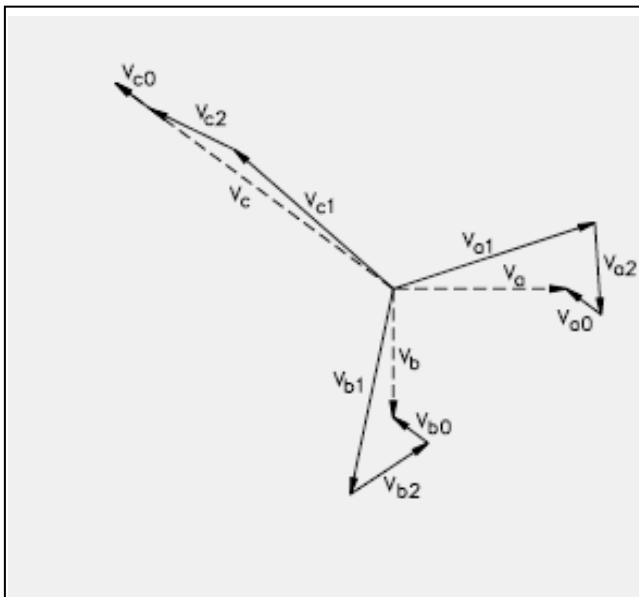


# Análisis de las Definiciones de Desequilibrio de Tensión y su Influencia con los Efectos en la Operación de Motores Trifásicos de Inducción: La necesidad de una Nueva Definición

Enrique C. Quispe O.  
U. Autónoma de Occidente  
Km 2 Vía Jamundí  
Cali, Colombia  
ecquispe@uao.edu.co

Jairo A. Palacios P.  
Universidad del Valle  
Calle 13 No. 100-00  
Cali, Colombia  
japalac@univalle.edu.co



**Resumen**— En este artículo se presenta una comparación y un análisis de cuatro definiciones sobre el desequilibrio de tensiones dadas por las Normas NEMA, IEEE e IEC y otra propuesta recientemente por Oliveira-Wang. Se muestra que estas definiciones resultan incompletas para relacionar el desbalance de tensiones con los efectos en la operación de los motores de inducción. Finalmente se concluye que es necesaria una nueva caracterización del desbalance de tensiones en su relación con la operación del motor de inducción y se propone que esta caracterización debe incluir la componente de secuencia positiva, la componente de secuencia negativa, el desbalance angular y el voltaje promedio en terminales sobre el motor.

**Palabras claves**— Definición de desbalance, factor de desbalance, tensión desbalanceada, IEC, NEMA, IEEE, derating factor, calidad de potencia, motor trifásico de inducción.

## I. INTRODUCCION

LOS motores trifásicos de inducción tipo jaula de Lardilla son los motores de mayor uso industrial debido a su robustez, bajo costo relativo de compra y bajo costo de mantenimiento. Estos motores son diseñados y fabricados para operar en condiciones nominales especificadas en la placa de características y deben ser alimentados con un sistema trifásico de tensiones de forma sinusoidal, voltajes de fase de la misma magnitud y desfasados  $120^\circ$  entre sí. Sin embargo, la experiencia muestra que en los sistemas eléctricos industriales, la tensión en los terminales del motor puede ser mayor que la tensión nominal en sistemas poco cargados mientras la tensión puede ser menor a la nominal cuando el sistema eléctrico está muy cargado. Adicionalmente a los problemas de sobretensión ó baja-tensión se encuentra que la tensión trifásica de alimentación nunca está perfectamente balanceada. Basado en un reporte de ANSI Jouanne [1] muestra que en USA el 66% del sistema eléctrico presenta un desbalance de tensión menor a 1%, que en el 98% del sistema de distribución el desbalance es menor al 3% y que el 2% del sistema de distribución tiene un desbalance de tensión mayor al 3%. La principal causa que origina el desbalance de tensión es la distribución desequilibrada de cargas monofásicas; asimismo el desequilibrio de voltajes puede ser causado por las impedancias asimétricas de los bobinados de los transformadores, bancos de transformadores conectados en conexión estrella abierta y triangulo abierto, impedancias de transmisión asimétricas ocasionadas por transposición incompleta de las líneas de transmisión y la voladura de fusibles de bancos trifásicos de condensadores, Kersting [2].

