

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

# Análisis del Impacto de la Generación Fotovoltaica en Redes de Distribución Mediante la Técnica de Barrido Progresivo-Regresivo.

ERIC MORALES AGUILAR<sup>1</sup>, BLANCA VERONICA HERNÁNDEZ GÓMEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Colima, Universidad Multitécnica Profesional, Manzanillo, Colima, México.

<sup>2</sup>Universidad Multitécnica Profesional, Manzanillo, Colima, México.

emorales@uclm.mx

hergo2@hotmail.com

**RESUMEN** En este artículo un estudio sobre el impacto de la generación fotovoltaica en redes de distribución es presentado. El estudio es realizado a través de la técnica de barrido progresivo-regresivo aplicado a una red radial de 34 buses. Los resultados muestran el impacto positivo en el perfil de voltaje que tiene la generación fotovoltaica tanto en el bus instalado como a lo largo de toda la red.

**PALABRAS CLAVE** Barrido progresivo-regresivo, Generación fotovoltaica, Red de distribución.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) incentiva a los países a fortalecer la generación de energía sostenible y limpia [1], en este ámbito México a través de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha dado la apertura a la Generación Fotovoltaica (GFV) interconectada a la red de Comisión Federal de Electricidad (CFE) con capacidades de 10 kW para casa habitación, 30 kW para uso general o sistemas comerciales y 500 kW en generación en mediana escala [2], además, la Secretaría de Energía proyecta un crecimiento de las energías renovables, entre ellas la fotovoltaica, a nivel nacional con una capacidad instalada de 7,830 MW y una generación anual de 13,396 GWh para el año 2031 [3-4]. Por otro lado, el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), en 2014 financió 294 proyectos de GFV siendo 161 para empresas y 132 al sector residencial; y un proyecto de microgeneración para una empresa en la región lagunera, en el norte del país. Un incremento considerable con respecto a los 182 proyectos que financió en 2013 [5]. Esto repercute directamente en el ahorro de energía eléctrica facturada por parte del cliente e indirectamente en el perfil de voltaje en toda la red.

Los niveles de tensión a los cuales se realiza la interconexión a la red de CFE son: a) menor a 1kV para casa habitación y medianos productores y b) entre 1 y 69 kV para generación en mediana escala [2], por lo tanto este tipo de generación se interconecta generalmente a la red eléctrica de distribución, como se muestra en la Fig.1.

Las redes eléctricas de distribución son típicamente radiales, con cargas desbalanceadas y líneas no transpuestas, múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas y trifásicas), cargas de distinta naturaleza, entre otras, por tal motivo se requieren modelos trifásicos de los componentes de la red. Un método de solución que toma en cuenta estas características es el método de barrido progresivo-regresivo. Este método se basa en la actualización de corrientes y voltajes a lo largo de la red de distribución, el barrido regresivo calcula corrientes con actualizaciones de voltajes y posteriormente un barrido progresivo calcula voltajes con actualizaciones de corriente mediante una técnica iterativa de solución, la cual ha probado tener gran eficiencia en el estudio este tipo de redes [7 - 12].

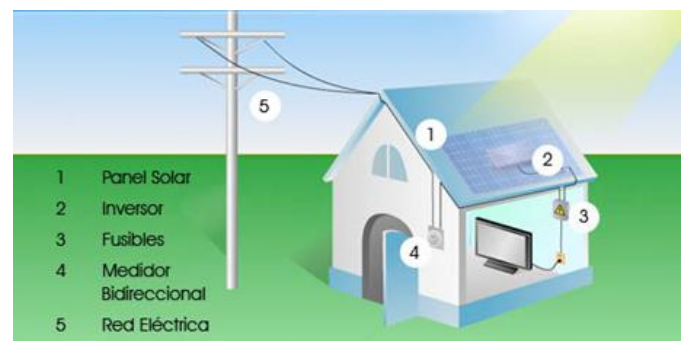


Fig. 1. Interconexión de GFV la red eléctrica [4].

