{R - j\omega L} \right) \quad (27)$$

**Medición de Parámetros**

Para una máquina de inducción de 2.2 [kW], 380 [V], voltaje de fase a fase, en conexión estrella, 5.1 [A] y 1430 [rpm]. Se han obtenido por el ensayo de rotor trabado, como se muestra en la Fotografía 1, los siguientes parámetros de la Tabla 1 [6]:



**Fotografía 1:** Ensayo en rotor trabado y en vacío **Crédito:** NS. Mamani V., 2023

**Tabla 1**  
**Parámetros de la máquina de inducción**

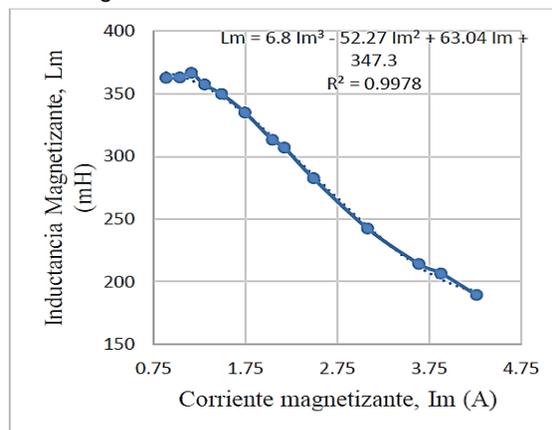
$R_s$	3.76	[ $\Omega$ ]
$R_r'$	1.88	[ $\Omega$ ]
$L_s$	14.38	[mH]
$L_r'$	14.38	[mH]
$F$	0.00357	[N m s]
$J$	0.0243	[kg m <sup>2</sup> ]
$p$	2	
$L_m$	306.57	[mH]

**Fuente:** Elaboración propia

Los datos de la curva de saturación, se obtienen por el ensayo de vacío, cercano a la velocidad sincrónica del motor de inducción. La inductancia magnetizante es función de la corriente magnetizante, se puede expresar en la forma:  $L_m = f(I_m)$ , mediante líneas de tendencia, con la función polinómica.

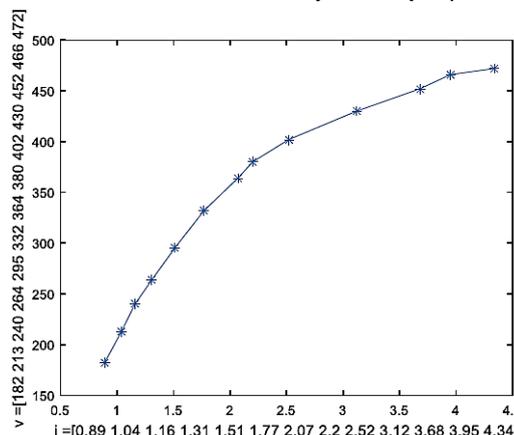
$$L_m = 6.8 I_m^3 - 52.27 I_m^2 + 63.04 I_m + 347.3 \quad (28)$$

La figura 4, muestra los valores medidos y calculados de la curva de magnetización.



**Figura 4:** Efecto de saturación del núcleo estatorrotor. **Fuente:** Elaboración propia

La figura 5, muestra el comportamiento de la saturación en términos de la corriente absorbida y el voltaje aplicado.



**Figura 5:** Corriente de estator y voltaje de línea (rms) para la simulación de saturación del generador de 2.2 kW. **Fuente:** Elaboración propia

**Resultados de Simulación**

En la figura 6, se observa, que el generador de inducción para una carga resistiva pura, presenta un voltaje de salida,

que cambia radicalmente con la variación de la carga, únicamente presenta un voltaje de 220 V, para una resistencia de 53 Ω, pero a medida que aumenta la resistencia el voltaje en bornes va en crecimiento y supera los 300 V, lo que significa que en vacío, el generador ya presenta sobretensión.

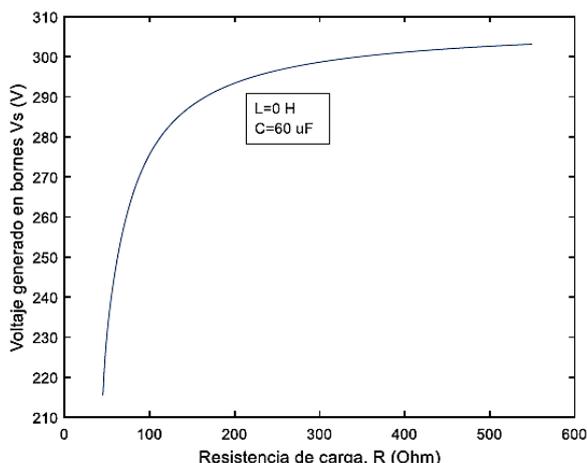


Figura 6: Voltaje generado contra resistencia pura de carga. Fuente: Elaboración propia

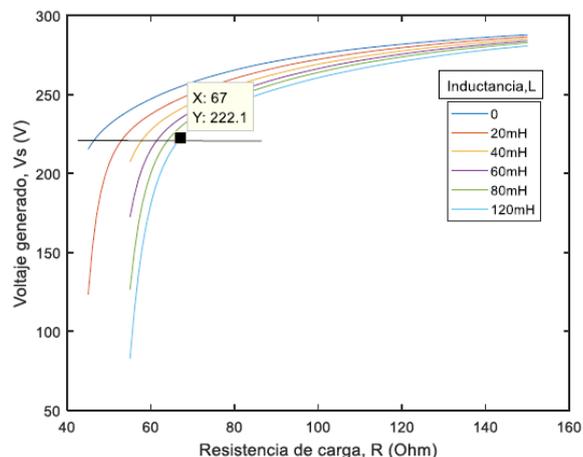


Figura 7: Voltaje generado contra resistencia de carga con inductancia fija. Fuente: Elaboración propia

En la figura 7, se ve que con carga resistiva-inductiva, el comportamiento es variable con la carga, es adverso, por los voltajes elevados que se generan, al liberar carga, alcanza valores elevados, lo cual puede dañar el equipo que alimenta. Los voltajes máximo y mínimo están definidos por la CBE [7], en el Reglamento de Distribución de Electricidad en el artículo 13 sobre Niveles de Tensión, en el anexo, se tiene:

Tabla 2 Niveles de tensión

NIVEL DE CALIDAD	TENSIÓN (V)	RANGO ADMITIDO MAXIMO	RANGO ADMITIDO MINIMO
Calidad 1	220	236.5	203.5
Calidad 2	220	239.8	200.2

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el generador sin un control de voltaje adecuado, presenta la peor regulación de tensión, ya que sale de los márgenes establecidos en la tabla 2,

inaceptable por la norma mencionada.

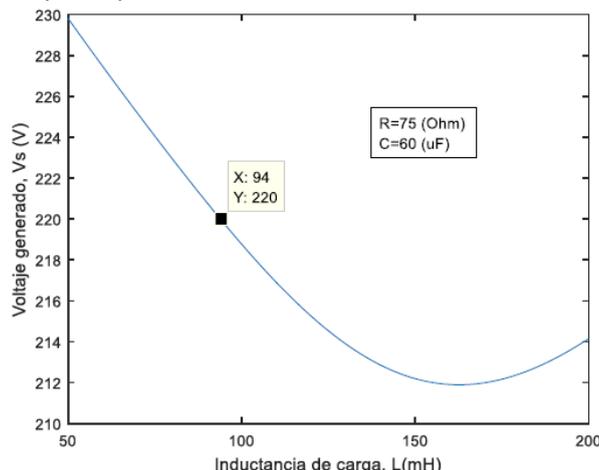


Figura 8: Voltaje generado contra inductancia de carga. Fuente: Elaboración propia

En la figura 8, al aumentar la inductancia, que significa bajar el factor de potencia, el voltaje generado disminuye, lo cual puede beneficiar de manera positiva, porque la inductancia proporciona un efecto regulador de voltaje.

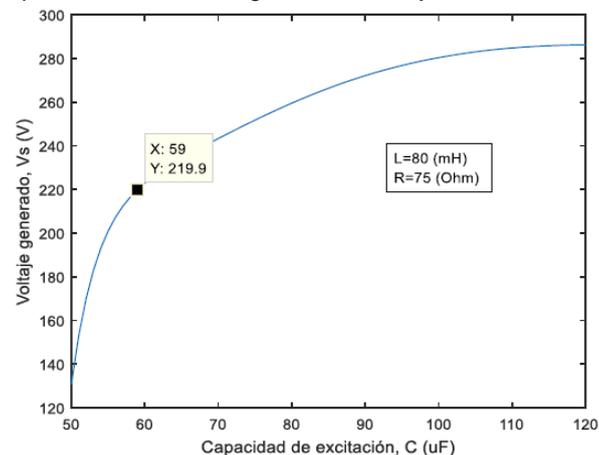


Figura 9: Voltaje generado contra capacitancia de excitación. Fuente: Elaboración propia

En la figura 9, se muestra el efecto de variación del voltaje, con el aumento de capacitancia, que es factor determinante para regular el voltaje generado, debido a que para el control se usa la variación de capacidad, mediante técnicas de conmutación de capacitores, reactores estáticos o modulación de ancho de pulso.

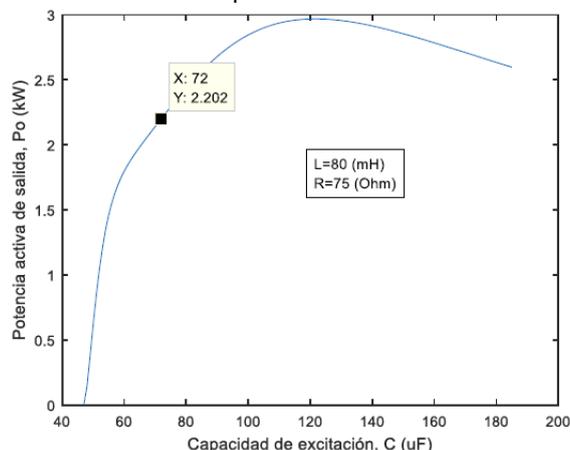


Figura 10: Potencia de salida contra resistencia de capacitancia de excitación. Fuente: Elaboración propia

La potencia de salida es un parámetro importante para determinar las condiciones de operación del generador, como se puede ver en la figura 8, que a la capacidad de C, de 72  $\mu\text{F}$ , entrega la potencia nominal de la máquina que es de 2.2 kW, sin embargo si se aumenta la capacidad, puede sobrecargar al generador y sobrecalentar el bobinado de este, la potencia de salida alcanzaría un máximo de 3 kW, para la cual no está diseñado.

En la tabla 3, se muestran las variables eléctricas para evaluar el funcionamiento del generador, calculadas con las ecuaciones (24) al (27).

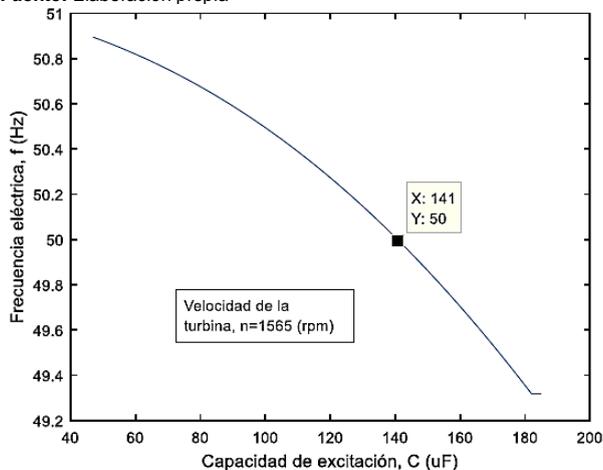
**Tabla 3**  
**Valores de estado estable simulados**

R	75 $\Omega$	Resistencia de carga
L	80 mH	Inductancia de carga
C	60 $\mu\text{F}$	Capacidad de excitación
Vs	220 V	Voltaje fase-neutro generado

Frecuencia eléctrica estator, [Hz], $f_s = 48.7186$
Inductancia magnetizante, [mH], $L_m = 273.4888$
Voltaje de entrehierro, [V], $E_g = 219.15$

Deslizamiento [100%], $s = -2.63$
Corriente del rotor, [A], $I_r = 3.36$
Corriente de magnetizante, [A], $I_m = 2.68$
Corriente de estator, [A], $I_s = 4.15$
Corriente de carga, [A], $I_l = 2.82$
Corriente de capacitor, [A], $I_c = 4.09$
Factor de potencia, $f_p = 0.95$

Fuente: Elaboración propia



**Figura 11:** Frecuencia eléctrica contra capacitancia de excitación. Fuente: Elaboración propia

La figura 11, representa el comportamiento del generador en cuanto a la respuesta en frecuencia, dicha variable cambia en un rango de 49.2 a 51 Hz, cuando se varía la capacidad, que puede ser crítico para cargas sensibles a la frecuencia, también se establece en el gráfico que para obtener 50 (Hz), la turbina debe girar a 1565 (rpm).

**Resultados experimentales**

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de circuitos II de la carrera de Electricidad, los resultados como se pueden apreciar en la tabla 4, son aceptables, ya

que están dentro del rango de error menor al 5%, solo la potencia y el factor de potencia salen del margen aceptable, pero no presenta mucha dispersión. Por tanto los resultados de simulación elaborados a partir de las ecuaciones planteadas con el modelo estacionario se validan con los resultados experimentales

**Tabla 4**  
**Valores de estado estable simulados**

<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>300</b>		
<b>L (mH)</b>	<b>0</b>		
<b>nr (rpm)</b>	<b>1445</b>		
<b>Variable</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Error (%)</b>
Vs (V)	255.8	254.67	0.44
Is (A)	4.54	4.49	1.11
I <sub>l</sub> (A)	0.84	0.85	-1.18
P3fs (W)	765	671.26	13.96
Q3fs (VAr)	3403	3366	1.10
f <sub>ps</sub> (pu)	0.219	0.19	15.26
<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>260</b>		
<b>L (mH)</b>	<b>0</b>		
<b>nr (rpm)</b>	<b>1441</b>		
<b>Variable</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Error (%)</b>
Vs (V)	251.1	251.52	-0.17
Is (A)	4.5	4.44	1.35
I <sub>l</sub> (A)	0.98	0.97	1.03
P3fs (W)	825	753.87	9.44
Q3fs (VAr)	3289	3263.3	0.79
f <sub>ps</sub> (pu)	0.243	0.22	10.45
<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>260</b>		
<b>L (mH)</b>	<b>68</b>		
<b>nr (rpm)</b>	<b>1446</b>		
<b>Variable</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Error (%)</b>
Vs (V)	252.9	252.06	0.33
Is (A)	4.4	4.39	0.23
I <sub>l</sub> (A)	0.91	0.97	-6.19
P3fs (W)	818	751.97	8.78
Q3fs (VAr)	3236	3235.8	0.01
f <sub>ps</sub> (pu)	0.245	0.226	8.41

Fuente: Elaboración propia



**Fotografía 2:** Mediciones en el generador de inducción. Crédito: NS. Mamani V. 2023



**Fotografía 3:** Generador de inducción autoexcitado con carga y medidor de calidad de energía. Crédito: NS. Mamani V. 2023



**Fotografía 4:** Voltajes, desfases, frecuencia y diagrama fasorial del generador de inducción en régimen estacionario con medidor de calidad de energía. Crédito: NS. Mamani V. 2023

### CONCLUSIONES

El circuito equivalente, del generador de inducción bajo ciertas condiciones de carga y excitación, determina el grado de saturación de la máquina mediante el cálculo de la inductancia magnetizante que permite conocer el punto de operación y funcionamiento óptimo.

Con el conocimiento de la tensión de entrehierro, la frecuencia eléctrica en bornes y el deslizamiento, se establecen las condiciones de operación del generador y las curvas obtenidas, determinarán las condiciones para realizar el control de tensión y frecuencia.

El deslizamiento presenta un valor negativo y pequeño, lo cual muestra que la máquina trabaja como generador, entregando potencia activa a la carga, si este deslizamiento cambia de signo, significaría que la máquina se desempeña como motor, lo cual es factible, ya que en los sistemas de potencia, se usa para inyectar potencia reactiva a la red y así regular tensión.

Las variables eléctricas en régimen de estado estable, determinan el funcionamiento del generador de inducción auto-excitado. Con el conocimiento de las variables eléctricas y magnéticas se pueden fijar límites y márgenes de funcionamiento que permitirá plantear la estrategia de control del generador de inducción.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acuña, D. (2013). Opciones de control de potencia activa y reactiva en aerogeneradores con generador de inducción doblemente excitado (DFIG). Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Eléctrico. Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Eléctrica.
- [2] Aller, J. Bueno, A. Machado, G. Salazar, L. (2012). Evaluación Energética de Motores de Inducción Sub Cargados, en Presencia de Armónicas y Desequilibrios de Tensión. Universidad Simón Bolívar. III Congreso Venezolano De Redes Y Energía Eléctrica.
- [3] Ida, N. (2015). Engineering Electromagnetics (Third Edition). Springer International Publishing Switzerland.
- [4] Makarov, S. N. Ludwig, R. Bitar, S. J. (2016). Practical Electrical Engineering. Springer International Publishing Switzerland.
- [5] Mahdavi, A. T. Aghbolaghi, A. J. Bizon, N. Blaabjerg, F. Editors. (2017). Reactive Power Control in AC Power Systems Fundamentals and Current Issues. Springer International Publishing AG.
- [6] Amadeo, L. (2015). Diseño Construcción y Puesta en Operación de un Banco de Pruebas para el generador de Inducción. Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería. México.
- [7] CBE, Cámara Boliviana de Electricidad (2017). Decreto supremo 26607. Reglamento de calidad de distribución de electricidad (RCDE) (aplicable a la información relevada a partir del mes de mayo de 2002). Bolivia. Caceres, F. (2018). Modelo no lineal para el análisis dinámico del motor de inducción trifásico. Universidad nacional de ingeniería facultad de ingeniería mecánica. Perú.
- [8] Perez, I. (2013). Estimación de los Parámetros de la Máquina de Inducción mediante Técnicas Metaheurísticas. Universidad de Jaen, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [9] Puerta, J. Arias, J. (2013). Libro Digital de la Máquina de Inducción Trifásica. Universidad Tecnológica De Pereira Facultad De Tecnología Programa De Tecnología Eléctrica Pereira.
- [10] Slobodan, N. V. (2013). Electrical Machines. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.

