

# Efecto del desbalance en las cargas sobre la valoración de confiabilidad de un sistema de distribución de energía eléctrica

Recibido 25 de septiembre de 2006, aprobado 19 de abril de 2007.

## Oscar Gómez Carmona

Ingeniero Electricista, M.Sc. en Ingeniería Eléctrica. Profesor auxiliar, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

jr@utp.edu.co.

## Carlos J. Zapata

Ingeniero Electricista, M.Sc. en Ingeniería Eléctrica. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

cjzapata@utp.edu.co.

**RESUMEN** Muchos circuitos primarios de distribución trifásicos son desbalanceados porque, primero, atienden a sus usuarios por medio de transformadores de distribución monofásicos; segundo, utilizan componentes de operación monopolar; y, tercero, la mayoría de las fallas que afectan sus componentes son monofásicas. Este importante hecho debe incluirse en los estudios de confiabilidad pues, como se muestra en este artículo, cuando

se asume lo contrario se obtienen valoraciones pesimistas de los índices de confiabilidad, lo que puede llevar a decisiones de inversión erróneas.

### PALABRAS CLAVE

Confiabilidad de sistemas de potencia, sistemas de distribución de energía eléctrica, simulación de Montecarlo.

---

## Effect of the Load Unbalance on the Reliability Assessment of a Power Distribution System

**ABSTRACT** Many three-phase distribution feeders are unbalanced because, first, they serve their customers by means of single-phase distribution transformers; second, they use components which operate in single-phase manner; third, most of the failures that affect their components are single-phase. This important fact must be included in reliability studies because, as shown in this paper, when the contrary is assumed pessimistic

assessments of the reliability indices are obtained which could lead to erroneous investment decisions.

### KEYWORDS

Power system reliability, power distribution systems, Montecarlo simulation.

**INTRODUCCIÓN**

La confiabilidad de los sistemas de distribución de energía eléctrica es actualmente un área de intensa investigación en todo el mundo, debido a que: 1. La sociedad es muy sensible a las interrupciones del servicio de suministro de energía eléctrica, dada la alta dependencia que se tiene de éste insumo en todas las actividades de la vida diaria. 2. Por lo menos el 90% del total de eventos de salida del sistema eléctrico de potencia ocurren en el sistema de distribución. 3. En muchos países la regulación fija límites para los indicadores de confiabilidad del servicio; si el operador del sistema de distribución incumple estos límites, recibe penalizaciones como la obligación de compensar económicamente a los usuarios. Debido a esto, la calidad de los estudios de confiabilidad juega un papel muy importante en los procesos de decisión que deben realizar las empresas distribuidoras de electricidad.

Los estudios de confiabilidad valoran los índices de confiabilidad de los puntos de carga de los circuitos primarios, los cuales se agregan para hallar los correspondientes índices a nivel de circuito primario, subestación y sistema de distribución; como punto de carga generalmente se considera el lado secundario de los transformadores de distribución. Sin importar la técnica de análisis, el modelamiento tradicionalmente utilizado en los estudios de confiabilidad de los sistemas de distribución asume arbitrariamente que éstos son balanceados o simétricos, por lo cual, su análisis se hace mediante equivalentes monofásicos. Este tipo de modelamiento implica que: la demanda en cada una de las fases es igual, todos los componentes son

simétricos, todos los componentes operan en forma trifásica, todas las fallas que afectan los componentes son trifásicas y cada vez que ocurre una falla se interrumpe el servicio a todos los usuarios ubicados aguas abajo del punto de falla; nada de lo cual corresponde a la realidad de la mayoría de sistemas de distribución existentes. Así, es muy importante el conocer las consecuencias de aplicar este tipo de análisis a un sistema que es desbalanceado.

**¿POR QUÉ EXISTE DESBALANCE EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN?**

**DESBALANCE EN LAS CARGAS**

Aunque los circuitos primarios de distribución sean trifásicos, es muy común el atender los usuarios mediante transformadores de distribución y redes secundarias que en su mayoría son monofásicos. Esto se debe a que es más barato construir circuitos primarios con un tramo principal trifásico y derivaciones de una o dos fases hacia sectores de menor carga y el utilizar transformadores de distribución y redes secundarias monofásicas, que construir un sistema completamente trifásico. Por ejemplo, en la ciudad de Pereira, el sistema de distribución cuenta con 28 circuitos primarios trifásicos y, tal como se muestra en la Tabla 1, la mayoría de los transformadores de distribución son monofásicos.