## II. REVISIÓN MATEMÁTICA

En este apartado se describen las ecuaciones básicas de la técnica de barrido progresivo-regresivo, la forma de modelar las cargas y la forma de incorporar la generación fotovoltaica al esquema de solución.

### A. TÉCNICA DE BARRIDO

La técnica de barrido se divide principalmente en dos partes: el barrido regresivo y el barrido progresivo [7,13].

*Barrido regresivo:* Considere dos buses en una capa determinada de una red radial, como se muestra en la Fig. 2, la corriente entrante en del bus de la izquierda  $I_m$ , es calculada a partir de las tensiones y corrientes desde el bus de la derecha ( $V_n$  e  $I_n$ ) como:

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{c}_{mn} \mathbf{V}_n + \mathbf{d}_{mn} \mathbf{I}_n, \quad (1)$$

donde las matrices de coeficientes  $\mathbf{c}_{mn}$  y  $\mathbf{d}_{mn}$  implican parámetros de la línea situada entre los buses  $m$  y  $n$ :

$$\mathbf{c}_{mn} = \mathbf{Y} + \frac{1}{4} \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}, \quad (2a)$$

$$\mathbf{d}_{mn} = \mathbf{U} + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}, \quad (2b)$$

en (2)  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Z}$  y  $\mathbf{U}$  denotan la admitancia en derivación, impedancia de línea y matriz identidad, respectivamente.

En adición y en concordancia con la Fig.2:

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_{n,inj} + \sum_{i=1}^q \mathbf{I}_{n,i}, \quad (3)$$

donde  $\mathbf{I}_{n,inj}$  representa la corriente inyectada en bus  $n$ ,  $q$  el número de ramas conectadas al bus  $n$  e  $\mathbf{I}_{n,i}$  corresponde a corrientes de rama que entran al bus  $n$ .

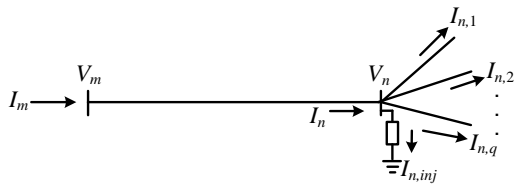


Fig. 2. Direcciones de referencia para la técnica de barrido.

*Barrido progresivo:* Basado en las direcciones de referencia de la Fig. 2, ahora las tensiones se calculan de izquierda a derecha como:

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{A}_{mn} \mathbf{V}_m + \mathbf{B}_{mn} \cdot \mathbf{I}_m, \quad (4)$$

donde las matrices de coeficientes  $\mathbf{A}_{mn}$  y  $\mathbf{B}_{mn}$  implican parámetros de la línea situada entre los buses  $m$  y  $n$ :

$$\mathbf{A}_{mn} = (\mathbf{d}_{mn})^{-1}, \quad (5a)$$

$$\mathbf{B}_{mn} = (\mathbf{d}_{mn})^{-1} \cdot \mathbf{Z}. \quad (5b)$$

Note que las Ecuaciones (1) a (5) son matrices de  $3 \times 3$  representando un modelado trifásico de la red.

### B. CARGA EN POTENCIA CONSTANTE REAL Y REACTIVA

Este tipo de carga se modela con la ecuación:

$$\mathbf{I}_{n,carga} = \left( \frac{S_n}{V_n} \right)^*, \quad (6)$$

donde \* denota conjugado. En caso de no tener GFV,  $\mathbf{I}_{n,carga}$  será igual a  $\mathbf{I}_{n,inj}$  y se agrega al esquema iterativo en (3).