(\*), Ph.D. en Ciencias y Tecnología, Ingeniero Eléctrico.  
 Docente Electricidad Industrial y Electromecánica.  
 Facultad de Tecnología – UMSA.

# DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL PARA LOS CONTROLADORES SIMATIC S7-1200 DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

Javier Marcelo Flores Monroy\*

**RESUMEN**

El objetivo de esta investigación es diseñar un sistema de comunicación basado en el software TIA Portal de SIEMENS para controlar 6 controladores SIMATIC S7-1200 en el Laboratorio de Automatismos y Sistemas de Control de la carrera de Electricidad Industrial. Se utilizará una red pública de internet para garantizar el acceso seguro al controlador Siemens desde cualquier parte del mundo. Se llevó a cabo un estudio preliminar detallado antes de realizar el diseño y se implementó físicamente utilizando los elementos de red dispuestos en la carrera de Electricidad Industrial. Se realizaron pruebas de acceso remoto para comprobar su correcto funcionamiento..

**PALABRAS CLAVE:** Automatización, PLC, SIMATIC ST-1200, Sistemas de Control, Red de comunicación industrial.

**ABSTRACT**

The objective of this research is to design a communication system based on the SIEMENS TIA Portal software to control 6 SIMATIC S7-1200 controllers in the Automation and Control Systems Laboratory of the Industrial Electricity major. A public internet network will be used to ensure secure access to the Siemens controller from anywhere in the world. A detailed preliminary study was carried out before making the design and it was physically implemented using the network elements arranged in the Industrial Electricity major. Remote access tests were carried out to verify its correct operation..

**KEYWORDS:** Automation, PLC, SIMATIC S7-1200, Control Systems, Industrial Communication Network.

**RESUMO**

O objetivo desta pesquisa é projetar um sistema de comunicação baseado no software TIA Portal da SIEMENS para controlar 6 controladores SIMATIC S7-1200 no Laboratório de Automação e Sistemas de Controle do curso de Eletricidade Industrial. Uma rede pública de internet será utilizada para garantir o acesso seguro ao controlador Siemens de qualquer parte do mundo. Foi realizado um estudo preliminar detalhado antes de realizar o projeto e ele foi implementado fisicamente usando os elementos de rede disponíveis no curso de Eletricidade Industrial. Testes de acesso remoto foram realizados para verificar seu correto funcionamento..

**PALAVRAS-CHAVE:** Automação, PLC, SIMATIC S7-1200, Sistemas de Controle, Rede de comunicação industrial..

**History of the article:** Received 30/03/2023. Style review 11/04/2023. Accepted 15/04/2023

**INTRODUCCIÓN**

Las redes de comunicación pueden ser utilizadas en sistemas de control para intercambiar información entre dos o más partes. Para ello, la información se transfiere de un tercero a otro, que la recibe, la procesa y la almacena o descarta en función de su preminencia. Cuando se añade un componente industrial como un PLC, se puede hablar de *comunicación industrial*.

Aunque una red de comunicaciones puede comprender solo dos equipos con un circuito entre ellos, el término red generalmente se refiere a conectar numerosos dispositivos juntos, para permitir el intercambio de datos entre dispositivos a través de un solo circuito o una red redundante.

Las redes de comunicación industrial son la columna vertebral de cualquier arquitectura de sistemas de automatización, ya que proporcionan un poderoso medio de intercambio de datos, controlabilidad de información y flexibilidad para conectar varios dispositivos. [1]

En los sistemas SCADA<sup>1</sup>, acostumbra haber una red de comunicaciones de algún tipo que conecta los PLC individuales a la interfaz del equipo del operador en la sala de control central.

También puede haber redes utilizadas en niveles inferiores en la arquitectura del sistema de control, para comunicaciones entre diferentes PLC en el mismo subsistema o instalación industrial, así como para comunicaciones entre dispositivos de campo y PLC individuales.

<sup>1</sup> Sistema SCADA: Herramienta de automatización y control industrial utilizada en los procesos productivos, que pueden controlar, supervisar, recopilar datos y generar informes a distancia mediante una aplicación informática.

**DESARROLLO****Redes de comunicación industrial**

Las redes de comunicación industrial son un conjunto de tecnologías y protocolos que permiten la comunicación entre dispositivos en un entorno industrial. Los puntos más relevantes incluyen la necesidad de un alto nivel de fiabilidad y seguridad en la transmisión de datos, la capacidad de soportar grandes volúmenes de datos y la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas de diferentes fabricantes [2]. Las tecnologías más comunes incluyen Ethernet industrial, PROFIBUS, PROFINET, DeviceNet y Modbus. La elección de la tecnología dependerá de los requisitos específicos del sistema y de los dispositivos utilizados. Además, la implementación de redes de comunicación industrial debe considerar la infraestructura de la red, la gestión de la configuración y la monitorización del rendimiento para garantizar una comunicación eficiente y confiable [3].

**Protocolo ethernet industrial [4]**

El protocolo Ethernet Industrial (también conocido como Ethernet/IP) es una tecnología de red utilizada en entornos industriales que permite la comunicación de dispositivos a través de una red Ethernet. Los aspectos importantes del protocolo incluyen la capacidad de soportar grandes volúmenes de datos, la interoperabilidad con otros dispositivos y sistemas, la capacidad de trabajar en entornos hostiles y la seguridad en la transmisión de datos.

**Red ethernet industrial [4]**

Una red Ethernet Industrial permite unir las redes administrativas de una empresa (Contabilidad, RRHH, Gestión de materias primas, ERP, Logística y otros), las de control y supervisión de los procesos productivos (MES, SCADA, HMI, autómatas, controladores, RTU's) y la de los dispositivos (sensores, como transductores, células fotoeléctricas, actuadores, PLC's) para que funcionen en una única red.

Aunque existen varios protocolos de red industrial que soportan una variedad de requisitos de comunicación en la planta de producción, los más conocidos en una red de ethernet industrial son: Modbus TCP/IP, PROFINET, EtherCat, EtherNet/IP, CANopen y DeviceNet.

**A) Modbus TCP/IP:** un protocolo de comunicación utilizado en la automatización industrial para la transmisión de datos entre dispositivos, que utiliza el protocolo TCP/IP como medio de transporte.

**B) PROFINET:** un protocolo de comunicación en tiempo real utilizado para la automatización industrial, que soporta Ethernet Industrial como medio físico y TCP/IP como protocolo de transporte.

**C) EtherCAT** es un protocolo de Ethernet Industrial, Introducido en 2003, que ofrece comunicación en tiempo real en una configuración maestro/esclavo para sistemas de automatización.

**D) Ethernet/IP:** un protocolo de comunicación basado en Ethernet Industrial que permite la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes y que soporta el modelo de comunicación de cliente/servidor.

**E) CANopen:** un protocolo de comunicación de bus de campo utilizado para la automatización industrial, que soporta la comunicación a través de Ethernet Industrial mediante el uso de adaptadores específicos.

**F) DeviceNet:** un protocolo de comunicación utilizado para la automatización industrial, que se basa en CAN y que soporta Ethernet Industrial como medio de transporte.

**Planificación y diseño de la red**

Antes de iniciar la etapa de planificación, se debe realizar una preparación previa dónde se identifiquen las características técnicas de la red. Estas características están formadas tanto por los tipos de dispositivos a conectarse (PLC), las aplicaciones utilizadas, los servicios empleados, los equipos utilizados y los medios de transmisión a adoptar.

En estudio de caso, la carrera de Electricidad Industrial implementará una red de comunicación industrial en entorno abierto de internet, incluyendo dispositivos industriales para el laboratorio de automatización.

**Caracterización de la red**

Para la comunicación remota, se utiliza una red simplificada de dos capas (Figura 1) según el modelo de Cisco: Acceso (conexión del PLC y salidas) y Distribución-Núcleo (control y enrutamiento del tráfico). Este diseño se llama red de núcleo contraído, uniendo las capas núcleo y distribución. La decisión se basa en una red corporativa no muy grande y en una sola planta en Electricidad Industrial.

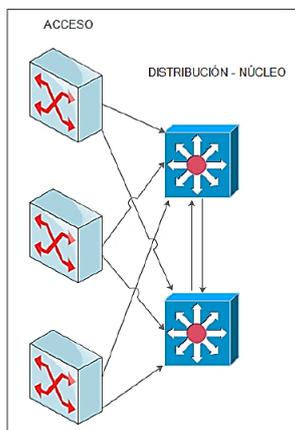


Figura 1: Modelo jerárquico de dos capas. Fuente [5].

Por limitaciones financieras, se emplea un modelo jerárquico compacto de dos capas (Figura 2). Este modelo conserva características de modelos jerárquicos previos, pero pierde tolerancia a fallos en la capa de distribución-núcleo. Si falla esta capa, la infraestructura de red dejaría de funcionar adecuadamente, a diferencia del modelo anterior (Figura 1) que tolera fallos en dicha capa.

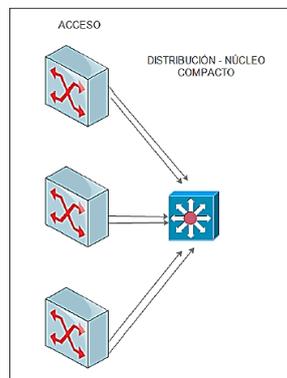


Figura 2: Modelo jerárquico de dos capas compacto. Fuente [5].

Este modelo conecta enlaces redundantes a la capa de distribución-núcleo, proporcionando redundancia ante fallos en el cableado y permitiendo balanceo de carga. Tras establecer el modelo, se analiza detalladamente la ubicación de la red industrial a diseñar.

**Ubicación**

Para La ubicación de la red de comunicación remota industrial se encuentra en el piso 5 del edificio de la Facultad de Tecnología, Av. Arce, No 2295. El laboratorio de automatismos donde se hayan los PLC SIMATIC S7-1200 que se conectará a la red de comunicación industrial.



Crédito: JM. Flores M. 2021

Figura 3: Laboratorio de automatismos de la Carrera de Electricidad Industrial (UMSA)

**DISEÑO**

**Direccionamiento de red pública**

El direccionamiento empleado para la Red Pública es el que identificará al PLC SIMATIC S7-1200 en internet.

Esta dirección es asignada por el DTIC (Departamento de Tecnologías de Información y Comunicación) como ISP (Proveedor de Servicios de Internet), y fue configurada como una VLAN con IP fija y que no varía (Tabla 1).

**Tabla 1**  
Pool direcciones IP Públicas Asignada a la Carrera de Electricidad Industrial

Pool IP Públicas Asignado por el DTIC	200.7.170.177/29	
Dispositivo	Puerto	Ordenador
Switch Cisco Catalyst 2960	Fa0/9	B-4

Fuente: Elaboración propia

**Direccionamiento para los PLC SIMATIC S7-1200**

El rango asignado para el direccionamiento de los PLC's es 200.7.170.177. Se utiliza la red de área local con un total de 6 PLC's inicialmente, por lo que, la máscara de subred configurada es la 255.255.255.248 lo cual permite una expansión para futuros dispositivos PLC de la carrera de Electricidad Industrial (Tabla 2).

**Tabla 2**  
Direccionamiento IP para los PLC SIMATIC S7-1200 en el Switch TP-LINK TL-SF1024 del laboratorio de automatismos

Dispositivo	Interfaz	Dirección IP	Máscara de subred	Gateway por defecto
Switch TP-LINK TL-SF1024	Fa0/1	200.7.170.178	255.255.255.248	200.7.170.177
	Fa0/2	200.7.170.179	255.255.255.248	200.7.170.177
	Fa0/3	200.7.170.180	255.255.255.248	200.7.170.177
	Fa0/4	200.7.170.181	255.255.255.248	200.7.170.177
	Fa0/5	200.7.170.182	255.255.255.248	200.7.170.177

Fuente: Elaboración propia

**Direccionamiento para la red wifi del laboratorio de automatismos**

La dirección empleada para la red WAN es la 200.7.170.183/29 y para el direccionamiento privado de la red WiFi del laboratorio de automatismos de la Carrera de Electricidad Industrial es la 192.168.0.1/24. Para la red de área local se cuenta con un total de 254 hosts, por lo que, la máscara de subred para ambos sería la 255.255.255.0 (Tabla 3)

**Tabla 3**  
Direccionamiento IP para la Red WIFI del laboratorio de automatismos

Dispositivo	Interfaz	Dirección IP	Máscara de subred	Gateway por defecto
TP-LINK WR940N	WAN	200.7.170.183	255.255.255.248	200.7.170.177
	LAN	192.168.0.1-99	255.255.255.0	192.168.0.1
	WLAN	192.168.0.100-254	255.255.255.0	192.168.0.1

Fuente: Elaboración propia

**Infraestructura de red**

Para el Switch de la Capa de Acceso del laboratorio de automatismos, se cuenta con el switch TP-LINK TL-SF1024 que cubre la conexión Ethernet del PLC SIMATIC S7-1200, por lo que se ubica dentro del laboratorio mencionado. (Figura 4).



Fuente: <http://bit.ly/3KvdRkKb>

**Figura 4:** Switch TP-LINK TL-SF1024

El switch que forma parte del backbone de la facultad es el Cisco Catalyst series 2960 (Figura 5), el cual es un switch Ethernet apilable de configuración fija que ofrece conectividad Gigabit y Fast Ethernet. Permite realizar operaciones empresariales de manera confiable y segura con un menor costo total de propiedad a través de diversas características innovadoras, tales como

FlexStack<sup>2</sup>, Power over Ethernet Plus (PoE+)<sup>3</sup> y Smart Operations<sup>4</sup>.



Fuente: <http://bit.ly/3o9Yj83>

**Figura 5:** Switch Cisco Catalyst Serie 2960-X

Por último la carrera de Electricidad Industrial cuenta con el enrutador inalámbrico TP-LINK TL-WR940N + 450 Mbps (Figura 6), el cual es ideal para compartir automáticamente la conexión de ADSL, y armar una red Inalámbrica para compartir recursos e información. Posee 3 antenas que le otorgan robustez y la estabilidad inalámbrica.

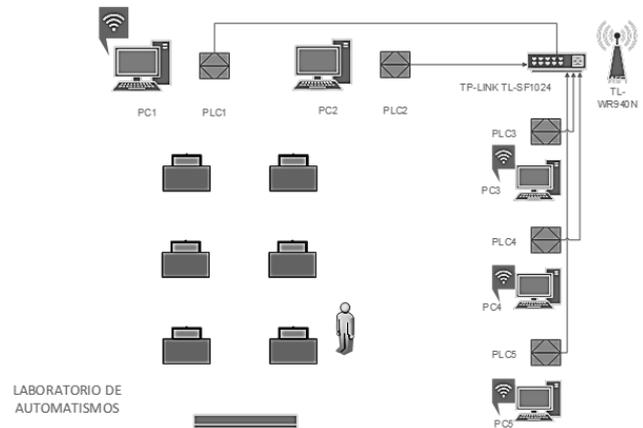


Fuente: <http://bit.ly/405nqpC>

**Figura 6:** Router Inalámbrico TP-LINK TL-WR940N

**Diagrama topológico de la red implementada**

Para la comunicación de la presente red se utilizó una topología de red tipo estrella en donde los equipos son conectados por medio de sus puertos Ethernet con la ayuda de un cable de red de tipo directo (Figura 7). Dentro del programa de usuario se debe configurar los parámetros de comunicación para realizar una correcta conexión.



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 7:** Diagrama topológico de la red de comunicación industrial

<sup>2</sup> Característica del switch Cisco Catalyst series 2960 que permite apilar hasta cuatro switches en una sola unidad de gestión.

<sup>3</sup> Power over Ethernet Plus (PoE+) es una característica del switch Cisco Catalyst series 2960 que permite la transmisión de energía eléctrica junto con los datos a través de un solo cable Ethernet.

<sup>4</sup> Característica del switch Cisco que permite una gestión de red más eficiente y automatizada.

## Implementación de la red

La red de comunicación industrial funcionará en el mismo espacio en donde actualmente funciona el laboratorio de automatismos. El espacio físico no presentará modificación alguna, excepto la instalación del cableado estructurado UTP para cada PLC. En la (Figura 8) se muestra una vista general en donde funciona la red industrial de comunicación.



Crédito: JM. Flores M. 2021

**Figura 8:** Vista general de la red industrial del laboratorio de automatismos de la Carrera de Electricidad – UMSA.

Se dispone de cinco puestos de trabajo y para cada uno de ellos se dispuso de un computador de escritorio que contendrá todos los paquetes de software para realizar las prácticas de laboratorio. Además, en cada puesto de trabajo se encuentra una estación para el desarrollo de las prácticas de las materias de automatización industrial y la implementación de nuevos laboratorios de redes de comunicación industrial.