Cuando un motor trifásico de inducción es alimentado por un sistema trifásico desequilibrado de tensiones, muchas de sus características son afectadas, tales como: eficiencia, factor de potencia, pérdidas, elevación de temperatura, potencia nominal de salida y par, Lee [3]. Debido a que el motor trifásico de inducción de jaula de ardilla es el de mayor uso en los sistemas industriales

y comerciales, los efectos perjudiciales que el desbalance de tensiones ocasiona sobre el motor de inducción, causara a su vez un enorme impacto sobre la productividad de la empresa usuaria, Quispe [4], [5].

Es evidente que la definición de desbalance de tensión es de gran importancia cuando se estudian los efectos del desbalance de tensión sobre la operación del motor trifásico de inducción debido a que es una variable en los modelos matemáticos del motor y se usa como referencia cuando las normas dan recomendaciones practicas industriales. Sin embargo actualmente no existe un consenso internacional en la comunidad académica sobre la definición para el desbalance de tensiones. Las definiciones actualmente usadas dadas en las normas NEMA [6], IEEE [7], IEC [8], han sido analizadas y se observa que resultan incompletas en su relación con los efectos en la operación de los motores de inducción. Asimismo recientemente algunos autores han propuesto otra que circula en los medios académicos, Oliveira [9], Wang [10].

Este artículo presenta un análisis de las cuatro definiciones sobre el desbalance de tensiones y presenta algunas sugerencias para mejorar la caracterización del desequilibrio de tensiones. La propuesta fundamentalmente se centra en afirmar que una definición del desequilibrio de tensiones debe de incluir la componente de secuencia positiva, la componente de secuencia negativa, el desbalance angular y el voltaje promedio en los terminales del motor.

## II. DEFINICIONES PARA EL DESEQUILIBRIO DE FUNCIONES

Se dice que un sistema trifásico de tensiones esta desbalanceado si se cumple una o ambas de las siguientes condiciones: las magnitudes de las tensiones de fase o de línea son diferentes y/o los ángulos de los fasores de estas tensiones son diferentes de las condiciones balanceadas. Existen tres definiciones para el desequilibrio de voltajes provenientes de tres comunidades académicas diferentes, NEMA [6], IEEE [7], IEC [8]. Asimismo recientemente algunos autores han propuesto otra definición para el índice de desbalance de tensión, esta definición que circula fundamentalmente en los medios académicos, Oliveira [9] y Wang [10]. Estas definiciones tienen gran importancia cuando se estudian los efectos del desbalance de tensión sobre la operación del motor trifásico de inducción.

A continuación revisaremos las tres definiciones normalizadas y la propuesta por Oliveira-Wang.

### A. Definición NEMA

La Norma NEMA (*National Equipment Manufacturer's Association*) define el desbalance de tensión mediante un índice conocido como "Line Voltage Unbalance Rate (LVUR)" [6], que es la máxima desviación del voltaje de

línea con respecto al valor de línea promedio, dividido entre el voltaje de línea promedio y esta dado por

$$LVUR = \frac{\text{Desviación máxima del promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}}{\text{Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}} \quad (1)$$

Donde:

$$\text{Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad y$$

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  son las tensiones de línea del sistema eléctrico que alimenta a el motor.

Generalmente el desbalance de tensiones se da en porcentaje (%), por lo tanto

$$\%LVUR = LVUR \times 100$$

La Definición NEMA asume que la tensión promedio es igual a la tensión nominal y además solo trabaja con magnitudes pues los ángulos de la tensión no son incluidos en la ecuación.