### C. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Este tipo de generación está compuesta por potencia real y se puede considerar constante para estudios en estado estable; su corriente se calcula con:

$$\mathbf{I}_{n,GFV} = \left( \frac{P_n}{V_n} \right)^*, \quad (7)$$

de acuerdo con la convención de signos, esta corriente se resta a la corriente de carga para obtener la corriente  $\mathbf{I}_{n,inj}$  total, resultando en:

$$\mathbf{I}_{n,inj} = \mathbf{I}_{n,carga} - \mathbf{I}_{n,GFV}. \quad (8)$$

## III. DESARROLLO Y RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado en base al algoritmo de barrido progresivo - regresivo a una red de prueba con 34 buses antes y después de la incorporación de la GFV.

### A. RED DE PRUEBA

El caso de estudio consiste de 34 buses interconectados por 33 líneas de transmisión aéreas, como se muestra en la Fig. 3. Las impedancias serie y admitancias en derivación de línea son trifásicas-monofásicas y mostradas en la Tabla I [14], note que las líneas no son transpuestas. Los datos por segmento de línea son mostrados en la Tabla II. Los parámetros de carga desbalanceadas se enumeran en la Tabla III y todos han sido elegidos arbitrariamente como conexión estrella. La fuente (bus 800, Fig. 3) es considerada de 14.376 kV con el respectivo desplazamiento del ángulo de fase para las fases  $a$ ,  $b$  y  $c$ .

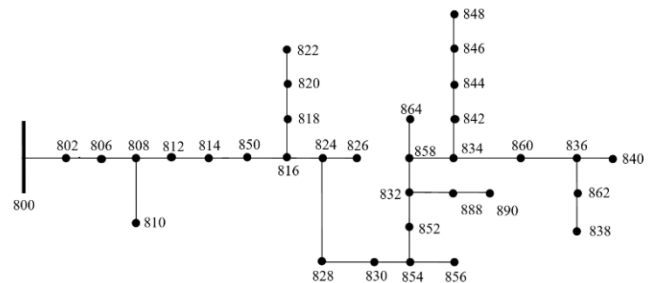


Fig. 3. Red de distribución radial de 34 buses.

**TABLA I. IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS DE LÍNEA.**

Configuración	Z (R+jX) en ohms por milla		
300	1.3368+j1.3343	0.2101+j0.5779	0.2130+j0.5015
		1.3238+j1.3569	0.2066+j0.4591
			1.3294+j1.3471
301	1.9300+j1.4115	0.2327+j0.6442	0.2359+j0.5691
		1.9157+j1.4281	0.2288+j0.5238
			1.9219+j1.4209
302	2.7995+j1.4855	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
		0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
			0.0000+j0.0000
303	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
		2.7995+j1.4855	0.0000+j0.0000
			0.0000+j0.0000
304	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
		1.9217+j1.4212	0.0000+j0.0000
			0.0000+j0.0000

**TABLA II. DATOS DE SEGMENTO DE LÍNEA.**

Bus A	Bus B	Longitud (ft.)	Configuración
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	10	300
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	302
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

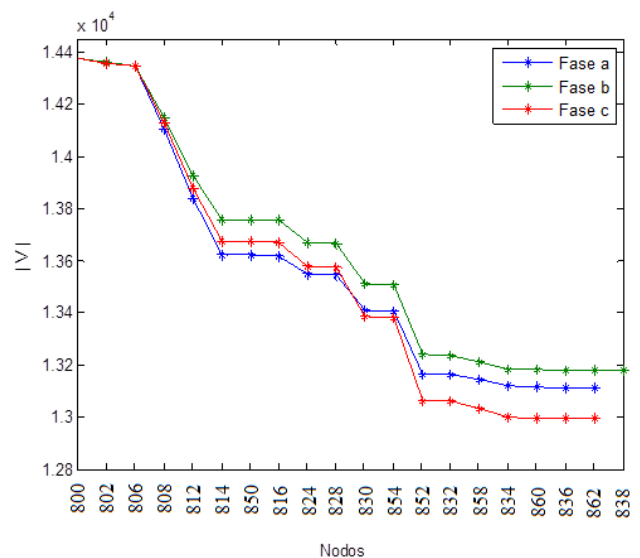
**TABLA III. CARGA EN BUSES.**

Bus	Carga por fases P+jQ en kW y kVAr respectivamente.		
	a	b	c
800	0.900 + 0.2250i	-----	-----
802	-----	-----	-----
806	-----	13.500 + 6.7500i	11.250 + 6.300i
808	9.450 + 5.8500i	9.4500 + 0.0000i	4.500 + 1.800i
810	-----	7.2000 + 3.6000i	-----

