

Análisis comparativo del estudio de flujos de potencia en series de tiempo por el cambio de paso en el muestreo de perfiles de carga y generación de sistemas fotovoltaicos interconectados aplicando métodos de interpolación adaptativa

Comparative analysis of the study of power flows in time series by the change of step in the sampling of load profiles and generation of interconnected photovoltaic systems applying adaptive interpolation methods

VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio†*, GUERRERO-MATA, José Manuel, CONTRERAS-AGUILAR, Luis y ARROYO-LEDESMA, Jaime

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P. 28400, Tel. 01 (312)316 11 65, Ext. 51451, Ext. Fax 51454.

ID 1^{er} Autor: *Tiberio, Venegas-Trujillo* / ORC ID: 0000-0001-5212-453X, Researcher ID Thomson: U-8519-2018, arXiv Autor ID: 2451039, CVU CONACYT ID: 175554

ID 1^{er} Coautor: *José Manuel, Guerrero-Mata* / ORC ID: 0000-0002-4720-4284, Researcher ID Thomson: U-8543-2018, arXiv Autor ID: 2452021

ID 2^{do} Coautor: *Luis, Contreras-Aguilar* / ORC ID: 0000-0001-9521-4172, Researcher ID Thomson: U-8528-2018, CVU CONACYT ID: 44887, Open ID: 105859140261217906832

ID 3^{er} Coautor: *Jaime, Arroyo-Ledesma* / ORC ID: 0000-0002-9760-5975, Researcher ID Thomson: U-9282-2018, Open ID: 102842708618875347755

Recibido: Junio 27, 2018; Aceptado: Septiembre 08, 2018

Resumen

El estudio de flujos de potencia en series de tiempo se ha convertido en una herramienta que extiende la evaluación de los sistemas eléctricos a través del tiempo. La posibilidad de incluir perfiles de generación de energía renovables que presentan variaciones de un momento a otro y de un día con otro, ha permitido un mejor entendimiento que estas tienen al interconectarse a los sistemas eléctricos de potencia. En este artículo se presenta un análisis comparativo del estudio de flujos de potencia en series de tiempo mediante el cambio de paso variable de muestreo en perfiles de carga y generación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica. El algoritmo de flujos de potencia basado en el método de Newton-Raphson ha sido extendido para incluir pasos de muestreo de 1, 5 y 15 minutos a lo largo de un mes. Para el caso de las soluciones de flujos de potencia obtenidas con pasos variables y muestreos al 75, 50 y 25% del muestreo original, estas son utilizadas para estimar las variables de estado del sistema en pasos menores mediante la técnica de interpolación adaptativa. Los perfiles de las variables de estado del sistema de potencia son comparados con las soluciones obtenidas a partir del estudio de flujos de potencia en series de tiempo.

Flujos de potencia en Series de Tiempo, Sistemas fotovoltaicos interconectados, Perfiles de carga y generación, paso de muestreo

Abstract

Time series power flow study has become an extended tool for evaluating power systems throughout time. The possibility to include output profiles from renewable energy with variability along the day, has allowed a better understanding of these technologies when they are interconnected to the grid. In this paper is presented a comparison analysis of time series power flow studies based on different step sampling of load and output PV profiles. The power flow algorithm based on Newton-Raphson has been extended to include step sampling of 1, 5 and 15 minutes. In cases when power flow studies are carried out with steps sampling of 5 and 15 minutes, these are used to estimate state variables at a smaller step sampling throughout cubic interpolation. State variable profiles estimated are compared with those obtained throughout time series power flow studies.

Time series power flow, Grid-connected PV, Load and generation output profiles, Step sampling

Citación: VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, GUERRERO-MATA, José Manuel, CONTRERAS-AGUILAR, Luis y ARROYO-LEDESMA, Jaime. Análisis comparativo del estudio de flujos de potencia en series de tiempo por el cambio de paso en el muestreo de perfiles de carga y generación de sistemas fotovoltaicos interconectados aplicando métodos de interpolación adaptativa. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018. 5-16: 9-16.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: tvenegas@ucol.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad, la cantidad de datos que se procesan a nivel mundial, son un número inimaginable. Esto día con día van en incremento debido al desarrollo de nuevas tecnologías y la necesidad de un análisis cada vez más exhaustivo. Las empresas y gobiernos requieren cada vez una mayor cantidad de procesamiento de datos con el fin de tomar las decisiones que más les beneficien.

El desarrollo de las energías renovables está teniendo un impacto sin precedentes. En el caso específico de los sistemas fotovoltaicos, estos han tenido un incremento significativo. De 2005 a 2015, el incremento en la capacidad instalada a nivel mundial ha sido de un 4450%. Entre los países con una mayor capacidad de sistemas fotovoltaicos instalados tanto interconectados como aislados se encuentran, China, Alemania, Japón y Estados Unidos. El crecimiento de los sistemas fotovoltaicos interconectados se ha debido a varias razones, pero sin duda, la disminución en los precios de las celdas fotovoltaicas, el interés por los gobiernos y la rentabilidad que dichos sistemas pueden representar en el sector económico ha causado el gran crecimiento exponencial que estos han ido teniendo al paso de los años.