**USO DE COMPONENTES MONOFÁSICOS**

En los sistemas de distribución se utilizan extensivamente componentes cuya construcción y operación es monofásica: cortacircuitos, fusibles, transformadores de instrumentación y pararrayos. Así al abrir por

Voltaje nominal kV	Conexión en media tensión		Total	%
	Fase-Fase	Trifásica		
13.2	2150	2133	4283	99.10
33	5	34	39	0.90
Total	2155	2167	4322	100.00

Tabla 1. Población de transformadores de distribución en la ciudad de Pereira [1].

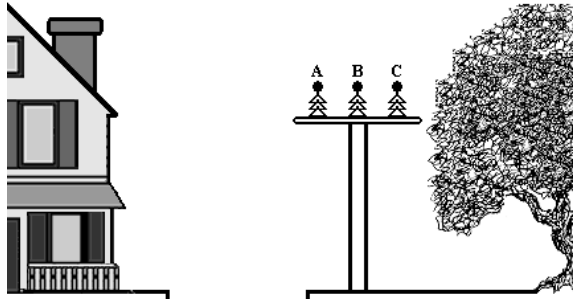


Figura 1. Circuito primario trifásico aéreo.

maniobra, en los equipos donde esto aplica, o ante una falla, el sistema queda desbalanceado. Otros equipos como seccionadores e interruptores de potencia, aunque sean construidos para operación tripolar pueden presentar fallas monofásicas.

#### ASIMETRÍA EN LOS COMPONENTES

Dependiendo de la configuración constructiva de los componentes del sistema de distribución, las fases pueden tener diferentes probabilidades de sufrir fallas, lo cual debe incluirse en la valoración de confiabilidad. Para ilustrar este aspecto, obsérvese el circuito primario trifásico aéreo en la Figura 1: las fallas bifásicas AB y BC tienen más probabilidad de ocurrir que la falla AC. Si se considera una falla monofásica, las fases A y C tienen mayor probabilidad de fallar que la fase B.

#### LA MAYORÍA DE LAS FALLAS QUE OCURREN SON MONOFÁSICAS

Las estadísticas operativas de los sistemas de potencia muestran que las fallas que menos ocurren son las trifásicas, tal como se muestra en la Tabla 2; entonces, el asumir para un estudio de confiabilidad que todas las fallas son trifásicas (balanceadas) es totalmente alejado de la realidad.

Tipo de falla	Porcentaje de ocurrencia
Monofásica	70% - 80%
Bifásica a tierra	17% - 10%
Bifásica	10% - 8%
Trifásica	3% - 2%

Tabla 2. Frecuencia de ocurrencia de fallas [2].

#### ¿DE QUÉ DEPENDE LA CARGA INTERRUPTIDA DURANTE UNA FALLA?

La carga interrumpida (número de usuarios, kVA, kW-hora) durante una falla depende del tipo de falla y del tipo de conexión de la carga, tal como se explica a continuación.

#### FALLAS MONOFÁSICAS QUE OCURREN SOBRE

- **Tramos trifásicos:** En este caso, se pierden las cargas alimentadas mediante los transformadores monofásicos (de una o dos fases en el primario) conectados a la fase que falló. Para los transformadores trifásicos con conexión  $\Delta y$ , que son los más utilizados en los sistemas de distribución de energía eléctrica, el voltaje en el secundario cambia quedando sólo un voltaje monofásico con el nivel de tensión adecuado, mientras que los otros dos tendrán valores inferiores al nominal; entonces, sólo se puede considerar en servicio la carga conectada mediante acometida fase-neutro a la fase con tensión adecuada.
- **Tramos bifásicos:** En este caso, la carga conectada mediante transformadores fase-fase no será atendida; la carga alimentada mediante transformadores fase-neutro o fase-tierra conectados a la fase en servicio será atendida.
- **Tramos monofásicos:** En este caso, se tendrá pérdida total de la carga.

#### FALLAS BIFÁSICAS

Se pierde la carga alimentada por los transformadores bifásicos y monofásicos conectados a las fases en falla. En los tramos trifásicos una fase queda en funcionamiento, por lo tanto, la carga alimentada por transformadores fase-tierra o fase-neutro continuará siendo alimentada.