812	-----	9.9000 + 6.3000i	8.1000 + 0.0000i
814	1.800 + 0.9000i	3.1500 + 2.2500i	-----
850	6.300 + 2.7000i	11.7000+2.000i	2.2500 + 0.4500i
816	4.500 + 1.8000i	9.4500 + 5.8500i	6.3000 + 3.1500i
818	4.950 + 2.7000i	-----	-----
820	15.30 + 7.6500i	-----	-----
822	60.750 +31.500i	-----	-----
824	-----	2.2500 + 0.9000i	-----
826	-----	18.0000 + 9.0000i	-----
828	-----	-----	2.2500 + 1.1250i
830	7.650 + 3.600i	4.5000 + 2.2500i	11.250 + 4.500i
854	-----	6.7500 + 1.8000i	7.6500 + 2.2500i
856	-----	1.8000 + 0.9000i	-----
852	-----	-----	15.300 + 7.650i
832	9.450 + 5.8500i	5.4000 + 2.2500i	-----
888	5.400 + 1.8000i	11.2500 + 0.0000i	6.7500 + 2.7000i
890	67.50 + 33.750i	67.500 + 33.750i	67.500 + 33.750i
858	3.150 + 1.350i	0.9000 + 0.4500i	2.7000 + 1.3500i
864	0.900 + 0.4500i	-----	-----
834	1.800 + 0.9000i	6.7500 + 3.6000i	5.8500 + 3.1500i
842	3.600 + 0.900i	7.6500 + 0.500i	3.1500 + 0.4500i
844	64.800 +49.500i	60.750 +47.250i	60.750 +47.2500i
846	-----	11.250 + 5.400i	9.0000 + 4.9500i
848	9.000 + 7.200i	19.350 +12.1500i	9.0000 + 7.2000i
860	16.200 +10.800i	18.000 +11.700i	58.500 +31.950i
840	12.150 + 7.200i	13.950 + 8.1000i	4.0500 + 3.1500i
836	13.500 + 6.750i	4.500 + 2.7000i	18.900 + 9.900i
862	9.450 + 5.850i	4.0500	3.6000 + 1.3500i
838	-----	12.600 + 6.300i	-----

**B. RESULTADOS NUMÉRICOS SIN GFV**

En la Tabla IV se muestran los voltajes nodales sin GFV. Con el propósito de una mejor visualización de la caída de potencial a lo largo de la red, las magnitudes de los voltajes de la trayectoria del bus 800 al bus 838 son graficados en la Fig. 4, en donde se puede observar como la caída de voltaje se produce a medida que los buses se alejan de la fuente y que están en forma desbalanceada.