### B. Definición IEEE.

La definición de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [7], es también conocida como "Phase Voltage Unbalance Rate (PVUR)", esta dada por

$$PVUR = \frac{\text{Desviación maxima del promedio de } \{V_a, V_b, V_c\}}{\text{Promedio de } \{V_a, V_b, V_c\}} \quad (2)$$

Donde:

$V_a, V_b, V_c$  son las tensiones fase-neutro del sistema que alimenta el motor.

La Definición de la IEEE usa el mismo concepto de desbalance de tensión que la definición NEMA, la única diferencia es que la IEEE usa la tensión fase-neutro en lugar de la tensión línea-línea. En esta definición también se pierde la información del ángulo de la tensión pues solo se consideran las magnitudes de la tensión.

### C. Definición IEC ó Definición de Componentes Simétricas

La Definición de desbalance de tensión dada por la IEC [8] ó definición de componentes simétricas, es también conocida como "Voltage Unbalance Factor (VUF)", es dada por

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

Donde  $V_2$  es la amplitud de la componente de tensión de secuencia negativa  $\bar{V}_2$  y  $V_1$  es la amplitud de la componente de tensión de secuencia positiva  $\bar{V}_1$ .

Para un conjunto desbalanceado de tensiones de línea  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ , la componente de tensión de secuencia positiva  $V_1$  y la componente de tensión de secuencia negativa  $V_2$  están dados por los siguientes fasores:

$$\bar{V}_1 = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3} \quad (4)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3} \quad (5)$$

Donde  $a = -0.5 + j0.866$  y  $a^2 = -0.5 - j0.866$

Generalmente el desbalance de tensiones se da en porcentaje (%), por lo tanto es más común encontrar

$$\%VUF = VUF \times 100$$

#### D. Definición del Factor Complejo de Desbalance de Tensión ó Índice Oliveira-Wang.

La definición de desbalance de tensión propuesta por Oliveira [9] y Wang [10], conocida como "Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF)", es dada por

$$CVUF = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \quad (6)$$

Esta definición es fundamentalmente la misma que la definición del VUF dada por la IEC, la única diferencia es que se incluye los fasores de frecuencia con ángulos y amplitud, por lo tanto:

$$CVUF = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{V_2 \angle \theta_2}{V_1 \angle \theta_1} = \frac{V_2}{V_1} \angle \theta$$

### III. ANÁLISIS DE LAS DEFINICIONES ACTUALES SOBRE EL DESEQUILIBRIO DE TENSIONES

Un sistema trifásico de tensiones puede presentar infinitos casos de desequilibrio de voltaje, precisamente la función que tiene el índice de desbalance de tensión es caracterizar el desequilibrio para luego convertirse en una variable que afecte el comportamiento del motor. A continuación se aplicaran los diversos índices de desbalance y se compararan entre sí.

#### A. Una misma situación de desequilibrio de tensiones presenta diferentes índice de desbalance.

Consideremos las siguientes tensiones línea-neutro:

$$V_a = 110 \angle 0^\circ \quad V_b = 112.7 \angle 240^\circ \quad V_c = 125 \angle 120^\circ$$

Las tensiones línea-línea se calculan a partir de estos valores de fase y son:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 110 \angle 0^\circ - 112.7 \angle 240^\circ = 192.9 \angle 30.4^\circ$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = 112.7 \angle 240^\circ - 125 \angle 120^\circ = 205.9 \angle -88.3^\circ$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = 125 \angle 120^\circ - 110 \angle 0^\circ = 203.7 \angle 147.9^\circ$$

En este caso la tensión nominal ó de placa del motor es de 220 voltios. Aplicaremos a este sistema desequilibrado las cuatro definiciones mencionadas.