## Estaciones de trabajo

Las estaciones de trabajo en el laboratorio (Figura 9) son estructuras metálicas y de madera que alojan dispositivos necesarios para las redes de comunicación industrial. Para cada controlador lógico programable, hay una estructura metálica en forma de tablero y mesa, con soporte perfil y canaleta perforada para conexiones internas. También cuenta con un tablero para los dispositivos y una fuente de tensión continua de 24VDC. Para protección, hay un breaker monofásico.



Crédito: JM. Flores M. 2021

**Figura 9:** Módulos de trabajo para implementar laboratorios de redes de comunicación industrial.

## Configuración del servidor web para monitoreo de procesos

La configuración del servidor web permite a los usuarios autorizados supervisar y gestionar la CPU de manera remota a través de la red, lo que facilita la realización de evaluaciones y diagnósticos a largas distancias. La monitorización y evaluación se puede realizar sin tener el software de programación del PLC SIMATIC-S7, solo se necesita un servidor web. Para proteger la CPU, se recomienda a la carrera de Electricidad Industrial que adquiera tecnologías, como firewalls, para evitar que esté en peligro.

## CONCLUSIONES

Este proyecto se ha enfocado en implementar un diseño de red de comunicación remota industrial utilizando el TIA Portal de Siemens. Esto implica una gran cantidad de elementos interactuando y generando una gran cantidad de información que debe ser recopilada, procesada y analizada para tomar decisiones adecuadas.

La implementación de una red industrial es un proceso largo que requiere un análisis exhaustivo de las necesidades de los recursos de la carrera. A menudo, esto implica replantear el diseño para lograr los objetivos deseados.

El diseño presentado en este trabajo incluye el servidor web del PLC SIMATIC S7-1200 que permite el acceso a variables de la CPU a través de páginas web externas. Con la finalización del proyecto de investigación, se implementó la red de comunicación industrial en el laboratorio de automatismos con 5 bancos de trabajo que cuentan con PLC's SIMATIC S7-1200 de la marca Siemens, además de interfaces hombre máquina y antenas de comunicación WiFi en las PC's y laptops. Estos equipos podrán ser interconectados entre sí, utilizando el potencial de la nueva red de comunicación industrial, permitiendo así a los estudiantes realizar configuraciones tanto físicas como de programación para la interconexión de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Centro de formación técnica para la industria. Qué son las redes de comunicación industrial., Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/que-son-las-redes-de-comunicacion-industrial/>

Consultado: 25/09/2021

[2] Oliva, N. 2013, Redes de Comunicaciones Industriales, pp: 160, Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid, Madrid - España

[3] Comunicaciones Industriales. Disponible en: <https://idboxrt.com/es/comunicaciones-industriales/>

Consultado: 29/09/2021

[4] "Qué es el protocolo Ethernet Industrial". Disponible en: <https://bit.ly/3UEQluf>

Consultado: 16/10/2021

[5] Cisco Netacad, " Principios básicos de enrutamiento y switching.CCNA1. V5" Disponible en: <http://bit.ly/43xwuGL>

Consultado: 15/06/2021

(\*), Magister en Administración de Negocios, Licenciado en Electrónica y Telecomunicaciones, Docente investigador: Electricidad Industrial, Electrónica y Telecomunicaciones & Mecánica Automotriz. Facultad de Tecnología – UMSA.

# INTERNET DE LAS COSAS PARA MONITOREAR CONDICIONES EN UN MOTOR TRIFÁSICO

Carlos Bladimir Morales Ríos \*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>Se propone utilizar un circuito electrónico modular y un servidor de almacenamiento y procesamiento de datos para desarrollar el sistema en el entorno del Internet de las Cosas. La incorporación de nuevas tecnologías permite reducir costos en la implementación del sistema, tener un bajo consumo de energía y crear herramientas útiles para la presentación de planes de monitoreo.</p> <p>El sistema mide dos magnitudes físicas: la temperatura superficial en los bobinados y la cantidad de corriente que fluye por las tres líneas de alimentación de un motor eléctrico de inducción trifásico con potencias de 2 a 4 HP. El método aplicado al diseño del sistema es la de implementar software y probar cada subsistema aisladamente; para luego sintetizar todo en un producto final.</p> <p>Los resultados permiten observar la disponibilidad de la información almacenada y la capacidad de procesamiento de dicha información; con el uso de gráficos y comandos MatLab útiles para el análisis de los datos, ejecutados en un entorno de Cloud Computing (computación en la nube).</p> <p><b>PALABRAS CLAVE:</b> Internet de las Cosas, motores eléctricos, computación en la nube, hardware y software libre.</p>	<p>It is proposed to use a modular electronic circuit and a storage and data processing server to develop the system in the Internet of Things environment. The incorporation of new technologies allows for cost reduction in system implementation, low energy consumption, and the creation of useful tools for presenting monitoring plans.</p> <p>The system measures two physical magnitudes: the surface temperature in the windings and the amount of current flowing through the three power lines of a 2 to 4 HP three-phase induction electric motor. The method applied to the system design is to implement software and test each subsystem separately, and then synthesize everything into a final product.</p> <p>The results show the availability of stored information and the processing capacity of that information, using MatLab graphics and commands useful for data analysis, executed in a Cloud Computing environment.</p> <p><b>KEYWORDS:</b> Internet of Things, electric motors, cloud computing, open hardware and software.</p>	<p>Propõe-se o uso de um circuito eletrônico modular e um servidor de armazenamento e processamento de dados para desenvolver o sistema no ambiente da Internet das Coisas. A incorporação de novas tecnologias permite a redução de custos na implementação do sistema, baixo consumo de energia e criação de ferramentas úteis para a apresentação de planos de monitoramento.</p> <p>O sistema mede duas magnitudes físicas: a temperatura superficial nos enrolamentos e a quantidade de corrente que flui pelas três linhas de alimentação de um motor elétrico de indução trifásico com potências de 2 a 4 HP. O método aplicado ao projeto do sistema é implementar software e testar cada subsistema separadamente, e depois sintetizar tudo em um produto final.</p> <p>Os resultados mostram a disponibilidade das informações armazenadas e a capacidade de processamento dessas informações, usando gráficos e comandos MatLab úteis para a análise de dados, executados em um ambiente de Cloud Computing (computação em nuvem).</p> <p><b>PALAVRAS-CHAVE:</b> Internet das Coisas, motores elétricos, computação em nuvem, hardware e software livre.</p>
<p><b>History of the article:</b> Received 30/03/2023. Style review 11/04/2023. Accepted 15/04/2023</p>		

## INTRODUCCIÓN

El uso de motores eléctricos en entornos industriales es muy común. Este tipo de equipos muchas veces están en permanente funcionamiento y deben mantener un rendimiento constante, lo que implica que deben ser dimensionados correctamente para las cargas con las que trabajan; y ser acompañados de los elementos necesarios de protección. Aun así, por el uso permanente de éstos, pueden presentar condiciones que no alertarían a los operadores o no serían diagnosticados a tiempo.

Se plantea el desarrollo de un sistema computarizado de bajo costo utilizando herramientas tecnológicas actuales: Tecnología IoT (Internet de las Cosas<sup>1</sup>), plataformas de hardware y software libre; para monitorizar las condiciones de equipos rotativos industriales que deben someterse a actividades permanentes de trabajo; con el fin de generar datos y comportamientos de las variables almacenadas en la nube y disponibles en cualquier instante, coadyuvando a evitar paradas forzosas y no deseadas en determinados procesos de producción.

## DESARROLLO

De acuerdo a la naturaleza física del funcionamiento de las máquinas y motores de inducción, es posible determinar las causas que pueden producir un fallo.

Estas causas generalmente están ligadas al aumento de temperatura como un indicador crucial de falla en la máquina. Por otra parte, la falla puede ser eléctrica o mecánica.

Las pruebas con la variación de la temperatura pueden ofrecer indicios de daños en distintos ámbitos del funcionamiento de la máquina. Por otra parte, el equipo distinguirá distintos rangos de funcionamiento en función a la carga soportada y la frecuencia y periodicidad de funcionamiento, esto es, considerar las horas de mayor uso y con mayores cargas. Los aspectos que pueden ocasionar fallos en las máquinas rotativas eléctricas son:

- Circuito de Potencia
- Calidad de energía
- Aislamiento
- Estator
- Rotor

### Circuito de potencia

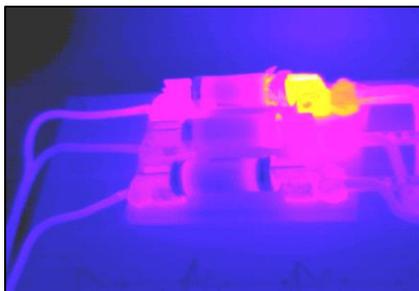
El circuito de potencia comprende el circuito de control de la máquina hasta la caja de bornes. Incluye a todos los conductores con sus bornes, interruptores, protecciones térmicas, fusibles, contactores y cuchillas. Existen diferentes problemas de conductividad por estos elementos, se pueden mencionar:

- Generación de armónicas.
- Desbalances de voltaje.
- Desbalances de corriente.

<sup>1</sup> Red de dispositivos interconectados que recopilan y comparten datos a través de internet, lo que permite su control y monitoreo de forma remota. Esta tecnología se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde la domótica hasta la industria y la agricultura.

Típicamente las conexiones que se oponen a la conducción de la energía adecuada son causadas por: terminales corroídos, cables sueltos, barras sueltas, fusibles corroídos, hilos abiertos, conexiones entre aluminio – cobre, diferentes tamaños de conductores, etc.

Se utiliza la medición de resistencia entre fases para detectar defectos en el circuito de potencia en un motor o generador trifásico (Figura 1). En un equipo en buen estado, las lecturas entre fases deben ser casi idénticas. La cámara termográfica de infrarrojos se utiliza para detectar los puntos donde se produce alta resistencia o falsos contactos.



Fuente: <https://fersddanka.files.wordpress.com/2011/02/fallas-electricas1.pdf>

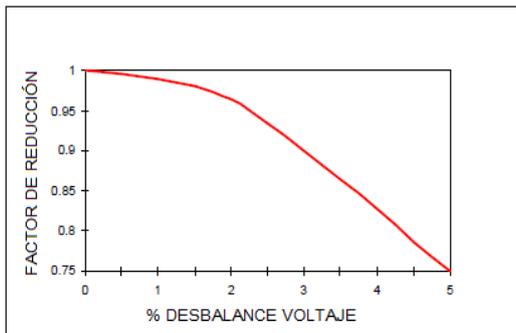
Figura 1: Falso contacto genera aumento de temperatura

Se debe verificar que el circuito de potencia se encuentre en un estado óptimo ya que si se reemplaza un motor dañado por uno nuevo y en perfectas condiciones de trabajo; presentará fallas si el circuito de potencia presenta problemas.

**Calidad de energía**

La calidad de energía entregada a la máquina puede tener dos defectos: desbalances de voltaje y distorsión armónica.

El desbalance de voltaje (Figura 2) indica que los voltajes de línea aplicados a la máquina rotativa no son equilibrados; se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator, a éstas se les conoce como corrientes de secuencia negativa y reducen el torque del motor. Se producen dos efectos importantes, aumenta la temperatura en el devanado y aumenta su vibración. Un aumento de la temperatura por encima de su valor permitido provocaría daños al aislamiento, y el aumento en los niveles de vibración provocaría en algún grado solturas mecánicas, tensión excesiva en rodamientos y aflojamiento de las bobinas. Con desbalances de voltaje presentes, la potencia de placa de un motor debe ser multiplicado por un factor de reducción.



Fuente: <https://fersddanka.files.wordpress.com/2011/02/fallas-electricas1.pdf>

Figura 2: Factor de reducción

Según la norma NEMA, ningún motor debe operarse con un desbalance de voltaje superior al 5%. La distorsión armónica se refiere a la deformación de la onda sinusoidal de voltaje, y se mide mediante el parámetro Total THD<sup>2</sup>, que indica el porcentaje de distorsión de la onda sinusoidal debido a la presencia de armónicos. Las armónicas son generadas por cargas no lineales como rectificadores, convertidores de potencia electrónicos y variadores de frecuencia.

Existen tres tipos de armónicas:

- Secuencia positiva: Crea un campo magnético en la dirección de rotación; por lo tanto, ayuda al torque del motor.
- Secuencia negativa: Se opone a la rotación del motor e incrementa la demanda de corriente a una carga determinada.
- Secuencia cero: No produce ningún trabajo, pero causa calentamiento y retorna al transformador de alimentación. Produce por lo tanto calentamiento en el transformador también.

El excesivo calor que se produce por demandas de corriente anormales es el efecto más perjudicial del fenómeno de las armónicas en las máquinas eléctricas. Si el THD es alto, un motor puede consumir más corriente de la que está diseñado para soportar, lo que provoca daños severos al aislamiento y posible colapso. El estándar IEEE 519-1992 reconoce que las cargas son las que introducen armónicas en el sistema, y sugiere límites que deben ser manejados. La identificación de las armónicas presentes permite el diseño de filtros para eliminar el efecto mencionado.

**Aislamiento**

El aislamiento debe mantener las corrientes idealmente circulando por sus conductores sin producir fugas hacia la masa o tierra. Para que se dé una falla a tierra, deben de ocurrir dos cosas. Primero debe crearse un camino de conducción a través del aislamiento. Conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor. Segundo, la superficie exterior del aislamiento se contamina de material conductor y conduce suficiente corriente a la carcasa o núcleo del motor que está conectado a tierra.

Las causas que pueden determinar una falla en el aislamiento son:

- Circuito de potencia: Una conexión de alta resistencia, produce un voltaje de línea desbalanceada.
- Armónicas: Introducen corrientes de secuencia negativa, sobrecalentando el devanado.
- Ambiental: Contaminación en el motor.

**Estator**

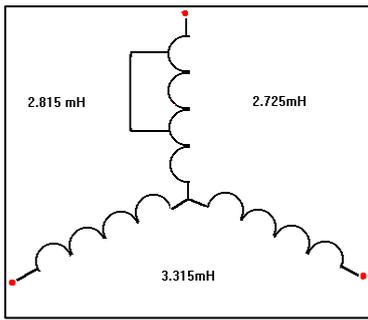
Un corto entre las espiras del estator (Figura 3) reduce la capacidad de producir un campo magnético balanceado. Puede darse un aumento en la vibración de la máquina, y la degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. Generalmente este tipo de cortos aumenta la temperatura y el corto se expande a un corto entre espiras pudiendo destruir todo el motor. Si la falla es entre fases, un corto produce envejecimiento acelerado en el motor.

Fallas de este tipo pueden ocurrir varias veces en un motor. Debido a esta razón, el utilizar solamente un medidor de aislamiento<sup>3</sup> como herramienta predictiva es insuficiente ya

<sup>2</sup> Total Harmonic Distortion, se refiere a la medida de la distorsión armónica presente en una señal de voltaje o corriente.

<sup>3</sup> Medidor de resistencia eléctrica de alta tensión utilizado para medir la resistencia eléctrica de los aisladores de cables y equipos eléctricos.

que este tipo de fallas pueden ser pasadas por alto. Si el núcleo del motor se llegase a dañar el reemplazo del motor sería total.



Fuente: <https://fersddanka.files.wordpress.com/2011/02/fallas-electricas1.pdf>

Figura 3: Corto circuito entre espiras

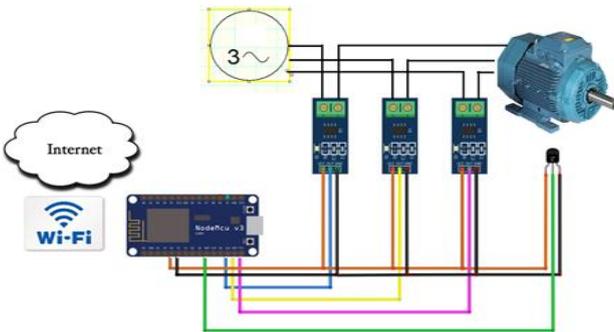
La prueba con motor energizado identifica una falla en el estator tomando mediciones de voltaje y corriente por fase y calculando la impedancia en cada una. Si una fase tiene problemas en los devanados, el desbalance de impedancia aumenta; además de causar desbalance en la circulación de corriente.

**Rotor**

Cuando nos referimos a la condición de un rotor se deben de revisar; las barras, laminaciones y los anillos de corto circuito; ya que éstos conducen la corriente inducida. Una barra rota genera un calor intenso en la zona de ruptura y puede destruir el aislamiento cercano a las laminaciones y el devanado estático colapsará.

**Circuito propuesto**

Para realizar la lectura constante de las variaciones de corriente y temperatura en el motor se precisa una tarjeta procesadora: La NODE MCU ESP32 es un sistema SOC (System on chip) con un procesador Dual Core Tensilica de 32 bits, trabajando a 240 MHz. Además de los pines digitales de entrada y salida normales; posee entradas y salidas analógicas directas, posee conectividad WiFi y Bluetooth, que lo hace idóneo en proyectos IoT. La memoria SRAM es de 520 Kbyte y la ROM alcanza a los 448 Kbyte.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4: Esquema del circuito electrónico modular final Diseño Fritzing

Para tomar lecturas de corriente se propone el sensor GY-712. La cantidad de corriente que pueden medir estos módulos varía entre 10 a 30 amperios según el modelo, y son óptimos para monitorear la corriente consumida por una carga industrial de mediana potencia. La entrada hacia el chip interno suele tener una resistencia bastante

elevada, en el rango de decenas de mega ohm, y está conectada a un sensor de efecto Hall. La temperatura puede ser medida por un sensor termoresistivo. El sensor de temperatura, comúnmente suele estar formado por el material sensor, el cobertor que lo envuelve y que está relleno de un material muy conductor de la temperatura, para que los cambios se transmitan rápidamente al elemento sensor.