#### FALLAS TRIFÁSICAS

Se pierde toda la carga conectada aguas abajo del punto de falla. Todo esto muestra que la diferencia central entre los análisis balanceado y desbalanceado es que el último incorpora el importante hecho de que todas las fallas no necesariamente interrumpen

toda la carga servida como asume el análisis balanceado; así, los resultados que se obtengan al aplicar estos análisis a un sistema desbalanceado serán diferentes. Pero, ¿qué tanto? A continuación, mediante dos casos de estudio, se da respuesta a este interrogante.

**CASO DE ESTUDIO 1: ¿QUÉ PASA SI LA CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DESBALANCEADO SE VALORA MEDIANTE UN ANÁLISIS BALANCEADO?**

Considérese el circuito primario trifásico desbalanceado de la Figura 2. En las tablas 3, 4 y 5 se presentan, respectivamente, los parámetros de confiabilidad para cada uno de los tramos del circuito primario, las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de falla y la probabilidad de ocurrencia de fallas sobre las fases.

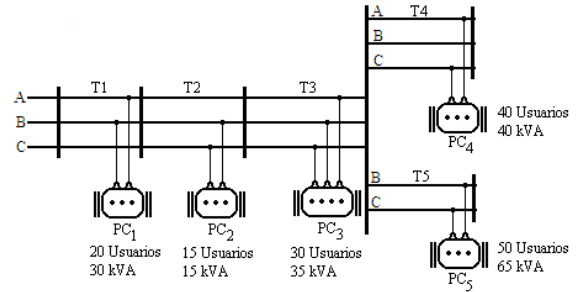


Figura 2. Sistema de prueba.

Para este sistema de prueba se realizan los dos siguientes estudios de valoración de confiabilidad:

I. Sistema balanceado: Se asume que todos los componentes del sistema son trifásicos y que todas las fallas que ocurren son trifásicas. Bajo estos supuestos

Tramo	$\lambda$ : Frecuencia de fallas [Fallas/Año]	r: Tiempo medio de reparación [Horas/Falla]
T1	0.20	4.0
T2	0.25	3.0
T3	0.30	2.0
T4	0.35	2.5
T5	0.15	3.5

Tabla 3. Parámetros de confiabilidad del sistema de prueba.

Tramo	Topología	Monofásica	Bifásica	Trifásica
T1	A – B – C	70	15	15
T2	A – B – C	60	20	20
T3	A – B – C	70	15	15
T4	A – B – C	60	20	20
T5	B – C	60	40	---

Tabla 4. Probabilidad de ocurrencia de fallas en el sistema de prueba [%].

Tramo	Topología	Falla Monofásica			Falla Bifásica		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fases A-B	Fases B-C	Fases C-A
T1	A – B – C	40	20	40	45	45	10
T2	A – B – C	40	20	40	45	45	10
T3	A – B – C	40	20	40	45	45	10
T4	A – B – C	40	20	40	45	45	10
T5	B – C	---	50	50	---	100	---

Tabla 5. Probabilidad de ocurrencia de fallas sobre las fases del sistema de prueba [%].

no importa el tipo de conexión de la carga, el sistema se puede representar mediante un diagrama unifilar y la valoración de confiabilidad se puede hacer mediante la técnica analítica de bloques de frecuencia y duración, la cual se puede consultar en [2], [3], [4].

II. Sistema desbalanceado: Se estudia el sistema tal como es, mediante la técnica de simulación de Montecarlo secuencial, utilizando la metodología desarrollada por los autores, la cual se presenta en [5] y [6]. Para poder comparar resultados entre ambos casos, se utilizan distribuciones de probabilidad exponenciales para los tiempos para falla y reparación de los componentes, las cuales se definen por medio de los parámetros presentados en la Tabla 2. La simulación se hace para 20000 iteraciones.

En las tablas 6 y 7 se presentan, respectivamente, los índices de confiabilidad de los puntos de carga y los del sistema. Los índices presentados se definen en [7].

En los resultados se observa que: (1) Las tasas de fallas de los puntos de carga que no tienen conexión trifásica se aumentan de un 13% a un 29% si su valoración se hace mediante un análisis balanceado. El tiempo medio de reparación de los puntos de carga no se ve afectado por el tipo de valoración de confiabilidad. (2) Los índices SAIDI y el ASAI, los cuales están basados en los tiempos de reparación, no se ven afectados por el tipo de valoración de confiabilidad aplicada. Los índices SAIFI y el ASIF se aumentan en alrededor de un 15% si su valoración se hace mediante un análisis balanceado. El índice CAIDI se reduce en un 18% si su valoración se hace mediante un análisis balanceado; esto sucede porque los clientes afectados por las fallas son mayores a los que se afectan en un análisis que considera el desbalance. Así pues, este índice engañoso muestra una situación mejor de la que realmente existe.