**1) Usando la Definición NEMA:** Para calcular el factor LVUR, primero se calcula la tensión de línea promedio:

$$V_{prom} = (192.9 + 205.9 + 203.7) / 3 = 200.8$$

Se puede observar que en este caso el voltaje promedio es menor al voltaje nominal del motor, por lo tanto en este caso no se cumple el supuesto de la norma NEMA.

Luego se calcula la magnitud de las desviaciones de los voltajes de línea respecto al voltaje promedio, estos son

$$192.9 - 200.8 = 7.9$$

$$205.9 - 200.8 = 5.1$$

$$203.7 - 200.8 = 2.9$$

La desviación máxima del voltaje de línea respecto al voltaje promedio es 7.9 voltios. Usando la ecuación (1), se obtiene:

$$LVUR = \frac{7.9}{200.8} = 0.0396$$

$$\%LVUR = 0.0396 \times 100 = 3.96\%$$

**2) Usando la Definición IEEE:** Para calcular el factor PVUR, primero se calcula la tensión de fase promedio:

$$V_{prom} = (110 + 112.7 + 125) / 3 = 115.9$$

Luego se calcula la magnitud de las desviaciones de los voltajes de fase respecto al voltaje de fase promedio, estos son

$$110 - 115.9 = 5.9$$

$$112.7 - 115.9 = 3.2$$

$$125 - 115.9 = 9.1$$

De los resultados se observa que la desviación máxima del voltaje de fase respecto al voltaje promedio es 9.1 voltios. Luego aplicando la ecuación (2) se obtiene:

$$PVUR = \frac{9.1}{115.9} = 0.0785$$

$$\%PVUR = 0.0785 \times 100 = 7.85\%$$

Se observa que a pesar de estar analizando el mismo fenómeno la definición IEEE da un resultado muy diferente al de la definición NEMA.

**3) Usando la Definición IEC:** Para calcular el factor VUF, en primer lugar se debe calcular el fasor de tensión de secuencia positiva  $\bar{V}_1$  y el fasor de tensión de secuencia negativa  $\bar{V}_2$ .

Aplicando las ecuaciones (4) y (5) obtenemos:

$$\bar{V}_1 = 200.75 \angle 30^\circ$$

$$\bar{V}_2 = 7.98 \angle 200.3^\circ$$

Para calcular el VUF, tomamos la amplitud de la componente de tensión de secuencia negativa  $\bar{V}_2$  y la amplitud de la componente de tensión de secuencia positiva  $\bar{V}_1$  y aplicamos la ecuación (3) obtenemos:

$$VUF = \frac{7.98}{200.75} = 0.04$$

$$\%VUF = 0.04 \times 100 = 4\%$$

Se observa que el factor de desbalance dado por la IEC es similar al dado por la NEMA.

**4) Usando el Factor Complejo de Desbalance de Tensión:** Para calcular el factor CVUF, se debe calcular el fasor de tensión de secuencia positiva  $\bar{V}_1$  y el fasor de tensión de secuencia negativa  $\bar{V}_2$ .

Aplicando las ecuaciones (4) y (5) se obtiene:

$$\bar{V}_1 = 200.75 \angle 30^\circ$$

$$\bar{V}_2 = 7.98 \angle 200.3^\circ$$

Es decir el proceso es similar al cálculo del VUF dada por la IEC, la única diferencia es que se incluye los ángulos de fasores de frecuencia, por lo tanto aplicando la ecuación (6) obtenemos:

$$CVUF = \frac{7.98 \angle 200.3^\circ}{200.75 \angle 30^\circ} = 0.04 \angle 170.3^\circ$$

y

$$\%CVUF = 0.04 \angle 170.3^\circ \times 100 = 4\% \angle 170.3^\circ$$

La tabla 1, muestra la comparación del cálculo de los diferentes índices de desbalance para una misma situación de desequilibrio de tensión.