**Fig. 4. Voltajes nodales sin GFV.**

**TABLA IV. VOLTAJES NODALES SIN GFV.**

Bus	Voltajes en fases (kV)		
	a	b	c
800	14.376 ∟ 0.00°	14.376 ∟ -120.00°	14.376 ∟ 120.00°
802	14.357 ∟ -0.01°	14.359 ∟ -120.02°	14.358 ∟ 119.98°
806	14.345 ∟ -0.02°	14.348 ∟ -120.04°	14.346 ∟ 119.97°
808	14.107 ∟ -0.19°	14.150 ∟ -120.34°	14.131 ∟ 119.80°
810	-----	14.148 ∟ -120.34°	-----
812	13.839 ∟ -0.39°	13.928 ∟ -120.65°	13.877 ∟ 119.61°
814	13.622 ∟ -0.55°	13.759 ∟ -120.88°	13.675 ∟ 119.49°
850	13.622 ∟ -0.55°	13.759 ∟ -120.88°	13.675 ∟ 119.49°
816	13.619 ∟ -0.55°	13.757 ∟ -120.88°	13.672 ∟ 119.49°
818	13.612 ∟ -0.55°	-----	-----
820	13.433 ∟ -0.60°	-----	-----
822	13.391 ∟ -0.61°	-----	-----
824	13.551 ∟ -0.52°	13.672 ∟ -120.89°	13.580 ∟ 119.47°
826	-----	13.669 ∟ -120.89°	-----
828	13.545 ∟ -0.52°	13.665 ∟ -120.89°	13.572 ∟ 119.47°
830	13.408 ∟ -0.48°	13.511 ∟ -120.91°	13.386 ∟ 119.45°
854	13.405 ∟ -0.48°	13.507 ∟ -120.91°	13.382 ∟ 119.45°
856	-----	13.505 ∟ -120.92°	-----
852	13.163 ∟ -0.38°	13.239 ∟ -120.90°	13.064 ∟ 119.45°
832	13.163 ∟ -0.38°	13.238 ∟ -120.90°	13.064 ∟ 119.45°
888	13.163 ∟ -0.38°	13.238 ∟ -120.90°	13.064 ∟ 119.45°
890	13.147 ∟ -0.39°	13.224 ∟ -120.92°	13.048 ∟ 119.43°
858	13.142 ∟ -0.37°	13.214 ∟ -120.89°	13.036 ∟ 119.45°
864	13.142 ∟ -0.37°	-----	-----
834	13.119 ∟ -0.35°	13.185 ∟ -120.88°	13.002 ∟ 119.46°
842	13.118 ∟ -0.35°	13.184 ∟ -120.88°	13.001 ∟ 119.46°
844	13.115 ∟ -0.34°	13.180 ∟ -120.88°	12.998 ∟ 119.46°
846	13.114 ∟ -0.34°	13.176 ∟ -120.88°	12.996 ∟ 119.46°
848	13.114 ∟ -0.34°	13.175 ∟ -120.88°	12.996 ∟ 119.46°
860	13.116 ∟ -0.35°	13.181 ∟ -120.88°	12.996 ∟ 119.46°
840	13.113 ∟ -0.35°	13.178 ∟ -120.88°	12.994 ∟ 119.46°
836	13.113 ∟ -0.35°	13.179 ∟ -120.88°	12.994 ∟ 119.46°
862	13.113 ∟ -0.35°	13.179 ∟ -120.88°	12.993 ∟ 119.45°
838	-----	13.176 ∟ -120.89°	-----