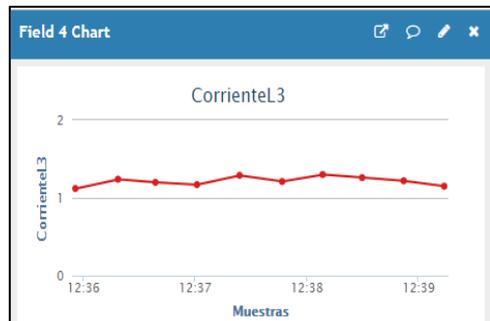
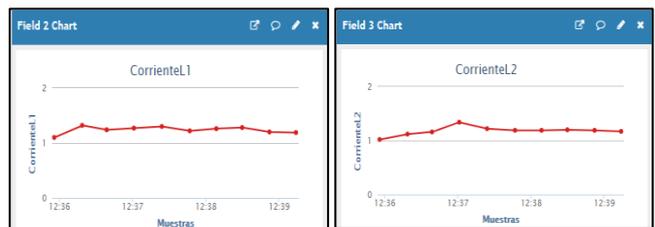
Para acceder a la lectura de los valores de corriente y temperatura, se conecta directamente con el servidor desde la computadora o desde la aplicación ThingView.



Fuente: <https://thingspeak.com/>

Figura 5: Aplicación móvil ThingView

En las siguientes figuras se puede apreciar la toma y captura de datos de un motor de 2 HP con carga de 20 Kilogramos



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5: Toma y captura de datos de un motor de 2 HP con carga de 20 Kilogramos

## CONCLUSIONES

- La investigación propone el uso de tecnologías de conectividad en plataformas de desarrollo de software y hardware enfocados al IoT, los que han conducido a implementar un sistema de monitoreo de condiciones para máquinas eléctricas rotativas, de una manera óptima, sistemática, simplificada, e invirtiendo un menor presupuesto.
- Se optimiza el proceso de lectura y envío de datos hacia el servidor IoT, mediante un circuito implementado en base a Nodemcu; módulo medidor de corriente: GY712; y sensor de temperatura. La automatización implica la ausencia de un operador que esté realizando la medición en instrumentos y la anotación manual de los valores obtenidos periódicamente.
- Se han aplicado herramientas software de plataformas libres que han permitido conectar el circuito con el servidor IoT Thingspeak; permitiendo aprovechar los servicios que ofrece dicha plataforma: almacenamiento de datos y procesamiento de la información en un entorno de nube. Sin embargo, al utilizar una cuenta gratuita, se deben mencionar algunas restricciones en dicha conexión: La cuenta gratuita tiene vigencia de un año calendario, los datos sólo pueden ser subidos en intervalos mínimos de 15 segundos, La máxima cantidad de registros almacenados es de 3000000, El procesamiento del código escrito en Matlab para computar y sistematizar los datos no debe superar los 20 segundos. Para obtener mejores prestaciones en los aspectos mencionados se debe acceder a una cuenta de pago, según las condiciones del sitio WEB.
- La existencia de plataformas del Internet de las Cosas con acceso libre en la actualidad; facilitan ampliamente el desarrollo de sistemas de monitoreo de condiciones. Esto debido a que eximen incluir el diseño, configuración y programación del servidor WEB receptor de datos. También liberan de diseñar e implementar una base de datos remota y su conexión con el servidor WEB, facilitando la disponibilidad de la información. La implementación de los servidores WEB virtualizados en las plataformas IoT, aplicando las técnicas de cloud computing, evita que se tenga que utilizar computadoras físicas. El costo por el procesamiento de la información en la nube es mucho más bajo comparado al uso de equipos físicos de cómputo, en los que se debe invertir un presupuesto en su compra, mantención y funcionamiento (costos del equipo de cómputo, costos de energía, costos de reemplazos, etc.)
- Se pueden utilizar los entornos de la página WEB de thingspeak para configurar la visualización de los datos en forma de gráficos; utilizando las herramientas del sitio y escribiendo código Matlab para el uso de las aplicaciones Matlab analysis y Matlab visualizations contenidas en la plataforma.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] BEHROUZ A. FOROUZAN. 2002. Madrid, España, segunda edición. Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Editorial Mc Graw-Hill, 887 pag.
- [2] CISCO NETWORKING ACADEMY. CCNA EXPLORATION 5.0. Cisco System Inc. 2011. Material Multimedia.
- [3] HIDALGO, JUAN CARLOS. Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos Especialista en termografía Nivel II y en análisis de fallas en motores eléctricos, Grupo TERMOGRAM, San José, Costa Rica. [en línea] [consultado 22 de marzo de 2017]  
<<https://fersddanka.files.wordpress.com/2011/02/fallas-electricas1.pdf>>
- [4] JORGE E. RODRIGUEZ G. 1999. México, primera edición. Introducción a las Redes de Área Local. Interamericana Editores S.A. 158 pag.
- [5] LOUREIRO GARRIDO RUBEN. 2015. Estudio de las plataformas IoT. PFC, 63 pag. [en línea] [consultado 24 de agosto de 2017]  
<<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/42812/6/rloureiroTFC0615memoria.pdf>>
- [6] PABON ANGEL, HECTOR JOSÉ. 2010. Universidad de Cundinamarca seccional Ubaté. Probabilidad y Estadística con MatLab para Investigadores, 124 pag.
- [7] SEBASTIAN SALINAS. 2010, Manual de sensores, Motores y Controladores. Departamento de Ingeniería Eléctrica. [en línea] [consultado 3 de abril de 2017]  
<<http://www.profesaulosuna.com/data/files/ELECTRONICA/INSTRUMENTACION/VARIOS%20MOTOR%20SENSOR/Manual.pdf>>
- [8] WILLIAM STALLINGS. 2004. Madrid, España, séptima edición, Comunicaciones y Redes de Computadoras. Editorial Pearson Prentice Hall, 896 pag.

(\*), Magister en Gestión del Mantenimiento, Licenciado en Electrónica y Telecomunicaciones, Docente carrera de Electricidad Industrial. Facultad de Tecnología – UMSA.

# ELEMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS INDUSTRIAS DE LA CIUDAD DE VIACHA

Cesar Mendoza Carvajal\*

## RESUMEN

La compensación del factor de potencia mediante condensadores es una práctica beneficiosa en muchos aspectos, no tan solo, por el hecho de ahorrar recargos en la factura de consumo de energía eléctrica, sino, que permite un mejor aprovechamiento de los transformadores y líneas de distribución, ahorrando por tanto en instalaciones y también en consumos de potencia activa. La empresa distribuidora de energía eléctrica penaliza el bajo factor de potencia por debajo de 0.85, para las categorías de Gran Demanda (GD) y Mediana Demanda (MD), por lo tanto, se debe corregir por encima de este valor.

**PALABRAS CLAVE:** Factor de potencia, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva, cargas resistivas, carga inductiva, carga capacitiva.

**History of the article:** Received 30/03/2023. Style review 11/04/2023. Accepted 11/04/2023

## ABSTRACT

Power factor compensation using capacitors is a beneficial practice in many aspects, not only because it saves surcharges on the electricity consumption bill, but also because it allows better use of transformers and distribution lines. Therefore, saving in installations and also in active power consumption. The electricity distribution company penalizes low power factor below 0.85, for the categories of High Demand (GD) and Medium Demand (MD), therefore, it must be corrected above this value.

**KEYWORDS:** Power factor, active power, apparent power, reactive power, resistive loads, inductive load, capacitive load.

## RESUMO

A compensação do fator de potência com condensadores é uma prática vantajosa em muitos aspectos, não só porque permite poupar sobretaxas na fatura de consumo de eletricidade, mas também porque permite uma melhor utilização dos transformadores e das linhas de distribuição, poupando assim nas instalações e também no consumo de energia ativa. A distribuidora de energia elétrica penaliza baixo fator de potência abaixo de 0,85, para as categorias de Alta Demanda (GD) e Média Demanda (MD), portanto, deve ser corrigido acima deste valor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fator de potência, potência ativa, potência aparente, potência reativa, cargas resistivas, carga inductiva, carga capacitiva.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad industrial de Viacha es la capital de la Provincia Ingavi del departamento de La Paz, se encuentra localizado a 32Km. de distancia desde la ciudad de Nuestra Señora de La Paz.



**Figura 1:** Vista Satelital de la ciudad industrial de Viacha.  
**Fuente:** Google Maps.

El municipio de Viacha está ubicado entre los paralelos 16 °32' 39" (UTM 0576432) y 16° 54 '44" (8160551).de latitud Sur y entre los meridianos 68 ° 16' 56" y 68° 22' 72" de longitud Oeste, localizándose en el Altiplano Norte del Departamento de La Paz, con altitudes que varían desde los 3540 metros sobre nivel del mar en la parte más baja, hasta los 4600 msnm en las serranías ubicadas en la parte oeste del Municipio, hacia la carretera 107, camino a Tolacollo (frontera con la republica peruana)<sup>1</sup>.

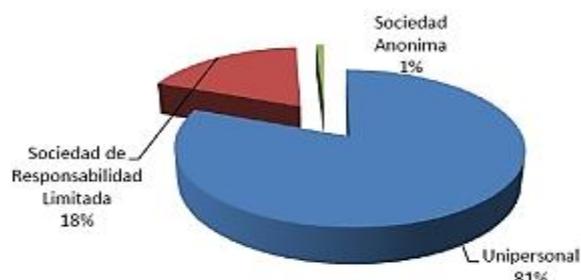
## Sistema económico

Las diferentes unidades productivas del área urbana están distribuidas en los distritos 1, 2, 6 y 7 principalmente; siendo todavía incipiente el proceso de transformación de varias comunidades del Distrito 3, aunque con un acelerado proceso de urbanización (Maso Cruz, Achica

Arriba, Viliroco, Challajahuira, Ingavi, Seckejahuira, etc.) que plantea a corto plazo una reconfiguración del área urbana de la ciudad de Viacha.

La economía en general presenta dos protagonistas importantes: las unidades productivas formalmente establecidas y las que operan de manera informal. Las primeras son aquellas que poseen Número de Identificación Tributaria (NIT), Servicio Plurinacional de Registro de Comercio – SEPREC y los registros sectoriales que así sean necesarios.

Bajo esta referencia se ha identificado en base a información de SEPREC que en el municipio están asentados un total de 115 empresas formales, de las cuales una es Sociedad Anónima (Tecnología en Alimentos S.A. TECALIM S.A.), 21 son empresas bajo la modalidad de Responsabilidad Limitada entre las que destacan Industrias Cerámicas Viliroco, Industria de Cerámica INDECA, Fabrica de Sanitarios HR River, etc. Finalmente están registrados 93 empresas unipersonales entre las que destacan las productoras de cerámica, constructoras, de servicios y otros. Cabe subrayar, que a pesar de ser Viacha la imagen corporativa de la Sociedad Boliviana de Cemento "SOBOCE S A", esta compañía legalmente no se encuentra registrada con domicilio legal en el Municipio de Viacha, al igual que otras empresas de renombre como INCERPAZ, etc.



**Figura 2.** Tipo de empresas formales establecidas en el Municipio de Viacha  
**Fuente:** Elaborado en función a datos de SEPREC

<sup>1</sup> Gobierno Autónomo municipal de Viacha (2012) Plan de Desarrollo Municipal 2012- 2016

**Unidades productivas por rubro**

La totalidad de las unidades productivas desarrolla una serie de actividades, pero la mayor parte se concentra en el sector manufacturero que considera la fabricación de cemento, ladrillos, cerámicos diversos, plásticos, alimentos, textiles, etc.

Otro sector importante es el comercio, la presencia de empresas constructoras y servicios de diversa índole, también destaca la presencia del sector metalúrgico y metal mecánica.

**Tabla N° 1.**  
**Clasificación empresarial por rubro**

Rubro	Total empresas	%
Manufacturera	122	47.5
Inmobiliarias	9	3.40
Comercio	38	14.7
Constructoras	22	9.0
Servicios	55	21.5
Agropecuaria	3	1.2
Metalúrgica	5	1.9
Mecánica industrial	2	0.8
<b>TOTAL</b>	<b>256</b>	

Fuente: Elaboración en función a datos de SEPREC

En la actualidad en el municipio no existe una zona destinada exclusivamente al parque industrial, por lo que las unidades productivas manufactureras, principalmente, se han ido asentando de acuerdo a las vías por donde se han instalado los ductos de gas y energía eléctrica.

**DESARROLLO**

**MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) advierte de que si no cambian las políticas energéticas de los países consumidores las necesidades energéticas carecerán a un ritmo de 1.5% anual entre 2007 y 2030. Por ello, la AIE, organismo dependiente de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) reclamó una "utilización más racional de la energía" y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía.

Por otra parte, en cuanto al consumo, la electricidad es una de las formas de energía de mayor uso, de tal forma que su costo sobre todos y cada uno de los sectores de la industria, servicios y a la propia economía doméstica. A partir de este hecho, es fácil deducir que cualquier acción que tienda a mejorar la "Eficiencia Energética" de nuestras cargas y medios de distribución y todo lo que represente un "Uso Racional de la Energía"<sup>2</sup>.

Actualmente una de las medidas tomadas por las diferentes industrias instaladas en la ciudad de Viacha es la compensación del factor de potencia.

Cuando se conecta una carga lineal a cualquier tipo de red, sea monofásica o trifásica, el comportamiento con respecto a las leyes de electricidad es única y no cambia, las cargas lineales más comunes que se utilizan en las redes eléctricas<sup>3</sup> son:

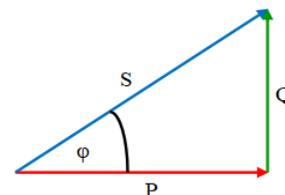
$$\cos\phi = \frac{P}{S}$$

- Cargas resistivas
- Cargas inductivas
- Cargas capacitivas

El factor de potencia desde el punto de vista energético es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. Desde el punto de vista técnico es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

Donde:

- cosφ: Factor de potencia
- P: Potencia activa [KW]
- S: Potencia aparente [KVA]



**Figura 3.** Triángulo de potencias  
Fuente: Elaborado Propia

A modo de ejemplo explicaremos el cálculo para corregir el factor de potencia de una industria de cerámica cuya potencia instalada es de 184.5 kw.

**Tabla 2**  
**Potencia instalada en la planta**

DESCRIPCIÓN	POTENCIA Kw
Oruga	3
Martillo	11
Cinta transportadora - 1	1.5
Desintegrador	11
Chapeadora	18.5
Cinta transportadora – 2	1.5
Laminadora	22
Cinta transportadora – 3	1.5
Bomba de vacío	7.5
Extrusora	110

Fuente: Elaboración propia

El factor de potencia promedio de los últimos seis meses es 0.72 – DELAPAZ.

La potencia reactiva del banco de condensadores en KVARC.

$$Qc = P (tg\phi_1 - tg\phi_2)$$

Donde:

- Qc: Potencia reactiva [KVARC]
- P: Potencia activa [KW]
- φ1: Angulo inicial
- φ2: Angulo final o deseado

<sup>2</sup> Autonell J., Balcels J., Barra V., Brossa J., Fornieles F., García B., Ros B., Serra J. Eficiencia en el Uso de la Energía Eléctrica. Alfaomega ediciones Técnicas Marcombo, México, 2011.

<sup>3</sup> Suarez Tejada L.F. Calidad de Energía Eléctrica. La Paz, Bolivia, 2006.

Reemplazando valores en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} \cos\phi 1 &= 0.72 & \phi 1 &= 43.94^\circ \\ \cos\phi 2 &= 0.95 & \phi 2 &= 18.19^\circ \\ Q_c &= P (tg\phi 1 - tg\phi 2) \\ Q_c &= 184.5 \text{ kw} (tg 43.94 - tg 18.19) \\ Q_c &= 117.17 \text{ KVARC} \\ Q_c &= 125 \text{ KVARC} \end{aligned}$$

Mes de la factura		ENERO-2017	
Categoría tarifaria		I-GD-BT Industrial Mayor	
Fecha de lectura		Anterior	Actual
Bloque Alto	31-Dic-16	1057	1062
Bloque Medio		7229	7330
Bloque Bajo		1547	1568
Tipo de Lectura		Lectura Normal	
Multiplicador		80	
Energía consumida en (28) días		10960 kWh	
Total Energía a Facturar		10960 kWh	
Potencia leída		Bloque Alto	Bloque Medio
Potencia de Punta a Facturar		10 kW	106 kW
Exceso de potencia fuera de punta		11 kW	10 kW
Energía reactiva		65 kW	12480 KVAh
		Factor de potencia 0.66	

DETALLE DE FACTURACIÓN	
Importe por Energía	Bs 485.80
Importe por Energía - Bloque Alto	Bs 587.61
Importe por Energía - Bloque Medio	Bs 3,316.31
Importe por Energía - Bloque Bajo	Bs 526.35
Importe por Potencia	Bs 961.43
Importe por Exceso de Potencia Fuera de Punta	Bs 2,993.36
Importe por Consumo	Bs 8,870.86
Importe por bajo factor de potencia	Bs 674.18
Importe Total por Consumo	Bs 9,545.04
Importe Total por el Suministro	Bs 9,545.04
Tasas para el Gobierno Municipal	
Por Alumbrado Público	Bs 532.65
Importe Total Factura	Bs 10,077.70

Figura 4. Factura de DELAPAZ sin compensación del factor de potencia  
Fuente: Industria de Cerámica Viacha CERAVI

En las figuras 5 y 6 se muestran el tablero del banco de condensadores de 125 KVARC de seis pasos:

- Paso 1: 5 KVARC
- Paso 2: 10 KVARC
- Paso 3: 20 KVARC
- Paso 4: 30 KVARC
- Paso 5: 30 KVARC
- Paso 6: 30 KVARC



Figura 5. Vista frontal del banco de condensadores.  
Crédito: C.Mendoza C.