Indice	LVUR	PVUR	VUF	CVUF
Magnitud	3.96%	7.85%	4%	4% $\angle 170.3^\circ$

Tabla 1. Comparación de índices de desbalance para un mismo desequilibrio de tensiones.

Se observa que la definición IEEE el índice PVUR presenta una diferencia muy grande respecto a los otros índices. También se observa que los índices NEMA e IEC dan valores aproximados pero no dan información sobre el desbalance del ángulo.

### **B. Usando de la Definición NEMA, diferentes situaciones de Desequilibrio de Tensión pueden dar la el mismo índice de desbalance.**

Existen al menos ocho casos de desequilibrio de voltaje, Lee [3]. A continuación mencionaremos seis casos, considerando que el voltaje nominal del motor es de 220 voltios. Aplicaremos la definición NEMA para calcular el índice de desequilibrio de voltaje a los seis casos de desbalance de voltaje.

#### **1) Desbalance Trifásico por debajo del Voltaje Nominal:**

En este caso los tres voltajes de línea son menores al voltaje nominal. Es decir los voltajes de línea serán: 192.9, 205.9, 203.7

$$LVUR = \frac{7.9}{200.8} = 0.0396$$

$$\%LVUR = 0.0396 \times 100 = 3.96\%$$

Se observa que el voltaje promedio 200.8 voltios esta por debajo de la tensión nominal 220 voltios.

#### **2) Desbalance Bifásico por debajo del Voltaje Nominal:**

En este caso dos de los voltajes de línea son menores al voltaje nominal. Los voltajes de línea serán: 220, 209.5, 205.0

$$LVUR = \frac{8.5}{211.5} = 0.0399$$

$$\%LVUR = 0.0399 \times 100 = 3.99\%$$

Se observa que el voltaje promedio 211.5 voltios esta por debajo de la tensión nominal 220 voltios.

#### **3) Desbalance monofásico por debajo del Voltaje Nominal:**

En este caso uno de los voltajes de línea es menor al voltaje nominal. Los voltajes de línea serán: 220, 220, 207

$$LVUR = \frac{8.67}{215.7} = 0.0399$$

$$\%LVUR = 0.0399 \times 100 = 3.99\%$$

Se observa que el voltaje promedio 215.7 voltios esta por debajo de la tensión nominal 220 voltios.

**4) Desbalance Trifásico por encima del Voltaje Nominal:** En este caso los tres voltajes de línea son mayores al voltaje nominal. Los voltajes de línea serán: 241.5, 230, 225.

$$LVUR = \frac{9.33}{232.16} = 0.0399$$

$$\%LVUR = 0.0399 \times 100 = 3.99\%$$

Se observa que el voltaje promedio 232.6 voltios esta por encima de la tensión nominal 220 voltios.

**5) Desbalance Bifásico por encima del Voltaje Nominal:** En este caso dos de los tres voltajes de línea son mayores al voltaje nominal. Es decir los voltajes de línea serán: 238, 230, 220.

$$LVUR = \frac{9.33}{229.33} = 0.0399$$

$$\%LVUR = 0.0399 \times 100 = 3.99\%$$

Se observa que el voltaje promedio 229.33 voltios esta por encima de la tensión nominal 220 voltios

**6) Desbalance Monofásico por encima del Voltaje Nominal:** En este caso uno de los tres voltajes de línea son mayores al voltaje nominal. Es decir los voltajes de línea serán: 233.5, 220, 220.

$$LVUR = \frac{9.0}{224.5} = 0.0399$$

$$\%LVUR = 0.0399 \times 100 = 3.99\%$$

Se observa que el voltaje promedio 224.5 voltios esta por encima de la tensión nominal 220 voltios

La Tabla 2 muestra una comparación de los 6 casos mencionados dados y se observa que todos corresponden a diferentes situaciones de desbalance de voltaje, sin embargo todos dan el mismo factor LVUR. Esto indica que el factor LVUR dado por NEMA no caracteriza adecuadamente el desequilibrio de tensión.