**TABLA VI. VOLTAJES NODALES RESULTANTES CON GFV.**

Bus	Voltajes en fases (kV)		
	a	b	c
800	14.376 ∟ 0.00°	14.376 ∟ -120.00°	14.376 ∟ 120.00°
802	14.357 ∟ -0.01°	14.364 ∟ -120.01°	14.361 ∟ 119.99°
806	14.345 ∟ -0.02°	14.356 ∟ -120.02°	14.351 ∟ 119.99°
808	14.113 ∟ -0.23°	14.219 ∟ -120.19°	14.170 ∟ 119.99°
810	-----	14.217 ∟ -120.19°	-----
812	13.844 ∟ -0.49°	14.063 ∟ -120.36°	13.951 ∟ 119.98°
814	13.627 ∟ -0.70°	13.947 ∟ -120.47°	13.776 ∟ 120.01°
850	13.627 ∟ -0.70°	13.947 ∟ -120.47°	13.776 ∟ 120.01°
816	13.624 ∟ -0.70°	13.946 ∟ -120.47°	13.773 ∟ 120.01°
818	13.617 ∟ -0.70°	-----	-----
820	13.438 ∟ -0.76°	-----	-----
822	13.396 ∟ -0.76°	-----	-----
824	13.556 ∟ -0.70°	13.886 ∟ -120.45°	13.697 ∟ 120.04°
826	-----	13.884 ∟ -120.45°	-----
828	13.550 ∟ -0.70°	13.882 ∟ -120.44°	13.690 ∟ 120.05°
830	13.414 ∟ -0.69°	13.775 ∟ -120.39°	13.534 ∟ 120.13°
854	13.410 ∟ -0.69°	13.772 ∟ -120.38°	13.530 ∟ 120.14°
856	-----	13.771 ∟ -120.39°	-----
852	13.171 ∟ -0.65°	13.573 ∟ -120.27°	13.254 ∟ 120.28°
832	13.170 ∟ -0.65°	13.573 ∟ -120.27°	13.254 ∟ 120.28°
888	13.170 ∟ -0.65°	13.573 ∟ -120.27°	13.254 ∟ 120.28°
890	13.154 ∟ -0.66°	13.559 ∟ -120.28°	13.238 ∟ 120.27°
858	13.151 ∟ -0.64°	13.557 ∟ -120.24°	13.231 ∟ 120.31°
864	13.151 ∟ -0.64°	-----	-----
834	13.128 ∟ -0.63°	13.538 ∟ -120.22°	13.204 ∟ 120.34°
842	13.127 ∟ -0.63°	13.537 ∟ -120.22°	13.203 ∟ 120.34°
844	13.124 ∟ -0.63°	13.533 ∟ -120.21°	13.199 ∟ 120.34°
846	13.122 ∟ -0.62°	13.529 ∟ -120.21°	13.198 ∟ 120.34°
848	13.122 ∟ -0.62°	13.529 ∟ -120.21°	13.198 ∟ 120.34°
860	13.125 ∟ -0.63°	13.538 ∟ -120.21°	13.200 ∟ 120.34°
840	13.122 ∟ -0.63°	13.537 ∟ -120.20°	13.197 ∟ 120.34°
836	13.122 ∟ -0.63°	13.538 ∟ -120.20°	13.197 ∟ 120.34°
862	13.122 ∟ -0.64°	13.538 ∟ -120.20°	13.197 ∟ 120.35°
838	-----	13.539 ∟ -120.20°	-----

**C. RESULTADOS NUMÉRICOS CON GFV**

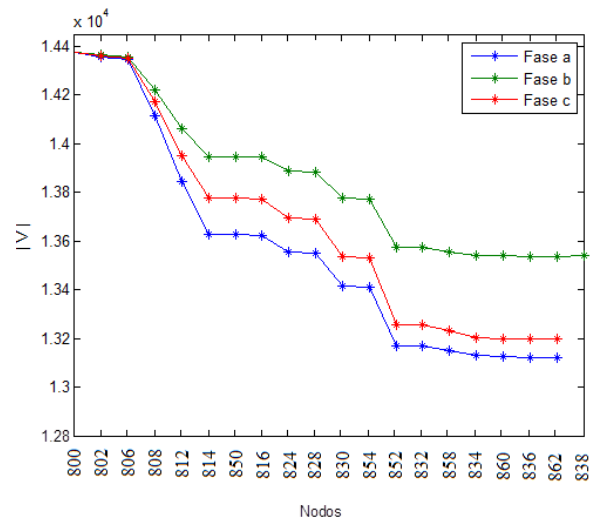
Se agrega GFV de manera aleatoria en 5 nodos de la red como se expresa en la Tabla V. En la Tabla VI se muestran los voltajes nodales resultantes con GFV. Para una mejor visualización de las diferencias de potencial a lo largo de la red, se grafican las magnitudes de los voltajes en la trayectoria del bus 800 al bus 838 en la Fig. 5.

En la Tabla V, para el bus 860 fase c, se asumen dos usuarios con GFV en el mismo bus, uno de 30 kW y otro de 20 kW.