Figura 6. Vista interior del banco de condensadores.  
Crédito: C.Mendoza C.

En la figura 7, se puede apreciar el valor del factor de potencia en el controlador EPCOS BR6000, el cual consta de seis pasos para conectar y desconectar los capacitores de diferentes potencias en función a las variaciones de carga y factor de potencia durante el proceso de producción.



Figura 7. Valor actual del factor de potencia EPCOS BR6000.  
Crédito: C.Mendoza C.

En la Figura 8, se tiene la factura por consumo de energía eléctrica, donde se puede apreciar que se elimina totalmente la penalización por el bajo factor de potencia, debido que este valor promedio mensual es de 0.96, que está once puntos más arriba del valor estipulado por la empresa distribuidora.

Mes de la factura		AGOSTO-2017	
Categoría tarifaria		I-GD-BT Industrial Mayor	
Fecha de lectura		Anterior	Actual
Bloque Alto	27-Jul-17	1185	1203
Bloque Medio		6077	6218
Bloque Bajo		1710	1736
Tipo de Lectura		Lectura Normal	
Multiplicador		80	
Energía consumida en (32) días		14800 kWh	
Total Energía a Facturar		14800 kWh	
Potencia leída		Bloque Alto	Bloque Medio
Potencia de Punta a Facturar		10 kW	101 kW
Exceso de potencia fuera de punta		10 kW	10 kW
Energía reactiva		93 kW	4480 KVAh
		Factor de potencia 0.96	

DETALLE DE FACTURACIÓN	
Importe por Energía	Bs 502.12
Importe por Energía - Bloque Alto	Bs 744.39
Importe por Energía - Bloque Medio	Bs 4,868.45
Importe por Energía - Bloque Bajo	Bs 680.94
Importe por Potencia	Bs 1,174.39
Importe por Exceso de Potencia Fuera de Punta	Bs 3,028.73
Importe por Consumo	Bs 11,000.02
Importe Total por Consumo	Bs 11,000.02
Importe Total por el Suministro	Bs 11,000.02
Tasas para el Gobierno Municipal	
Por Alumbrado Público	Bs 763.68
Importe Total Factura	Bs 11,763.70

Figura 8. Factura de DELAPAZ con compensación del factor de potencia.  
Fuente: Industria de Cerámica Viacha CERAVI

La clasificación<sup>4</sup> de acuerdo al consumo declarado en la solicitud de servicio son:

- Pequeñas Demandas (PD): para consumos menores o iguales a 10 kw.
- Medianas Demandas (MD): Para consumos mayores a 10 kw y menores o iguales a 50 kw.
- Grandes Demandas (GD): Para consumos mayores a 50 kw.

Finalmente, se dejó instalado un analizador de redes de la marca FLUKE 435, para determinar los diferentes parámetros eléctricos como ser:

- ✓ Voltajes
- ✓ Corrientes
- ✓ Potencia activa
- ✓ Potencia aparente
- ✓ Potencia reactiva
- ✓ factor de potencia
- ✓ Desequilibrio de fases
- ✓ Armónicos

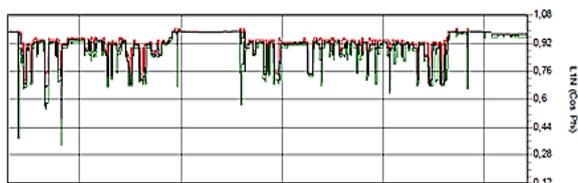


Figura N° 9. Comportamiento del factor de potencia de la fase 1.  
Fuente: Elaboración Propia.

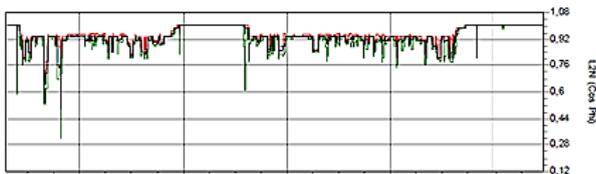


Figura 10. Comportamiento del factor de potencia de la fase 2.  
Fuente: Elaboración Propia.

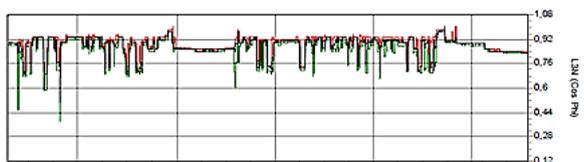


Figura 11. Comportamiento del factor de potencia de la fase 2.  
Fuente: Elaboración Propia

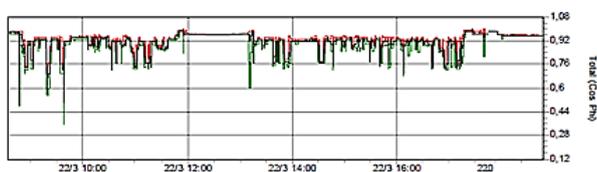


Figura 12. Comportamiento del factor de potencia total  
Fuente: Elaboración Propia

En las figuras 9, 10, 11 y 12, se puede percibir las variaciones del factor de potencia en el tiempo.

## CONCLUSIONES

Con la implementación del banco de condensadores se logra excelentes beneficios principalmente la reducción en los costos de facturación de consumo de energía eléctrica, disminución de pérdidas eléctricas y caídas de tensión, además de un aumento en la disponibilidad de potencia en transformadores y líneas de transmisión.

En el presente artículo se logró eliminar la penalización por el bajo factor de potencia, inicialmente el factor de potencia de la planta era de 0.72 que está 13 puntos menos al valor establecido por la empresa distribuidora que es de 0.85, con la instalación del tablero de condensadores se logró que el valor del factor de potencia final sea de 0.96 que está por muy encima del valor establecido por DELAPAZ.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gobierno Autónomo Municipal de Viacha. (2012). Plan de Desarrollo Municipal 2012 - 2016.
- [2] Autonell J., Balcells J., Barra V., Brossa J., Fornieles F., García B., Ros B., Serra J. Eficiencia en el Uso de la Energía Eléctrica. Alfaomega ediciones técnicas Marcombo, México, 2011.
- [3] Suarez Tejada L.F. Calidad de Energía Eléctrica. La Paz, Bolivia, 2006.
- [4] Cooperativa Rural de Electrificación CRE. Manual de Eficiencia Energética. Santa Cruz, Bolivia.

(\*), Ph.D. en Ciencias y Tecnología, Licenciado en Electromecánica, Docente Carrera de Electricidad Industrial y Electromecánica, Facultad de Tecnología – UMSA.

Jefe de mantenimiento eléctrico en la industria de CERÁMICA LA PAZ.

Consultor de mantenimiento electromecánico en diferentes industrias de la Ciudad de La Paz, El Alto y Viacha.

<sup>4</sup> Cooperativa Rural de Electrificación CRE. Manual de Eficiencia Energética. Santa Cruz, Bolivia.

# PROPUESTA DE MEDICIONES DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES DE TRANSFORMACION ENERGIZADAS

Freddy Alberto Parisaca Calla\*

## RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra de las subestaciones requieren una evaluación rutinaria (cada tres años) debido al desgaste, envejecimiento y los problemas de corrosión de los elementos que componen el sistema de puesta a tierra. A medida que las condiciones para desconectar la energía eléctrica de una subestación se vuelven cada vez más difíciles por la continuidad de servicio, se ha incrementado la necesidad de buscar alternativas viables para la medición, en las subestaciones energizadas. En ocasiones una empresa busca desarrollar técnicas de medición con instalaciones energizadas, encontrando obstáculos que comprometen la calidad de los resultados de las pruebas, por lo que este trabajo tiene como objetivo proponer un instrumento y métodos adecuados para realizar las mediciones de la resistividad aparente del terreno y la resistencia del sistema de puesta a tierra de una subestación energizada.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de puesta a tierra; subestación energizada, resistividad aparente, resistencia, malla de tierra.

## ABSTRACT

Substation grounding systems require a routine evaluation (every three years) due to wear, aging and corrosion problems of the elements that make up the grounding system. As the conditions for disconnecting electrical energy from a substation become increasingly difficult due to continuity of service, the need to find viable alternatives for metering in energized substations has increased. Sometimes a company seeks to develop measurement techniques with energized installations, encountering obstacles that compromise the quality of the test results, so this work aims to propose an instrument and adequate methods to carry out the measurements of the apparent resistivity of the ground. and the resistance of the grounding system of an energized substation

**KEYWORDS:** Grounding system; energized substation, apparent resistivity, resistance, ground mesh.

## RESUMO

Os sistemas de aterramento de subestações requerem avaliação rotineira (a cada três anos) devido a problemas de desgaste, envelhecimento e corrosão dos elementos que compõem o sistema de aterramento. À medida que as condições de corte de energia elétrica de uma subestação se tornam cada vez mais difíceis devido à continuidade do serviço, aumenta a necessidade de encontrar alternativas viáveis para a medição em subestações energizadas. Por vezes uma empresa busca desenvolver técnicas de medição com instalações energizadas, encontrando obstáculos que comprometem a qualidade dos resultados dos ensaios, por isso este trabalho visa propor um instrumento e métodos adequados para realizar as medições da resistividade aparente do solo e da resistência. do sistema de aterramento de uma subestação energizada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema de aterramento; subestação energizada, resistividade aparente, resistência, rede de aterramento.

**History of the article:** Received 31/03/2023. Style review 17/04/2023. Accepted 20/04/2023

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se da a conocer varios aspectos técnicos que se deben considerar en un sistema de puesta a tierra de una subestación; específicamente relacionados con los procedimientos de prueba que deben seguirse para verificar el correcto funcionamiento del sistema de puesta a tierra. Los métodos que se describirán para la evaluación y diagnóstico de la malla de tierra se utilizan con el fin de obtener valores que sean parámetros suficientes para conocer la efectividad de la malla de tierra, desde el punto de vista de referencia y protección de los dispositivos instalados en la subestación. A medida que las condiciones para desconectar la energía eléctrica de una subestación, se han vuelto cada vez más difíciles por la continuidad de servicio, se ha incrementado la necesidad de buscar alternativas viables de medición del sistema de puesta a tierra, en subestaciones energizadas. Los sistemas de puesta a tierra se implementaron para proteger a las personas (trabajadores), y equipos, contra una posible falla a tierra o descarga atmosférica de un determinado sistema eléctrico en la subestación. Este fallo puede ir desde una pequeña fuga de corriente a tierra, hasta un arco eléctrico visible que puede dañar los equipos o el transformador de potencia y provocar incendios o una situación más grave en la subestación.

En los sistemas eléctricos de la subestación, pueden presentarse cambios bruscos en las condiciones de operación, perturbaciones en el suministro eléctrico o transitorios eléctricos. Para evitar y atenuar el peligro de estas perturbaciones en la vida útil y funcionamiento de los aparatos eléctricos, se proporciona estabilidad, continuidad de funcionamiento y protección de los aparatos con dispositivos que evitan que estos transitorios entren en fracciones de segundos a los sistemas y se dispersen previamente por una vía como es el sistema de puesta a tierra; siendo el primer sistema de protección no solo para dispositivos eléctricos instalados en la

subestación, sino también para preservar la vida humana de los trabajadores, evitando accidentes o desgracias personales.

Se espera que un sistema de puesta a tierra, tenga la capacidad suficiente para dispersar las corrientes de falla a tierra de los equipos, y las corrientes ocasionadas por las descargas atmosféricas, sin permitir que el potencial en la superficie alcance niveles peligrosos para la seguridad de los trabajadores en la subestación. Los sistemas de puesta a tierra envejecen y se corroen con el paso de los años debido a la humedad y sales en el terreno, así como a las altas temperaturas, provocando una disminución de la eficacia de la malla de tierra.

Por ello, se recomienda que, para mantener un sistema de puesta a tierra en condiciones óptimas, se deben realizar observaciones y mediciones de la malla y los electrodos de conexión a tierra como mínimo cada tres años.

Surge la necesidad de realizar un diagnóstico de las condiciones del sistema de puesta a tierra en una Subestación energizada.

En subestaciones antiguas surge la siguiente problemática. No se conocen los registros de los datos de las mediciones de la malla de tierra (resistividad aparente del terreno - resistencia de puesta a tierra) tampoco se tienen planos de la forma y dimensiones de la malla de tierra, no se dispone de un equipo adecuado para realizar estas mediciones y verificaciones.

El objetivo general es proponer un equipo adecuado para realizar las mediciones del sistema de puesta a tierra y de la resistividad aparente del terreno, en una subestación de transformación energizada. Sin una malla de tierra adecuada, no se garantiza la protección del personal y equipos, dentro de la subestación.

**DESARROLLO**

**Método y equipo de medición**

Debido a la importancia y necesidad de conocer el estado técnico del Sistema de Puesta a Tierra de una Subestación y el problema de que no se cuenta con los equipos adecuados para realizar las mediciones, se elaboró el presente trabajo, en base a consultas de diferentes fuentes bibliográficas, incluyendo normas y procedimientos, cuando se desconocen los registros de datos de las mediciones del sistema de puesta a tierra, tampoco se dispone de los planos de malla de tierra de la subestación. Finalmente se propuso a través de esta investigación, el equipo adecuado para realizar las mediciones propuestas.

**Resistividad aparente del terreno**

El suelo o terreno, puede ser considerado como un conductor a través del cual puede fluir, o disiparse la corriente eléctrica. Se define como resistividad aparente del terreno, a la dificultad que encuentra el paso de la corriente eléctrica en un cubo de tierra de un metro de arista. La unidad de medida es el ohmio-metro [ $\Omega$ -m]. La resistividad aparente del terreno puede variar de gran manera a lo largo de su profundidad, debido a las diferencias en el porcentaje de humedad, el tipo de material del suelo, la temperatura, la edad de la formación geológica, la composición química y la concentración de sales disueltas en el agua. Los terrenos con menor resistividad son los que contienen residuos vegetales, pantanos, los situados en el fondo de los valles y en las riberas de los ríos. Los de mayor resistividad son los arenosos, rocosos y los situados en lugares altos y desprovistos de vegetación.

**Tabla 1.**  
Valores referenciales de la resistividad del terreno [2].

TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD [ $\Omega$ -m]
Vegetales húmedos	10 - 50
Arcillas, gredas, limos	20 - 60
Arenas arcillosas	80 - 120
Fangos, turbas	150 - 300
Arenas	250 - 500
Suelos pedregosos	300 - 400
Rocas	1000 - 10000
Concreto húmedo	100 - 240
Concreto seco	10000 - 50000

**Medición de la resistencia de puesta a tierra**

Conocer el valor de la resistencia de puesta a tierra es muy importante para la ampliación o mantenimiento de la malla de puesta a tierra de una subestación. Al obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra, se puede comparar con los datos recomendados por las normas ANSI/IEEE 80 (0 - 10 $\Omega$ ), verificando así su calidad. Si el valor de la resistencia de puesta a tierra es superior a 10 $\Omega$ , hay indicio de un desgaste o defecto en la malla de puesta a tierra, como rotura de un conductor, fallos en las soldaduras, etc.

**Tabla 2**  
Valores referenciales de las resistencias máximas de puesta a tierra [3].

TIPO	Rmax DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión	10 $\Omega$
Protección contra rayos	10 $\Omega$
Neutro de acometida en baja tensión	25 $\Omega$

Para realizar una medida de resistencia de puesta a tierra, es necesario formar un circuito eléctrico, compuesto por un punto donde se inyecta corriente y un punto donde sale esta corriente. La corriente se inyecta a través del sistema de puesta a tierra a medir y se cierra a través de una jabalina enterrada en un pozo auxiliar, además puede estar compuesta por una tercera o cuarta varilla para realizar las mediciones.

**Medición de resistencia de puesta a tierra en Subestaciones Energizadas**

Medir la resistencia de toma de tierra en subestaciones energizadas es más complejo que hacerlo en subestaciones desenergizadas. Porque con la subestación energizada se producen corrientes parasitas o inducidas, interferencias electromagnéticas y otros factores, que pueden influir o dificultar en la obtención de mediciones adecuadas de la puesta a tierra. Debido a la influencia de la operación de la subestación, se requieren métodos y equipos más sofisticados y específicos para realizar la medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra.

**Importancia de medir la resistencia del sistema de puesta a tierra**

La medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra es necesaria por diferentes motivos, entre ellos:

- ✓ Determinar la resistencia actual de las conexiones a tierra.
- ✓ Verificar la necesidad de un nuevo sistema de puesta a tierra.
- ✓ Determinar los cambios en el sistema de puesta a tierra actual.
- ✓ Se verifica si es posible o no incorporar nuevos equipos o utilizar el mismo sistema de puesta a tierra para la protección contra descargas atmosféricas y otros.
- ✓ Determinar los valores de tensión de paso y de contacto y la posible elevación que resulta de una corriente de falla en el sistema.
- ✓ Dimensionar protecciones para el personal, los circuitos de potencia y comunicación.