Caso	$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$	LVUR
1	192.9, 205.9, 203.7	3.96%
2	220, 209.5, 205	3.99%
3	220, 220, 207	3.99%
4	241.5, 230, 225	3.99%
5	238, 230, 220	3.99%
6	233.5, 220, 220	3.99 %

Tabla 2. Comparación del índices de desbalance NEMA para seis casos diferentes de desequilibrio de tensiones.

Por otro lado ensayos experimentales realizados por parte, Kersting y Phillips [11] demuestran numéricamente que las pérdidas de los motores dependen del tipo de desbalance y ponen en evidencia las insuficiencias del factor LVUR. Con ese propósito,

calculan que en un motor de 25 hp, 240 V, se produce una diferencia sustancial en el incremento de las pérdidas totales del motor para un LVUR de 5 %, según sea el caso de desbalance. Así, si se mantiene el promedio de las magnitudes del voltaje de línea constante a 240 V, dejando invariable la magnitud de  $V_{bc}$  e incrementando la magnitud de  $V_{ab}$  en la misma proporción en que se reduce  $V_{ca}$ , las pérdidas totales aumentan al 115 %. Por otro lado, con el promedio también constante a 240 V, e incrementando las magnitudes de  $V_{ab}$  y  $V_{ca}$  mientras que  $V_{bc}$  se reduce, las pérdidas sólo aumentan al 105 %. Como puede observarse, hay un 10 % de diferencia con el mismo LVUR.

El análisis realizado nos indica que el factor LVUR ó índice de desequilibrio dado por NEMA, no es adecuado para definir el desbalance de voltaje aplicado al motor.

#### IV. ALGUNAS PROPUESTAS PARA UN NUEVO FACTOR QUE CARACTERICE EL DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN

Las características electromecánicas más importantes del motor de inducción son el par electromagnético, la potencia de salida, la eficiencia y el factor de potencia. En un trabajo reciente [12], se desarrollaron ecuaciones estadísticas para evaluar el efecto del desequilibrio de tensiones sobre la eficiencia y el factor de potencia. Los resultados fueron que se lograba una buena correlación solo si se incluía en las ecuaciones a la vez la tensión de secuencia positiva y la tensión de secuencia negativa.

Por otro lado considerando que el motor de inducción es diseñado para operar a la tensión nominal, es importante considerar el voltaje nominal del motor, pues al compararlo con la componente de secuencia positiva nos dice que tan lejos estamos del voltaje nominal.

Por lo tanto proponemos que un factor que caracterice el desequilibrio de tensiones debe de tener en cuenta los siguientes elementos:

- la componente de secuencia positiva, que esta relacionada con la eficiencia y nos da una estimación del flujo magnético con que esta trabajando el motor.
- el voltaje nominal del motor, que nos da una idea del flujo magnético nominal del motor.
- la componente de secuencia negativa, que esta relacionada con las pérdidas en el rotor y el factor de potencia.
- el desbalance angular que esta relacionado con la magnitud de la secuencia positiva.

#### V. CONCLUSIONES

En este artículo se revisaron cuatro definiciones

usadas actualmente para especificar el desequilibrio de tensiones y se compararon en su relación la operación del motor de inducción.

La definición dada por la IEEE Std.141 –PVUR– da resultados significativamente diferentes, ver tabla 1., para el desbalance de tensiones que los índices propuestos por NEMA (LVUR), la IEC(PVUR) y el Factor Complejo de desbalance de voltaje (CVUF), por lo tanto el uso del factor PVUR no debe ser considerada para ser aplicada a motores de inducción.

La definición dada por NEMA, asume que la tensión promedio que llega a los terminales del motor de inducción es siempre igual a la tensión nominal del motor. Por lo tanto esta definición no es recomendable en casos cuando el voltaje promedio esta por encima o por debajo del valor de la tensión nominal del motor. Otro debilidad de esta definición es que no considera el desequilibrio angular. Aunque es una definición practica presenta dificultades al ser aplicada a motores de inducción.