**TABLA V. BUSES CON GFV EN KW.**

Bus	Fases		
	a	b	c
808	12	10	10
824	0	4	0
854	0	14	17
860	7	30	50
838	0	25	0

Para una mejor visualización de las diferencias de potencial a lo largo de la red, se grafican las magnitudes de los voltajes en la trayectoria del bus 800 al bus 838 en la Fig. 5, en donde se puede observar como en el bus 862, la fase c tiene una caída de potencial menor que el de la fase a, a diferencia de lo mostrado en la Fig. 5, esto se debe a la mayor GFV inyectada en la fase c.



**Fig. 5. Voltajes de nodo con GFV.**

#### IV. CONCLUSIONES

De las Tablas IV y VI y Figs. 4 y 5 se observa una mejora en el perfil de voltaje en los buses a lo largo de la red de prueba siendo evidente que el efecto de la GFV no solo influye al usuario generador sino también al resto del sistema.

A medida que la generación distribuida aumente, en este caso GFV, se tendrán mejores perfiles de voltaje en las redes eléctricas, además, ayudará a reducir: *a)* las pérdidas por transmisión debido a que la energía es consumida en el lugar de generación; *b)* la emisión de gases producidos por la generación convencional.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Colima y a la Universidad Multitecnica Profesional por las facilidades otorgadas para la presentación de este artículo.

#### REFERENCIAS

- [1] Resolución 65/151 de las Naciones Unidas para incentivar la generación sostenible de energía, consultado el 30 de abril de 2015 en <http://www.un.org/es/events/sustainableenergyforall/>.
- [2] RESOLUCION Núm. RES/054/2010 del 8 abril 2010 de la Comisión Reguladora de Energía consultado el 30 de abril de 2015 en [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5249086](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5249086).
- [3] Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031, Secretaría de Energía, consultado el 27 de agosto del 2018 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2017.pdf)
- [4] Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031, Secretaría de Energía, consultado el 27 de agosto del 2018 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284345/Prospectiva\\_de\\_l\\_Sector\\_El\\_ctrico\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284345/Prospectiva_de_l_Sector_El_ctrico_2017.pdf)
- [5] Informe de resultados del FIDE, consultado el 30 de abril de 2015 en [http://www.fide.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=577:enero-30-2015-mas-de-dos-centenas-de-proyectos-de-eficiencia-energetica-y-generacion-con-fuentes-renovables-financiados-en-2014&catid=57:noticias&Itemid=267](http://www.fide.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=577:enero-30-2015-mas-de-dos-centenas-de-proyectos-de-eficiencia-energetica-y-generacion-con-fuentes-renovables-financiados-en-2014&catid=57:noticias&Itemid=267).
- [6] Sistema interconectado a la red eléctrica, consultado el 30 de abril de 2015 en <http://www.econotecnia.com/sistema-de-energia-solar-fotovoltaica.html>.
- [7] Shirmohammadi, D., Hong, H.W., Semlyen, A., and Luo, G.X.. (1988). A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Trans. Power Syst., 20, 753–762.
- [8] Luo, G.X. and Semlyen, A.. (1990). Efficient load flow for large weakly meshed networks. IEEE Trans. Power Syst., 5, 1309–1316.
- [9] Ray Daniel Zimmeman, Comprehensive Distribution power flow modeling, solution algorithms and analysis, thesis, Enero 1995.
- [10] J.H. and Chang, C.Y.. (2007). Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems. IEEE Trans. Power Deliv., 22, 1665-1672.
- [11] Alhajri, M.F. and El-Hawary, M.E. (2010). Exploiting the radial distribution structure in developing a fast and flexible radial power flow for unbalanced three-phase networks. IEEE Trans. Power Deliv., 25, 378 - 389.
- [12] Moreira, J.C., Míguez, E., Vilacha, C. and Otero, A.F.. (2011). Large-scale network layout optimization for radial distribution networks parallel computing. IEEE Trans. Power Deliv., 26, 1946-1951.
- [13] William H. Kersting. (2001). Distribution System Modeling and Analysis. USA: CRC Press.
- [14] Fuentes de prueba para distribución de la IEEE, consultado el 30 de abril de 2015 en <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>.