**Componentes de la malla de Tierra**

No se sabe a qué profundidad del terreno está enterrada la malla de tierra, sin embargo, por comparación con otros sistemas de puesta a tierra de características similares, puede estimarse que se encuentra a una profundidad de 50 a 80 cm. Debe considerarse el área cubierta por la malla de tierra, si existe o no grava sobre la superficie del terreno. La malla de puesta a tierra puede estar compuesta por cables de cobre desnudo # 1/0 a 4/0 AWG. Se utiliza este tipo de cable, porque tiene una excelente conductividad eléctrica, buena resistencia mecánica y también es resistente a la corrosión.

El cable de la malla de tierra, debe soportar correcta y eficazmente las elevadas corrientes de un posible

cortocircuito o descarga atmosférica a tierra en la subestación. Estos cables se interconectan con las estructuras de las líneas de transmisión, de entrada y salida, transformadores de potencia, pararrayos, interruptores, seccionadores, transformadores de corriente y potencial, con todas las partes metálicas de los aparatos y equipos que se encuentran en la subestación, para la protección del personal y de los propios equipos.

**Estimación del tamaño de la malla de tierra**

Para realizar un análisis integral del sistema de puesta a tierra de una subestación, se toma como punto de partida la estimación de su tamaño, el cual incluye la ubicación exacta de cada uno de los elementos que componen la malla de puesta a tierra, tales como: cables de protección, cables de servicio, y el análisis respectivo de la condición física de sus materiales. Debe considerarse, el tamaño y la ubicación del transformador de potencia, interruptores, seccionadores, pararrayos, transformadores de corriente y potencial.

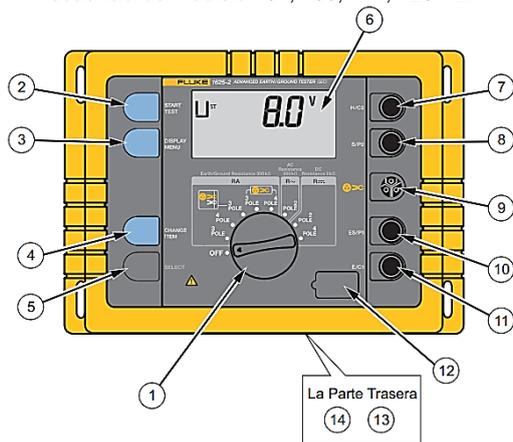
Debe hacerse un recorrido por la subestación, observando todos los componentes del sistema de puesta a tierra.

**Propuesta del equipo de medición**

Para el estudio de la medición del sistema de puesta a tierra de una subestación, se propone el Medidor Digital de Tierras FLUKE Modelo 1625-2 (Figura 1), con el cual se puede determinar la resistencia de puesta a tierra de la malla y la resistividad aparente del terreno, de una subestación energizada.

**Características del instrumento de medición**

- ✓ Mediciones de masa/tierra de 3 y 4 polos
- ✓ Comprobación de la resistividad de suelos, con 4 polos
- ✓ Pruebas selectivas, sin desconexión del conductor de tierra (1 pinza)
- ✓ Pruebas sin estacas, prueba rápida de bucle de tierra (2 pinzas)
- ✓ Frecuencia de medición 94, 105, 111, 128 Hz.



Fuente: <https://docs.rs-online.com/4f9b/0900766b81718b0e.pdf>

**Figura 1:** Medidor Digital de Tierras FLUKE Modelo 1625-2

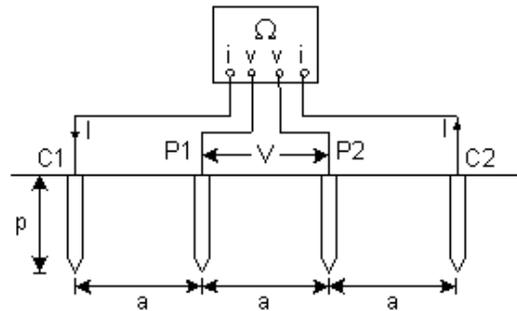
1. Interruptor giratorio para alternar las funciones de medición y de encendido/apagado
2. "INICIO" para iniciar la función de medición seleccionada
3. "MOSTRAR MENU" para seleccionar el ajuste o mostrar los datos de la prueba.
4. "CAMBIAR ELEMENTO" para alternar el valor del ajuste seleccionado.
5. "SELECCIONAR" para confirmar el valor del ajuste.
6. Pantalla de cristal líquido LCD
7. Conexión "H/C2" para masa auxiliar (4 mm φ)
8. Conexión "S/P2" para sonda (4 mm φ)

9. Conexión para detectar pinza de corriente de prueba.
10. Conexión "ES/P1" para sondas de electrodos de masa (4 mm φ)
11. Conexión "E/C1" para el electrodo de masa/tierra que se va a medir (4 mm φ)
12. Puerto USB tipo B
13. Compartimento para 6 baterías alcalinas (tipo AA, LR6) Tornillos para fijar la batería en el compartimento [8].

**Propuestas de mediciones**

**Medición de la resistividad del terreno  
Método de Wenner (4 puntos)**

Para la medición de la resistencia del terreno, se empleará el método de Wenner, que emplea cuatro jabalinas alineadas, igualmente espaciadas y enterradas a una misma profundidad, las mismas se conectarán a un medidor de resistencia, en los terminales de corriente y tensión respectivamente, como se muestra en la figura 2:



**Figura 2.** Método de Wenner para medir la resistividad del terreno.

58% de la distribución de la corriente, ocurre a una profundidad igual a la distancia entre electrodos. Una vez obtenidos los valores de la resistencia del terreno por este método, la resistividad del mismo se calculará empleando la siguiente fórmula de Palmer:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m]$$

Dónde:

- p: Resistividad aparente del terreno [Ω · m]
- a: Distancia entre los electrodos [m]
- p: Profundidad de los electrodos enterrados [m]
- R: Resistencia medida con el instrumento.

Se realizarán diversas mediciones, con las varillas alineadas pero alejadas de las líneas de entrada y salida de la subestación y para diferentes espaciamentos entre ellas.

Ejemplo de mediciones realizadas, por el método de Wenner.

**Tabla 3**  
**Distancia entre electrodos "a", resistencia medida y la resistividad calculada.**

p [m]	a [m]	R [Ω]	ρ [Ω·m]
0.3	1	25	178.1
0.3	2	20	260.9
0.3	4	17	431.4
0.3	6	15	568.0
0.3	8	13	655.1
0.3	16	8	804.7

Al llevar a cabo una serie de lecturas con diferentes espaciamientos de los electrodos, se encuentran distintos valores de resistividad, que al graficarse, indican la presencia o no de distintas capas de suelo, su respectiva resistividad y la profundidad de la capa más cerca de la superficie. Estas graficas pueden representar resistividades, ascendentes, descendentes u homogéneas.

**Medición de la resistencia de puesta a tierra Método de la caída de potencial (3 puntos)**

El método de prueba de la caída de potencial también se conoce como el método del 62%, y se utiliza para medir la resistencia total de un sistema de puesta a tierra.

Para realizar la verificación por este método, se necesitan dos electrodos auxiliares de conexión a tierra, uno es el electrodo de corriente (B) que se coloca a una distancia de 5 veces la diagonal de la malla de tierra, dentro un poso auxiliar de 1m de diámetro por 1m de profundidad, el cual debe ser tratado, para obtener una resistencia mínima de 10 Ω, y el otro es el electrodo de potencial (P), ubicado al 62% de la distancia total. Estos se colocan en línea recta y lejos de la malla de tierra (A) bajo prueba y se toman diferentes lecturas.

Se obtendrán 10 medidas a lo largo del punto A y B, estos puntos de medición serán al 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%. La norma IEEE-80 recomienda realizar dos mediciones adicionales: al 52% y al 72% y las diferencias con la resistencia medida al 62% deben ser muy pequeñas.

El instrumento de medición Digital de Tierra FLUKE Modelo 1625-2 genera una corriente conocida entre el electrodo de corriente (B) y la malla de tierra (A), mientras se mide la caída de potencial entre el electrodo auxiliar interno (P) y la malla de tierra (A); el medidor de tierra, empleando la ley de Ohm, calcula automáticamente el valor total de la resistencia de puesta a tierra. La figura 2 muestra el esquema de conexión para la medición de la resistencia según el método de la caída de potencial.

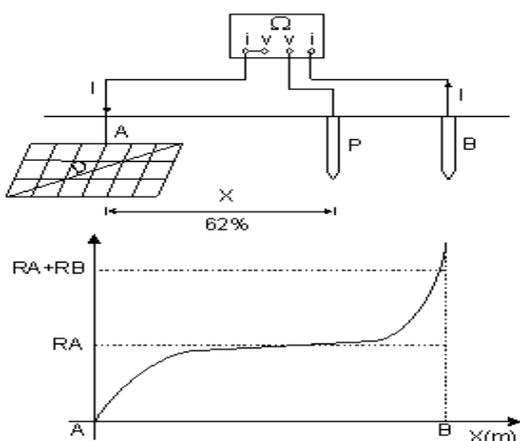


Figura 3. Método de la caída de potencial para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra [4].

**Condiciones para la medición**

- ✓ La distancia considerada entre A y B está en función de la diagonal de la malla de tierra multiplicada por 5.
- ✓ El valor inicial de la distancia (x), se considerará al 62 % de la distancia total entre A y B.
- ✓ El recorrido de la varilla P, deberá ser hecho a

intervalos de 1.5 m.

- ✓ Las jabalinas utilizadas deben ser de COPPERWELD de 1.2m de longitud y con un diámetro de 5/8" o similar.
- ✓ Las jabalinas deben estar clavadas o enterradas, mínimamente a 70 cm de profundidad del terreno.
- ✓ Los conductores de conexión deben poseer una sección mínima de 10 mm<sup>2</sup> (≈ N° 8 AWG).
- ✓ Las mediciones deben ser realizadas en la estación del año más desfavorable (época seca).
- ✓ Si hubiera oscilaciones de lectura durante la medición, las jabalinas deben alinearse en otra dirección.

**Otras recomendaciones**

La manera de realizar medidas de campo de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones energizadas, hace que estas pruebas sean más delicadas.

- ✓ No realizar las pruebas, si hubo una lluvia en la zona, por lo menos en los dos días anteriores o en temporadas de lluvias y tormentas.
- ✓ Durante la ejecución de trabajos de mantenimiento sobre la infraestructura de las proximidades.
- ✓ En el caso de realizar mediciones en zonas donde se encuentran enterrados objetos metálicos (tubo, barras, etc.) es necesario realizar mediciones ortogonales, para eliminar la influencia de estos objetos en la medición.
- ✓ Si no es posible desenergizar la subestación y desconectar completamente la malla de tierra, se debe seguir un procedimiento de seguridad estrictamente organizado, que incluye los siguientes aspectos:
  - Una persona a cargo del trabajo.
  - Comunicación entre todos los que participan de la prueba, por radio o teléfono móvil.
  - Uso de guantes de goma y calzado adecuado EPP.
  - Suspensión de la prueba durante una tormenta eléctrica u otras condiciones climáticas adversas.
- ✓ En el caso de que la tierra esté muy seca, es recomendable humedecer los electrodos, especialmente el de corriente, para obtener un buen contacto entre el electrodo auxiliar y tierra.
- ✓ La presencia de líneas de alta tensión energizadas en las proximidades de la zona donde se está realizando la medida afecta a la calidad de la misma, en particular cuando se mide de un modo paralelo a la línea energizada.
- ✓ Para evitar esta interferencia, la medición debe realizarse lejos o en dirección perpendicular a la línea energizada.
- ✓ Durante la ejecución de las mediciones de campo, el ruido excesivo puede interferir con la medición debido a la gran longitud de los cables de los electrodos de prueba. El voltaje de interferencia debe estar dentro de la tolerancia del medidor; para reducir esta interferencia, trenzar los cables que conducen a los electrodos de prueba. Esto puede cancelar los voltajes de manera común entre los dos conductores.

**CONCLUSIONES**

En base al estudio realizado para efectuar la medición del sistema de puesta a tierra de una Subestación energizada, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- ✓ Con el Medidor Digital de Tierras FLUKE Modelo 1625-2, se pueden realizar medidas del sistema de puesta a tierra de una Subestación sin dejarlo fuera de servicio, proponiendo los procedimientos de medida del sistema de puesta a tierra y la resistividad aparente del Terreno.

- ✓ Toda evaluación de un sistema de puesta a tierra consistirá en identificar los problemas existentes, verificar el valor de la resistencia y el estado actual de conservación de todos los elementos de puesta a tierra. Los defectos encontrados deben ser inmediatamente comunicados para que puedan ser reparados o cambiados.
- ✓ Con los procedimientos descritos para la evaluación de sistemas de puesta a tierra en subestaciones energizadas, se pretende coadyuvar al personal encargado de realizar el mantenimiento de las redes de puesta a tierra en las subestaciones.

**BIBLIOGRAFIA**

[1] Castaño, José Samuel Ramírez - Plata, Eduardo Antonio Cano. Sistemas de puesta a tierra, 2011.

[2] Dawalibi F. - Mukhedkar D., "Influence of ground rods on grounding grids" IEEE PAS, 1979.

[3] IEEE 80-2000, Guide for safety in AC Substation Grounding

[4] Kindermann, Geraldo - Campagnolo, Jorge Mário. Aterramiento Eléctrico. Editores Sagra DC Luzzatto, 1995.

[5] Mamani Villca, Néstor S. Manual para el diseño de sistemas de puesta a tierra, 1993.

[6] Manual técnico elaborado para procobre-Chile, primera edición, 1999.

[7] Martin, Jose Raul. Diseño de Subestaciones Eléctricas. Editorial McGrawHill, 1987.

[8] Medidor Digital de Tierras FLUKE Modelo 1625-2, 2014.

[9] Moreno, Hilton e Costa, Paulo Fernández. Manual de aterramiento eléctrico, 2011.

[10] Silva, Arnaldo fleck. Análisis del aterramiento de subestaciones, 2012.

[11] Vittorio Re. Instalaciones de puesta a tierra. Editorial Marcombo, 1989.

[12] Zoppetti Judez, Gaudencio. Estaciones transformadoras y de distribución. Editorial Gustavo Gili, 1981.



**FACULTAD DE  
TECNOLOGÍA**

ELECTRICIDAD  
INDUSTRIAL - UMSA







la mejor

>>>>

>>>>





**CURSO  
PREFACULTATIVO  
SEMESTRE II - 2023**

**INSCRIPCIONES:  
ABIERTAS**

**REQUISITOS**

1. FOTOCOPIA DE CERTIFICADO DE NACIMIENTO
2. FOTOCOPIA DE CÉDULA DE IDENTIDAD
3. FOTOCOPIA DE TÍTULO DE BACHILLER
4. 2 FOTOGRAFÍAS 3X3 FONDO CELESTE SUAVE
5. LLENAR FORMULARIO DE INSCRIPCIÓN INGRESANDO:

- AL ENLACE <https://sia.umsa.bo/preuniversitario>
- O ESCANEANDO EL QR

6. EFECTUAR EL DEPÓSITO BANCARIO DE BS. 600 EN 24 hrs.

0000

76790401 – 60658245

<http://electricidad.umsa.bo>

>>>>



INGRESE EL CÓDIGO QR

<https://sia.umsa.bo/preuniversitario>

Av. Arce N° 2299, 5to. Piso EDIFICIO FACULTAD DE TECNOLOGÍA, BLOQUE A

POTENCIA, ENERGÍA Y CALIDAD **¡ADELANTE ELECTRICIDAD!**

>>>>

(\*), Licenciado en Electricidad Industrial, Docente carrera de Electricidad Industrial. Facultad de Tecnología – UMSA

# MODELO DIDÁCTICO PARA LA LEY DE GAUSS EN LA DETERMINACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

Julio Edgar Chambi Bellido\*

**RESUMEN**

En este trabajo se aborda el estudio de la Ley de Gauss para favorecer la construcción de algunas nociones en los estudiantes de tercer semestre de la licenciatura en Electricidad Industrial entorno a dicha Ley. Para el desarrollo de la propuesta entorno se hizo uso del modelo didáctico, que propone estudiar los problemas en el aula como se hace en la actividad científica. Aclarando que la actividad científica no tiene un método rígido, sino que cuenta con algunos aspectos esenciales que son de amplio consenso.

**PALABRAS CLAVE:** Ley de Gauss, campo eléctrico y distribución de cargas eléctricas.

**ABSTRACT**

In this work, the study of Gauss's Law is addressed to promote the construction of some notions in third-semester students of the Industrial Electricity degree program regarding this Law. For the development of the proposal, the didactic model was used, which suggests studying problems in the classroom as it is done in scientific activity. Clarifying that scientific activity does not have a rigid method, but it has some essential aspects that are widely agreed upon..

**KEYWORDS:** Gauss' law, electric field, charge distribution.

**RESUMO**

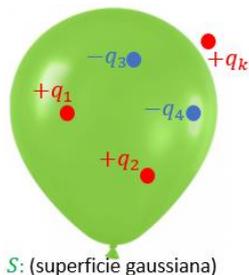
Neste trabalho, aborda-se o estudo da Lei de Gauss para promover a construção de algumas noções nos estudantes do terceiro semestre do curso de Eletricidade Industrial em relação a essa Lei. Para o desenvolvimento da proposta, foi utilizado o modelo didático, que propõe estudar os problemas em sala de aula como se faz na atividade científica. Esclarecendo que a atividade científica não possui um método rígido, mas conta com alguns aspectos essenciais que são amplamente consensuais.