Es necesario tener una nueva definición para el desequilibrio de voltaje que permita precisar con mayor la operación del motor. Esta nueva definición debe de considerar: la componente de tensión de secuencia positiva, la componente de tensión de secuencia negativa, la tensión de placa y el desequilibrio angular.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los Doctores Luis F. Mantilla y Percy Viego por las sugerencias y colaboraciones dadas en el desarrollo de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of Voltage Unbalance," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, October 2001.
- [2] W.H. Kersting, "Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol.37, no.1, pp. 165-170, January/February 2001.
- [3] Ch. Y. Lee, "Effects of Unbalance Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor" *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 202–208, June. 1999.
- [4] E. C. Quispe, "Una Visión Integral para el Uso Racional de la Energía en la Aplicación de los Motores Eléctricos de Inducción," *Revista El Hombre y la Maquina*, Año XV, no. 20-21, p.52-59, Jul/Dic 2003, Colombia.
- [5] E. Quispe, O. Prias y P. Viego, "Technological Management of Efficient Use of Electric Motors: An Important Tool in Competitiveness," 4th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems EEMODS, Heidelberg, Germany, Conference Proceedings Volume I, September 2005, p.240-245
- [6] *NEMA, Motors and Generators*, NEMA Standar MG1-1993. Publishing by NEMA, 1993.
- [7] *IEEE, Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, IEEE Standard 141-1993.
- [8] *IEC, Effects on Unbalanced Voltages on the Performance of Induction Motors*, IEC 60034-26, Publishing by IEC, 2002.
- [9] S. E. M. de Oliveira, "Operation of Three-Phase Induction Motors connected to One-Phase Supply," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 5, no. 4, pp. 713-718, December 1990.

- [10] Y. J. Wang, "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of The Complex Voltage Unbalance Factor," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 37, no. 1, pp. 270-275, September 2001.
- [11] W.H. Kersting and W. H. Philips "Phase Frame Analysis of the Effects of Voltage Unbalance on Induction Machines," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol.33, no.2, pp. 415-420, March/April 1997.
- [12] E. Quispe, P. Viego and J. Cogollos "Statistical Equations to Evaluate the Effects of Voltage Unbalance on the Efficiency and Power factor of a Three-Phase Induction Motors," *WSEAS Transactions on Circuit and Systems*, Issue 4, Vol.4, April 2005, pp. 234-239.

#### BIOGRAFIA

\* Enrique C. Quispe O. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Ingeniería, Peru 1989. M.Sc. en Sist. de Generacion de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle. 1994. Actualmente cursa estudios de Ph. D. en Ingeniería Eléctrica en la Universidad del Valle (Colombia) y es Director del Grupo de Investigación en Energías GIEN de Universidad Autónoma de Occidente y Profesor Asociado del Departamento de Energética y Mecánica. Dirección de Correspondencia: Calle 25 No.115-85/ Km.2 vía a Jamundí. Cali. Colombia. Numero Telefono:0572-3188000  
e-mail: [ecquispe@uao.edu.co](mailto:ecquispe@uao.edu.co)

Jairo A. Palacios, Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, Colombia 1982, Especialista en Auditorias Energéticas por Universidad Politécnica de Madrid, España en 1994, Especialista en Energía Eólica por la Universidad Carlos III de Madrid, España en 1995 y el de Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid, España en 1998. Desde el 2000 es el Director del Grupo de Investigación en Conversión de la Energía "CONVERGIA". Asimismo desde 1998 es Profesor Titular de esta universidad. Dirección de correspondencia: Calle 13 No. 100-00  
e-mail: [japalac@univalle.edu.co](mailto:japalac@univalle.edu.co)

ISBN 978-958-670-553-0