Punto de carga	$\lambda$ : Frecuencia de fallas [Fallas/Año]			r: Tiempo medio de reparación [Horas/Falla]		
	I Sistema balanceado	II Sistema desbalanceado	$\Delta(II/I)$	I Sistema balanceado	II Sistema desbalanceado	$\Delta(II/I)$
T1	0.20	0.1426	-28.70%	4.0000	4.0391	+0.98%
T2	0.45	0.3344	-25.69%	3.4444	3.4707	+0.76%
T3	0.75	0.7499	-0.013%	2.8666	2.8929	+0.92%
T4	1.10	0.9574	-12.96%	2.7500	2.7872	+1.35%
T5	0.90	0.7004	-22.17%	2.9722	3.0511	+2.66%

Tabla 6. Índices de confiabilidad de los puntos de carga – Caso de estudio 1.

	I Sistema balanceado	II Sistema desbalanceado	$\Delta(II/I)$
SAIFI [Interrupciones/año]	0.7887	0.6689	-15.19%
SAIDI [Horas/año]	2.3129	2.3129	0.00%
CAIDI [Horas/año]	2.9325	3.4577	+17.91
ASAI [%]	99.9736	99.9736	0.00%
ASIFI [Interrupciones/año]	0.7649	0.6452	-15.65%

Tabla 7. Índices de confiabilidad del sistema de prueba – Caso de estudio 1.

**CASO DE ESTUDIO 2: ¿CÓMO AFECTA LA VALORACIÓN DE CONFIABILIDAD EL NIVEL DE DESBALANCE EN LAS CARGAS?**

Para el sistema de prueba se va a variar el desbalance en las cargas entre dos extremos: partiendo de la situación en que el sistema se asume totalmente balanceado a la situación en que el sistema se analiza con el desbalance que realmente tiene. En las tablas 8 y 9 se presentan los resultados. Sólo se consideran aquí los índices de confiabilidad que en el caso de estudio anterior presentaron variación.

Los resultados de la columna 1 de la Tabla 8 se obtuvieron mediante la técnica analítica de bloques de frecuencia y duración, los otros mediante simulación de Montecarlo. Los resultados de la simulación se re-

dondean como se muestra en la Tabla 8 para mostrar que coinciden con los obtenidos mediante el método analítico.

En los resultados se observa que: (1) La tasa de fallas de un punto de carga sólo depende de su tipo de conexión, no depende del tipo de conexión de los otros puntos de carga. Como se observa en las celdas sombreadas de la Tabla 8, la tasa de fallas de un punto de carga sólo cambia de valor cuando se cambia su conexión. La tasa de fallas de PC3 no cambia pues este siempre se considera trifásico. (2) Los índices SAIFI Y ASIFI disminuyen de valor conforme se aumenta el desbalance en las cargas. Por el contrario, el índice CAIDI aumenta.

Punto de Carga (PC)	1 Sistema balanceado. Todos los PC se consideran trifásicos	2 PC5 es monofásico, los otros trifásicos	3 PC5 y PC1 son monofásicos, los otros trifásicos	4 PC5, PC1 y PC2 son monofásicos, los otros trifásicos	5 Sistema real desbalanceado PC5, PC1, PC2 Y PC4 son monofásicos y PC3 trifásico
1	0.20	0.1996±0.20	0.1426	0.1426	0.1426
2	0.45	0.4526±0.45	0.4526±0.45	0.3344	0.3344
3	0.75	0.7499±0.75	0.7499±0.75	0.7499±0.75	0.7499±0.75
4	1.10	1.0988±1.10	1.0988±1.10	1.0988±1.10	0.9574
5	0.90	0.7004	0.7004	0.7004	0.7004

Tabla 8. Frecuencia de fallas en los puntos de carga [Fallas/Año] – Caso de estudio 2.

Índice	1 Sistema balanceado. Todos los PC se consideran trifásicos	2 PC5 es monofásico, los otros trifásicos	3 PC5 y PC1 son monofásicos, los otros trifásicos	4 PC5, PC1 y PC2 son monofásicos, los otros trifásicos	5 Sistema real desbalanceado PC5, PC1, PC2 Y PC4 son monofásicos y PC3 trifásico
SAIFI [Int./año]	0.7887	0.7242	0.7168	0.7054	0.6689
CAIDI [Horas/año]	2.9325	3.1937	3.2265	3.2788	3.4577
ASIFI [Int./año]	0.7649	0.6946	0.6854	0.6758	0.6452

Tabla 9. Índices del sistema - Caso de estudio 2.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La valoración del tiempo promedio de reparación de los puntos de carga de un sistema de distribución desbalanceado no se afecta por el tipo de análisis aplicado, sea éste balanceado o desbalanceado.