**PALABRAS CLAVE:** Lei de Gauss, campo elétrico e distribuição de cargas elétricas

**History of the article:** Received 31/03/2023. Style review 17/04/2023. Accepted 20/04/202

**INTRODUCCIÓN****Ley de Gauss**

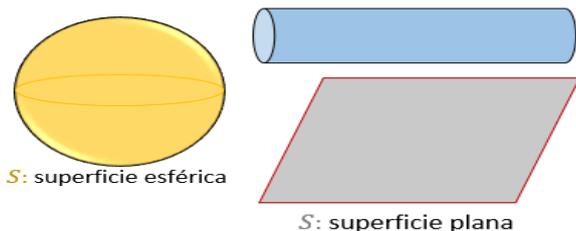
Esta Ley enuncia la relación entre el flujo del campo a través de una superficie gaussiana con la carga encerrada en el interior de esta. La figura 1. Es de resaltar que, para simplificar los cálculos, las superficies imaginarias en las que se encierra la carga para calcular el campo eléctrico suelen ser aquellas cuyas áreas son conocidas. De este modo, si el conductor que esta electrificado y cumple el papel de carga encerrada.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 1:** Superficie imaginaria que encierra carga<sup>5</sup>

Vamos a abordar la simetría de formas geométricas la simetría como esferas, cilindros y esferas ya que estas suelen ser las formas de los electrodos como se muestra en la figura 2.



**Figura 2:** simetría de esfera, cilindro y plano

**Simetría**

En general, la simetría cumple con los siguientes principios.

**1. Simetría plana y esférica:**

- Para la simetría plana, la translación paralela sobre el eje es válida, no coincidiendo de la misma manera para la simetría esférica.
- La rotación sobre su propio centro y en cualquier ángulo es válido para la simetría esférica, mientras que en la simetría plana solo es válida en un ángulo de 180 grados para que conserve la misma distribución de carga.
- La reflexión tanto en el eje como paralela al eje es válida para ambas simetrías.

**2. Simetría cilíndrica:**

- Traslación paralela al eje del cilindro. Si el cilindro es infinitamente largo no habrá diferencia si se traslada mucho o poco.
- Rotación alrededor del eje del cilindro. Si se hace alguna rotación del cilindro. No es posible detectar algún cambio en la observación del cilindro y tampoco se observa algún cambio en el campo eléctrico generado cuando el cilindro está cargado.
- Reflexiones en cualquier plano que contiene o es perpendicular al eje del cilindro. Intercambiando la parte superior por la parte inferior, la parte de adelante por la parte de atrás, la derecha por la izquierda, no se detecta ningún cambio.

**3. Flujo eléctrico:** se trata del flujo vectorial, el cual determina la cantidad de líneas del campo vectorial a través de una superficie cerrada. Para una superficie cerrada cualquiera, el flujo vectorial neto (saliente y entrante) está dado por el producto de la componente de la magnitud según la dirección hacia afuera, por el área de la superficie (Feynman, 1963, p.15).

**¿Cómo se calcula el flujo eléctrico?**

En este punto es interesante abrir un pequeño debate sobre qué factores puede depender esa magnitud, favoreciendo de esta manera el aprendizaje activo mediante la emisión de

<sup>5</sup> El procedimiento seguido para electrificar los electrodos es ubicándolos dentro de un circuito eléctrico. Un electrodo carga positivamente usualmente se llama ánodo y el electrodo cargado negativamente cátodo. Entonces, según la forma de los electrodos electrificados se configura la geometría del campo eléctrico.

hipótesis. Los estudiantes llegaran por sí mismos a la conclusión de que el flujo ( $\Phi$ ) depende linealmente de la intensidad del campo eléctrico ( $E$ ) y de la superficie ( $S$ ), por lo tanto, lo podemos expresar como:

$$\Phi = K \cdot E \cdot S.$$

$K=1$  tomaremos como valor de la constante de proporcionalidad para simplificar los cálculos.

No obstante, una dependencia que a los estudiantes se les suele escapar es que el flujo también depende de la orientación del campo con respecto a la superficie. Para ello, se plantearía la siguiente cuestión.

Habéis dicho muy acertadamente que el flujo depende de la intensidad del campo eléctrico y de la superficie. Pero si sumerjo un aro en un río paralelamente a su corriente.

¿Qué caudal/flujo atraviesa esa superficie?

De los conocimientos matemáticos que tienen los estudiantes de este nivel, sabrán que las superficies se representan por vectores, cuyo modulo es el área de la superficie, la dirección perpendicular a la propia superficie y el sentido si es una superficie cerrada siempre hacia el exterior de la superficie, y si es plana la podemos representar en el sentido que mejor nos convenga.

Los estudiantes entenderán enseguida que si el vector superficie es perpendicular a la corriente del río no atraviesa nada de agua por el arco y por lo tanto el flujo es nulo. Así pues, el flujo también depende del ángulo que forme la corriente con la superficie; paralelamente se debe relacionar este concepto con el campo eléctrico (líneas de campo). Para estudiar la dependencia del flujo con el ángulo se plantea la siguiente cuestión.

¿Cuándo será máximo y mínimo el flujo?

Los estudiantes verán con similitud del río que cuando el vector superficie es paralelo a la corriente del río o a las líneas de campo eléctrico, el flujo será máximo; y cuando forman  $90^\circ$  el flujo es nulo. La operación matemática que conoce el estudiantado que opera con dos vectores y es máximo en  $0^\circ$  y mínima en  $90^\circ$  es el producto escalar. Por lo tanto, se puede establecer, llegados a este punto, que el flujo eléctrico vendrá dado por el producto escalar entre el vector campo eléctrico y el vector superficie, que forman en ángulo  $\theta$  entre ellos

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = E S \cos \theta$$

¿Qué sucede con la expresión interior si el campo eléctrico no fuera constante en toda la superficie escogida?

Los estudiantes, con ayuda del profesor, deben razonar que, en la materia de física, cuando las magnitudes no son constantes, se utilizan infinitesimal  $dS$  (se puede considerar puntual) el campo se puede considerar constante, y por esa superficie infinitamente pequeña atravesaría un diferencial de flujo  $d\Phi$  (o escalar flujo elemental), de tal manera que:

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Por lo tanto, despejando el flujo de la expresión anterior, la expresión más genérica para el flujo eléctrico es:

$$\Phi = \int \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

#### 4. Propiedades del flujo:

- a) La primera propiedad está relacionada con dirección del campo eléctrico y establece que una carga debe ser positiva donde las líneas de campo apunten hacia adentro de la caja, negativa donde

las líneas de campo apunten hacia adentro de la caja y cero donde el campo eléctrico no perfora la superficie.

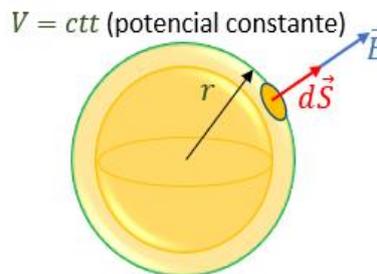
- b) La segunda propiedad está relacionada con la magnitud del campo eléctrico y establece que el campo es directamente proporcional a la carga y, a su vez, son proporcionales al flujo.
- c) La tercera propiedad está relacionada con el área de la superficie que encierran la carga.

$$\int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$

Esta expresión cálculo del flujo puede ser una expresión o cálculo complejo, en determinados casos se simplifica y nos ayuda a calcular en campo eléctrico.

El tipo de casos en los que es así cuando tenemos determinado simetría en la distribución de cargas, por ejemplo, una distribución esférica de carga es decir las mismas cargas a la misma distancia de un punto del centro de distribución o lo mismo alrededor de un eje o sobre un plano cargado uniformemente indefinido en estos tres casos podemos hacer ciertas simplificaciones.

En el caso de una distribución esférica el punto de partida sería considerar cuales son las superficies equipotenciales, una superficie equipotencial será una superficie que tenga una forma esférica concéntrica con la distribución de carga, desde todos los puntos de esa superficie ( $d\vec{S}$ ) observaremos la misma cantidad de carga la misma distribución de carga por lo tanto tenemos el mismo potencial ( $V = constante$ ), como se muestra en la figura 3.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Superficie equipotencial esférica.

Debido a las características de campo eléctrico, que deriva del potencial y en todas esas posiciones, el módulo del campo eléctrico debe ser el mismo, además la dirección del campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) será en la dirección del gradiente del potencial es decir normal a esa superficie equipotencial, por lo tanto nos encontramos con que las superficies equipotenciales serán esféricas concéntricas con la distribución de carga y el campo eléctrico ira en dirección radial a partir del centro de la distribución, esto nos simplifica muchísimo el cálculo de flujo del campo eléctrico, si el campo eléctrico es uniforme en toda la superficie y el campo eléctrico con dirección radial, cualquier superficie elemental ( $d\vec{S}$ ) que nosotros escogemos será paralela al campo eléctrico de esa manera el flujo será el producto escalar será el producto de los módulos, el campo eléctrico es un campo uniforme y por lo tanto lo único que tenemos que calcular sería el producto del campo eléctrico por el área de la superficie de la esfera.

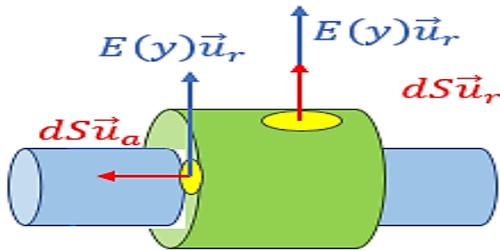
$$r = constante \Rightarrow \begin{cases} V = constante \\ |E^r| = E (r = constante) \end{cases}$$

$$\vec{E} = -\text{gra } V \Rightarrow \vec{E} // d\vec{S}$$

$$\int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_s E \cdot dS = E \int_s dS$$

**Superficie cilíndrica:**

En el caso de un cilindro sería algo similar tenemos una distribución muy larga alrededor de cargas distribuidas a lo largo del eje, las mismas cargas a la misma distancia del eje, y escoger una superficie equipotencial, sería una superficie cilíndrica, la superficie lateral del cilindro está a la misma distancia del eje, por lo tanto se observa la misma carga a la misma distancia, por lo tanto podríamos establecer la misma relación de anterior calculo, el potencial será constante, el módulo del campo también será constante y también por la relación entre el campo y el potencial menos el gradiente, el campo eléctrico normal a la superficie equipotencial, por lo tanto será normal al eje  $E(y)\vec{u}_r$ , si escogemos una superficie de Gauss, debemos tener en cuenta que la superficie gaussiana debe ser una superficie cerrada, por lo tanto la superficie lateral que es la equipotencial no lo será suficiente, por tanto se tendrá que tomar en cuenta las dos bases de este cilindro, tomamos un cilindro en la que la superficie lateral sea equipotencial y las dos bases sean normales a lo que sería el eje del cilindro, de esa manera la superficie lateral sean paralelos al campo eléctrico  $dS\vec{u}_r$  sigue siendo normal al eje  $dS\vec{u}_r$  y la superficie elemental sería normal al escoger de esta manera sería normal al campo eléctrico, figura 4, de esa forma al aplicar el cálculo del flujo sería la suma del flujo a través de la superficie lateral la superficie equipotencial más el flujo de las bases como en las bases la normal es paralelo al eje el flujo es cero, únicamente tendremos flujo en las superficie lateral, el campo eléctrico paralelo a las superficies elementales por lo tanto el producto escalar, es el producto de los módulos, el campo eléctrico uniforme por lo tanto lo que tenemos es, el campo eléctrico en esa superficie equipotencial, multiplicado por el área de la superficie lateral del cilindro.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Superficie equipotencial cilíndrica.

$$r = \text{constante} \Rightarrow \begin{cases} V = \text{constante} \\ |\vec{E}| = E (r = \text{constante}) \end{cases}$$

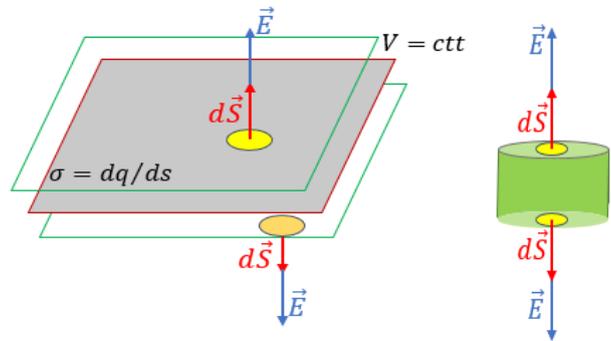
$$\vec{E} = -\text{gra } V \Rightarrow \vec{E} // d\vec{S}$$

$$\int_{SL} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \int_{SB} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_{SL} E \cdot dS = E \int_{SL} dS$$

**Superficie plana:**

En el último caso planteado de una distribución indefinida de cargas  $\sigma = dq/ds$  uniforme, en este caso las superficies equipotenciales pasaría de algo parecido a una superficie equipotencial y una superficie paralela a la distribución de cargas, en principio la consideramos que por la parte de arriba y la parte de abajo tendríamos el mismo potencial ( $V = \text{constante}$ ) a la misma distancia en la cual tenemos dos superficies equipotenciales del mismo valor, porque se observa la misma carga y por lo tanto al igual que en los anteriores criterios el campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) será normal a la superficie ( $d\vec{S}$ ) equipotencial, en el caso del signo positivo el ( $\vec{E}$ ) saldrá de la carga, por lo tanto en la parte de arriba el mismo sentido como en la parte de abajo en sentido es opuesto, como escoger en este caso una superficie cerrada para aplicar la Ley de Gauss, podemos seguir algo parecido a los casos ya analizados anteriormente, tenemos por ejemplo una superficie cilíndrica que tenga una de sus bases en la parte de arriba la superficie equipotencial y la otra base del cilindro en la parte de abajo la superficie equipotencial y en la superficie lateral al igual como se analizó la superficie elemental ( $d\vec{S}$ ) y el campo eléctrico son perpendiculares por lo tanto no tenemos flujo, al calcular el flujo en las superficies laterales ( $SL$ ) sería nulo, y en las superficies de base ( $SB$ ) y como tenemos la base de arriba y la de abajo figura 5, el resultado vendrá a ser el producto de la superficie por el campo eléctrico multiplicado por dos debido a las dos superficies, y como los dos vectores tienen la misma dirección.

El producto escalar se convierte en el producto de los módulos, que vendría a ser dos veces el flujo a través de una de las bases, que finalmente es el producto del campo eléctrico por la superficie de una de las bases.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Superficie equipotencial cilíndrica.

$$\int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E} = -\text{gra } V \Rightarrow \vec{E} // d\vec{S}$$

$$\int_{SL} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \int_{SB} \vec{E} \cdot d\vec{S} = 2 \int_{SB} E \cdot dS = 2E S_B$$

**CONCLUSIONES**

Los estudiantes se permiten conocer aspectos con los que no estaban relacionados en la construcción conceptual con relación a la Ley de Gauss, porque como se puede constatar en la aplicación de la determinación del campo eléctrico; los casos prácticos han servido para calcular el campo eléctrico de varias distribuciones de carga (puntual, lineal, superficial y volumétrica), lo cual no suele ser habitual de ver en la bibliografía para la aplicación de este teorema al cálculo del campo eléctrico, pues en la mayoría de los casos se considera que el medio que calculamos es campo eléctrico es aire o vacío y  $\epsilon = \epsilon_0$ . De hecho, en muchas referencias se anuncia el propio teorema como  $\Phi = q_{in}/\epsilon_0$  directamente, lo cual es impreciso, pues esta expresión es solo válida cuando se calcula el campo en el aire o en el vacío.

**BIBLIOGRAFIA**

Arcá, M. (s.f.). El desarrollo del proceso cognitivo como tarea de la educación.

Cardenas, L. M., Ramirez Perez, D. R. (2009). Una ampliación de la experiencia en el fenómeno electrostático. Universidad Pedagógica Nacional.

Chabay, R., & Sherwood, B. (1994) Electric and magnetic interactions. Wiley.

Gettys, E. J. Keller, F., & Fernández, M. (1991), Física Clásica y Moderna. Madrid: McGraw-Hill.

Guisasola, J., Montero, A., & Fernandez, M. (2008). La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo. Revista Brasileira de Ensino de física, 30(1), 1-8.

Guisasola, J., salinas, J., Almudi, J. M., & Velasco, S. (2003). Análisis de los procesos de aplicación de las Leyes de Gauss y Ampere por estudiantes universitarios de España y Argentina.

Halliday, D., & Resnick, R. (1961). Física para estudiantes de ciencia e Ingeniería. New York: John Wiley & Sons.

Purcell, E. M. (1988). Electricidad y Magnetismo - Berkeley Physics course (vol. 2). Barcelona: Reverté S.A.

Uribe Agudelo, A. (2014). Diseño de experimentos para la enseñanza de los conceptos de carga eléctrica y campo eléctrico. Universidad Pedagógica Nacional.

Yung, H. D., & Roger A. Freedman. (2009). Física Universitaria, con física moderna (Vol. Volumen II). Ciudad de México: Pearson educación.

Wilson, J. D., Buffa, A. J., & Lou, B. (2017). Física (Sexta ed.). Ciudad de México, México: Pearson educación.

J. Edminister: Electromagnetismo. Edit. Schaum.

Miguel Furman: Electromagnetismo. Edit. A. Bello.