Si la valoración de confiabilidad de un sistema de distribución desbalanceado se realiza asumiendo que éste es balanceado, la frecuencia de fallas de los puntos de carga y los índices SAIFI y ASIFI serán mucho mayores que si la valoración se hiciese incorporando el desbalance existente. Esto quiere decir que los resultados obtenidos son pesimistas, pues muestran una situación más grave de la que realmente existe en el sistema. El utilizar este tipo de práctica puede llevar a decisiones erróneas en los procesos de decisión relacionados con la expansión del sistema pues muestra la necesidad de hacer inversiones que bajo el escenario de estudio no se requieren o que pueden ser pospuestas varios años.

Si la valoración de confiabilidad de un sistema de distribución desbalanceado se realiza asumiendo que éste es balanceado, el índice CAIDI serán mucho menor que si la valoración se hiciese incorporando el

desbalance existente. Esto sucede porque los clientes afectados por las fallas en un análisis balanceado son mayores a los que se afectan en un análisis que sí considera el desbalance. Así, el valor obtenido para este índice es engañoso pues muestra una situación mejor de la que realmente existe. De aquí la importancia de aplicar el análisis desbalanceado a los sistemas que tienen esta característica, pues sólo este tipo de análisis incorpora el importante hecho de que no todas las fallas interrumpen toda la carga servida.

La variación en las tasas de fallas de los puntos de carga y en los índices SAIFI, ASIFI y CAIDI depende del grado de desbalance existente en el sistema. Así conforme el número de puntos de carga con conexión mediante transformadores de distribución monofásicos aumenta, mayor será la diferencia en los resultados para las tasas de fallas de los puntos de carga, SAIFI y ASIFI; para CAIDI se da la situación contraria. De aquí la importancia de que los estudios de confiabilidad se realicen incorporando las características reales de los sistemas bajo estudio, es decir, que el modelo del sistema realmente corresponda a la realidad objetiva que pretende capturar.

## REFERENCIAS

- [1] **C.J. Zapata, D. Cataño, H.F. Suárez.**  
“Índices de confiabilidad de transformadores de distribución”. *Revista Mundo Eléctrico*, No. 57, 2004.
- [2] **L. J. Blackburn.**  
*Protective Relaying: Principles and Applications*, Marcel Dekker, 1998.
- [3] **R. Billinton, R. Allan.**  
*Reliability evaluation of engineering systems*. Plenum Press, 1983.
- [4] **C.J. Zapata.**  
*Confiabilidad de sistemas Eléctricos*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [5] **C.J. Zapata, O.Gómez.**  
“Reliability assessment of unbalanced distribution systems using sequential Montecarlo simulation”. IEEE Transmission & Distribution Latin America Conference, 2006.
- [6] **C.J. Zapata, O.Gómez.**  
“Valoración de confiabilidad de sistemas de distribución desbalanceados utilizando simulación de Montecarlo”, *Revista Scientia et Technica*, No. 30, 2006. Disponible en: [www.utp.edu.co/ciencia](http://www.utp.edu.co/ciencia)
- [7] **IEEE.**  
“Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices”, Standard 1366, IEEE, 2003.

## BIBLIOGRAFÍA

- R. Billinton, R. Allan.**  
*Reliability Evaluation of Power Systems*. Plenum Press, 1996.
- IEEE.**  
“Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Systems, standard 493”, IEEE, 1997.
- G. Kjolle, L. Rolfsegn, E. Dahl.**  
“The Economic Aspect of Reliability in Distribution System Planning”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, 1990.
- R. Billinton and P. Wang.**  
“Teaching Distribution System Reliability evaluation Using Monte Carlo Simulation”. IEEE Transaction on Power systems, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- C. J. Zapata, L.C. Piñeros, D.A. Castaño.**  
“El método de simulación de Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica”, *Revista Scientia et Technica*, No. 24, 2004.  
Disponible en: [www.utp.edu.co/ciencia](http://www.utp.edu.co/ciencia)
- O. Gómez.**  
“Análisis de Confiabilidad en Sistemas de Distribución Desbalanceados”, Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.