(\*), Licenciado en Mecánica Automotriz,  
Docente carrera de Electricidad Industrial  
Facultad de Tecnología – UMSA

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**UNIDAD DE POSTGRADO - FACULTAD DE TECNOLOGÍA**

**ESPECIALIDAD EN:**  
**CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA**

**DIRIGIDO A:**  
- LICENCIADOS  
- PROFESIONALES DE INSTITUTOS TÉCNICOS SUPERIORES  
- PROFESIONALES DEL SISTEMA UNIVERSITARIO EN GRAL

**PROXIMAMENTE 2da VERSIÓN**

**MODALIDAD:**  
SEMIPRESENCIAL

**60658245**

**GRADO ACADÉMICO:**  
**ESPECIALISTA TÉCNICO EN:**  
**CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**UNIDAD DE POSTGRADO - FACULTAD DE TECNOLOGÍA**

**DIPLOMADO**  
**Implementación y Manejo de Laboratorios Tecnológicos Aplicados a Física y Química**  
**SEGUNDA VERSIÓN**

**AMPLIAMOS INSCRIPCIONES**

**INFORMACIÓN**

- INVERSIÓN**
- Al Contado: Bs. 2880
  - Al Crédito: Bs. 3008 en 3 Cuotas
  - Profesionales del Magisterio: Bs. 2500
  - Descuento Facultativo: Bs. 2304
  - Matriculación: Bs. 420
- MODALIDAD**
- VIRTUAL**
  - HORARIOS:** Lunes a Jueves de 19:00 - 22:00
- REQUISITOS**
- Nota de Admisión y Compromiso (Solicitar en la Unidad de Postgrado)
  - Fotocopia Legalizada Título Profesional (Original)
  - Fotocopia simple de Diploma Académico
  - Fotocopia de Carnet de Identidad
  - 2 Fotografías 4x4, fondo color azul
  - Currículum Vitae (NO documentado)

- INSCRIPCIONES**
- del 24 al 28 de julio del 2023
- INICIO DE CLASES**
- 31 de julio del 2023
- INSCRIBETE!!!**

Este programa está diseñado para brindar a los participantes los conocimientos y habilidades necesarios para desarrollar y gestionar eficientemente laboratorios tecnológicos en el ámbito de la física y la química.

**69949634**

**Av. Arce # 2295 - Piso 2**  
**Unidad de Postgrado**  
**Facultad de Tecnología**

# CONTROL DE PERDIDAS DE ENERGIA ELECTRICA EN REDES DE BAJA TENSION

Reynaldo Condori Paucara\*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>En presente artículo trata de mostrar una propuesta de metodología de control de pérdidas de energía eléctrica en baja tensión. También, las ecuaciones a las que se rigen para realizar balances energéticos para un adecuado control. Así también, se conceptualiza algunos términos que nos permiten analizar las pérdidas de energía eléctrica.</p>	<p>This article tries to show a proposal for a control methodology for low voltage electrical energy losses. Also, the equations that are governed to perform energy balances for adequate control. Likewise, some terms are conceptualized that allow us to analyze the losses of electrical energy.</p>	<p>Este artigo busca apresentar uma proposta de metodologia de controle de perdas de energia elétrica em baixa tensão. Além disso, as equações que são governadas para realizar balanços de energia para um controle adequado. Da mesma forma, são conceituados alguns termos que permitem analisar as perdas de energia elétrica.</p>
<p><b>PALABRAS CLAVE:</b> Perdidas, metodología, control, energia, balances.</p>	<p><b>KEYWORDS:</b> Losses, methodology, control, energy, balances..</p>	<p><b>PALAVRAS-CHAVE:</b> Perdas, metodologia, controle, energia, balanços.</p>
<p><b>History of the article:</b> Received 31/03/2023. Style review 17/04/2023. Accepted 20/04/2023</p>		

## INTRODUCCIÓN

La electricidad es la forma de energía más utilizada hoy en día en la industria y en los hogares, es una forma de energía relativamente fácil de producir en grandes cantidades, de transportar a largas distancias, de transformar en otros tipos de energía y de consumir de forma aceptablemente limpia. Está presente en todos los procesos industriales y en prácticamente todas las actividades humanas por lo que se puede considerar hoy en día como un bien básico insustituible (Sobrevila & Farina, 2009).

Así también, en un sistema eléctrico se tienen pérdidas de energía desde la generación hasta que se entrega a los clientes finales. En todos los sectores eléctricos se producen pérdidas, pero en un mayor porcentaje se presentan en el sistema de distribución secundaria. Por eso es importante tomar acciones para un control adecuado de las pérdidas de energía eléctrica.

## DESARROLLO.

El presente artículo tiene la finalidad de proponer una metodología para el control de las pérdidas de energía eléctrica en baja tensión. Así mismo, las empresas Distribuidoras de electricidad tienen mayores problemas de controlar las pérdidas de energía eléctrica, debido a la magnitud de consumidores que se conectan a la red de baja tensión.

### Clasificación de las pérdidas de energía eléctrica.

#### Pérdidas técnicas.

Según (OLADA, 1990), es el conjunto de las pérdidas eléctricas de un sistema debidas a fenómenos físicos son las denominadas pérdidas técnicas del mismo. Estas pérdidas se deben a las condiciones propias de la conducción y transmisión de la energía eléctrica.

#### Pérdidas no técnicas.

Según (OLADA, 1990), las pérdidas no técnicas son las calculadas como la diferencia entre las pérdidas totales de sistema eléctrico y las pérdidas técnicas estimadas por el mismo.

Las pérdidas no técnicas se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios. Entre los más convenientes se encuentran los siguientes:

- Clasificación según la causa que las produce.
- Clasificación según su relación con las actividades administrativas de la empresa.

En un sistema de distribución las pérdidas no técnicas son

ocasionadas por: consumidores regulados, con el afán de reducir el costo de su factura.

### Balances de energía.

Según (OLADA, 1990), en todo sistema eléctrico se realizan multitud de transferencias de energía en un periodo de tiempo tanto internas al mismo sistema como con otros sistemas eléctricos. Estas transferencias se deben registrar y llevar a balances de energía de los cuales tienen el propósito de consignar los datos más importantes de la operación de los sistemas durante el periodo considerado.

La ecuación característica para realizar el balance energético, se expresa:

$$E_S = E_C + E_P \quad (1)$$

Donde:

- $E_S$ : Energía suministrada
- $E_C$ : Energía consumida por clientes
- $E_P$ : Energía pérdida total

### Metodología de control de pérdidas eléctricas.

La presente metodología mostrada en la figura 1, más allá de ser una propuesta se puede observar un flujograma del proceso de control de pérdidas.

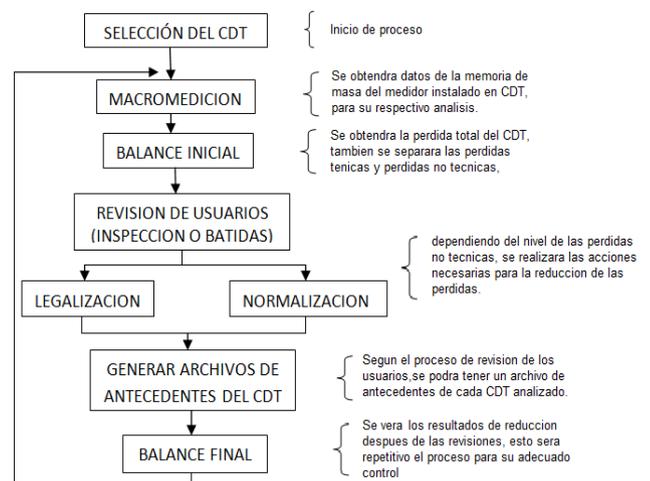


Figura 1. Flujo de proceso de control de pérdidas.

### Centro de transformación (CDT).

Centro de transformación, también conocido como transformadores de distribución, se conectan a un circuito primario para reducir el nivel de tensión a valores que puedan

ser utilizados por los usuarios pudiendo ser trifásicos y monofásicos. A estos se los puede encontrar montados sobre postes, cámaras subterráneas. Además, los centros de transformación se encuentran ubicados cerca de los centros de consumo. (Ramirez Castaño, 2004).



**Figura 2.** Centro de Transformación – Delta abierto.  
Crédito: Reynaldo Condori Paucara

El centro de transformación seleccionado debe cumplir con las siguientes condiciones, tal como se muestra en la figura 2. El mismo, se puede describir:

- Instalación de equipamiento necesario para la medición.
- Medidor de energía con las características de almacenar registros.

El medidor de energía instalado en centro de transformación debe tener la principal característica de almacenar memoria de masa integrada en tiempos de 15 minutos, los parámetros necesarios son:

- Potencia Activa (W).
- Potencia Reactiva (Var).
- Tensiones de las 3 fases. (Volt)
- Corrientes de las 3 fases. (Amp)

Con estos datos se podrá obtener la energía suministrada y si contamos con el dato de la energía consumida ya se podrá realizar los balances energéticos en función a la ecuación (1). donde con la que podremos obtener la pérdida total de toda la red de baja tensión. Sin embargo, la pérdida total está compuesta por la sumatoria de la pérdida técnica y la pérdida no técnica.

Así también, si no se contara con la energía consumida se puede realizar un balance energético determinando una relación entre el factor de carga y factor de pérdida. Y también, podremos obtener la pérdida total.

**Demanda**, es la cantidad de potencia que un consumidor utiliza en cualquier momento (variable en el tiempo). La demanda puede ser expresada en las unidades de kW, kVA, etc.

Aunque los intervalos de demanda dependen del tipo de carga entre otros factores, para el caso de la facturación de energía eléctrica es común utilizar un intervalo de 15 minutos.

**Demanda Máxima**, corresponde a la mayor demanda que

se presenta en el sistema en un periodo de trabajo previamente establecido.

En demanda máxima es donde se presenta la máxima caída de tensión en el sistema y las mayores pérdidas de potencia kW, KVAR y energía kWh.

**Demanda Promedio**, Se define como la relación entre el consumo de energía del usuario durante un intervalo dado y el intervalo mismo.

$$D_{prom} = \frac{\text{Energía consumida en tiempo (T) en KWh}}{T \text{ en h}} \quad (2)$$

**Factor de Carga.**

Se lo obtiene de la relación entre la demanda promedio en un intervalo de tiempo establecido y la demanda máxima en el mismo intervalo de tiempo.

$$F_c = \frac{D_{prom}}{D_{max}} = \frac{\text{Energía consumida en el intervalo de tiempo t}}{D_{max} * t} \quad (3)$$

El valor del factor de carga se encuentra dentro del intervalo:  $0 < F_c < 1$ , siendo 1 el valor óptimo del factor de carga indicando que el valor de demanda máxima es sostenido a lo largo de todo el intervalo de tiempo, por lo cual al tener un valor alto se indica que el perfil de carga es muy constante sin mayores variaciones implicando que las pérdidas en cualquier instante tengan un valor muy cercano a las pérdidas en instante de la demanda máxima. Al contrario, cuando el valor del factor de carga es bajo, se tiene un perfil de carga con picos y valles pronunciados que implican una gran variación en la demanda y por tanto en las pérdidas. Es de esperar que un circuito de distribución con clientes residenciales cuyo perfil de carga tiene muchas variaciones tenga un bajo factor de carga, caso contrario en un circuito con usuarios del tipo industrial que tiene un alto factor de carga.

**Factor de Pérdidas.**

El factor de pérdidas "F<sub>per</sub>" se define a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{per} = \frac{\sum_{i=1}^n D^2 * t}{T * D_{max}^2} \quad (4)$$

El factor de pérdidas permite determinar el porcentaje de tiempo necesario para que la demanda máxima obtenga las mismas pérdidas que la demanda real para un intervalo de tiempo específico.

El factor de pérdidas se puede definir también como la relación entre las pérdidas promedio y las pérdidas máximas de la siguiente forma:

$$F_{per} = \frac{P_{prom}}{P_{max}} \quad (5)$$

**Relación del Factor de Pérdidas y el Factor de Carga.**

El factor de pérdidas puede determinarse a partir del factor de carga utilizando la expresión desarrollada por Buller y Woodrow, dicha expresión se muestra a continuación:

$$F_{per} = C * F_c + (1 - C) * F_c^2 \quad (6)$$

Donde C es un coeficiente variable que depende de aproximaciones estadísticas y de las características del sistema, en general su valor siempre es  $C \leq 1$ .

La expresión más comúnmente empleado para el cálculo del factor de pérdida:

$$F_{per} = 0.3F_c + 0.7F_c^2 \quad (7)$$

La ecuación (7) da un resultado razonablemente ajustado. El valor del factor de pérdidas está definido entre el siguiente intervalo:

$$F_C^2 < F_{per} < F_C$$

Así también, para determinar la pérdida total en base esta relación es el producto del factor de pérdida y la energía suministrada. Los datos de pérdidas de energía eléctrica son de carácter estimatorio, ya que estas son dinámicas pueden ven cambios drásticos.

Inspecciones de usuarios.

Se procederá a la revisión de los usuarios ligados al centro de transformación seleccionado, siempre y cuando los valores de pérdidas de energía superen el 11.18% hasta el 2019 el cual norma la autoridad energía eléctrica y tecnología nuclear.

Sin embargo, si se encontrara alguna anomalía en el proceso de inspección que aporten en a las pérdidas de energía eléctrica. Se procederá en función de la Ley de electricidad, Ley Nro 1604 del 21 de diciembre de 1994, art. 56, 57 del título IV infracciones y sancione.

**CONCLUSIONES.**

- Las pérdidas de energía eléctrica en distribuidora se deben a dos causas, la primera a las condiciones técnicas que presentan los equipos y líneas de distribución en baja tensión, y la segunda se debe al hurto de energía cometido por parte de la ciudadanía.
- En el presente artículo se determinó dos formas de realizar balances energéticos las cuales son la ecuación (1) y (7). Las mismas, son ecuaciones que nos proporcionan resultados estimados.
- En el centro de transformación que se desee realizar el control de pérdidas de energía, se debe instalar una medición semidirecta con un medidor que cumpla la característica de almacenamiento de memoria de masa integrada en 15 minutos.

**BIBLIOGRAFIA**

Cerruto, J. (2011). Instrumentos de Medición y verificación. Andalucía: Temas para la educación.

OLADA, O. (1990). Manual Latinoamericano y del Caribe para el Control de Perdidas Eléctricas. Bogota.

Pinedo Lopez, F. (2018). Método de balance de energía por subestaciones y su influencia en la identificación y control de las pérdidas no técnicas en las redes de baja tensión en Electro Oriente S.A. Juanjui, 2018. Peru.

Ramirez Castaño, S. (2004). Redes de Distribución de Energia. Bogota: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Sobrevila, M. A., & Farina, A. L. (2009). Instalaciones Electricas. Argentina: ALSINA.

(\*), Licenciado en Electricidad Industrial, Docente carrera de Electricidad Industrial Facultad de Tecnología – UMSA

**PLAN DE ESTUDIOS**

**1° SEMESTRE**

- Álgebra
- Cálculo I
- Física I
- Laboratorio de física I
- Circuitos eléctricos I y laboratorio
- Seguridad industrial y salud ocupacional

**2° SEMESTRE**

- Cálculo II
- Física II
- Laboratorio de física II
- Electromagnetismo
- Circuitos eléctricos II y laboratorio
- Informática I

**3° SEMESTRE**

- Matemática aplicada
- Laboratorio de electromagnetismo
- Instalaciones eléctricas
- Taller electromecánico
- Electrónica aplicada y laboratorio
- Informática industrial

**4° SEMESTRE**

- Transformadores y laboratorio
- Maquinas eléctricas I y laboratorio
- Taller de instalaciones eléctricas
- Laboratorio de sistemas microprocesados
- Laboratorio de medidas eléctricas e instrumentación

**MATERIA COMPLEMENTARIAS**

- Ingles I
- Ingles II
- Legislación laboral

**FACULTAD DE TECNOLOGÍA**

**ELECTRICIDAD INDUSTRIAL - UMSA**

**UMSA**  
*la mejor*

**CURSO PREFACULTATIVO**  
**SEMESTRE II - 2023**

**INSCRIPCIONES ABIERTAS**  
**DEL 18 DE JUNIO AL 11 DE AGOSTO DEL 2023**

**INVERSION DE BS. 600**

**PRUEBA DE SUFICIENCIA ACADÉMICA - PSA**

**EN LAS SIGUIENTES ÁREAS:**

- MATEMÁTICA : 10/07/2023
- FÍSICA : 12/07/2023
- ELECTROTECNIA: 14/07/2023

**INSCRIPCIONES: 7 DE JUNIO AL 7 DE JULIO DEL 2023**

**INVERSION DE BS. 150**

Av. Arce N°2299, 5to. Piso EDIFICIO FACULTAD DE TECNOLOGÍA, BLOQUE A

Facebook electricidad industrial UMSA telf. 2443538

**70669112 - 60658245**

# ¡POTENCIA, ENERGIA Y CALIDAD ADELANTE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL!



## ÁREA ENERGIA

ENERGÍAS ALTERNATIVAS RENOVABLES Y CONVENCIONALES. MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS Y NO ROTATIVAS. APROVECHAMIENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS.

## ÁREA REDES

REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA. INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES, COMERCIALES Y DOMICILIARIAS. MANTENIMIENTO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN E INSTALACIONES ELÉCTRICAS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN.



## ÁREA CONTROL

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL. INTELIGENCIA ARTIFICIAL. APLICACIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. APLICACIONES DE LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.