En México, la apertura del mercado eléctrico a diversos entes para producir energía eléctrica por medio de diversas fuentes, estableciendo como meta nacional producir por medio de energías limpias para el 2024 el 35% de la generación total del país. En ese sentido, la energía solar fotovoltaica ha tenido una creciente participación. En el periodo 2007 a 2016, la capacidad instalada con tecnología solar creció anualmente 36.3% en promedio, pasando de 17.6 MW en 2006 a 388.6 MW en 2016. Así mismo, la generación de energía solar creció a un ritmo de 27.1% (Prospectiva de energía renovables, 2017).

Con la interconexión de los sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica, los escenarios de estudio a lo largo de las redes de distribución y de potencia incrementan la complejidad en su estudio. Cuando una cantidad reducida de SFV de pequeña escala se interconecta a la red eléctrica, un estudio simple puede ser suficiente para aprobar su incorporación al sistema (Bruckhaus Deringer 2014, Monthly Statistics Electricity, 2017).

Esto se debe a que las técnicas de estudio empleadas asumen condiciones de operación controladas, lo que conlleva un conservadurismo con respecto a la operación real del sistema. Con el fin de proveer un estudio más preciso en este sentido, diversos métodos basados en series de tiempo han demostrado efectividad cuando SFV son interconectado a la red eléctrica.

En consecuencia, la gran cantidad de información que se debe procesar comienza a alcanzar las capacidades de los equipos de cómputo y esto ha obligado a que se genere una mayor investigación y desarrollo en el análisis de datos.

Como resultado, los algoritmos matemáticos comienzan a retomar un gran papel, tal es el caso de aquellos basados en una reducción simple del paso de muestreo, aquellos que discriminan la información con el fin de ofrecer un muestreo adaptativo en el paso de muestreo.

Debido a todos estos factores es que se ha visto la necesidad de tomar importancia del efecto que estos sistemas de energía renovable tienen o pudieran tener bajo ciertas condiciones sobre los sistemas eléctricos interconectados.

Particularmente la energía fotovoltaica representa una buena oportunidad para contribuir a dicha meta.

Para conocer el impacto que tienen sobre la red eléctrica es necesario contar con información que pueda ser obtenida de ellos a partir de sistemas de monitoreo que registren los parámetros eléctricos de las celdas fotovoltaicas. Se requiere analizar los datos en intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños, dado que los sistemas fotovoltaicos presentan variaciones a lo largo del día y son afectados por diversos factores climatológicos.

Los estudios de flujos de potencia en series del tiempo son soluciones sucesivas de flujos de potencia en un periodo de tiempo. Cuando se requiere realizar el análisis a lo largo de un año en un red eléctrica cuando se incorporan sistemas fotovoltaicos. La cantidad de datos se vuelve inmensa y más aún cuando se tiene un muestreo de datos muy fino en un cierto periodo de tiempo.

Esto vuelve el tiempo de procesamiento computacional muy extenso, es por eso que en este artículo se emplean métodos de interpolación al muestreo con la finalidad de reconstruir los perfiles de los parámetros eléctricos del estudio de flujos de potencia.

Técnicas de reducción de muestreo

A) Reducción simple

Una de las técnicas comunes para la reducción de la cantidad de datos en el análisis de perfiles en series de tiempo, consiste en reducir significativamente los puntos de muestreo manteniendo un paso fijo. Esto conlleva, por un lado, la disminución de operaciones de cálculo y de tiempo computacional. Sin embargo, la pérdida de datos significativos conduce a un error en el análisis de los perfiles. La reducción en este sentido, se basa en el empleo de técnicas de interpolación a partir de un perfil en pasos fijos. Sin embargo, la técnica de interpolación, no diferencia secciones del perfil que debieran de aumentar la densidad de datos debido a la relevancia que estos pudieran tener para el análisis en un tiempo determinado del perfil. La figura 1, muestra la reducción de datos mediante la técnica de interpolación cúbica, existen puntos del perfil original que son omitidos en el proceso de reducción.

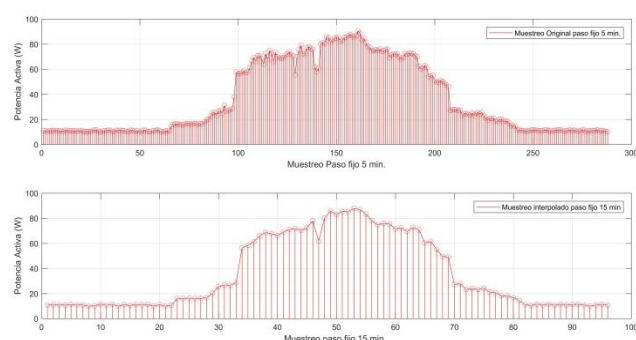


Figura 1 Reducción mediante interpolación cúbica

Fuente: Elaboración propia

B) Reducción de muestreo adaptativa

La técnica de interpolación adaptativa mantiene la resolución de datos elevada mientras que el perfil presenta cambios rápidos y la disminuye cuando los perfiles se mantienen estables, esto nos permite hacer énfasis en los datos más significativos del perfil generando así un paso variable. La figura 2 muestra un comparativo de la interpolación cúbica y adaptativa a un perfil de carga.

La interpolación cúbica mantiene un paso fijo mientras que la interpolación adaptativa posee un paso variable en el tiempo.

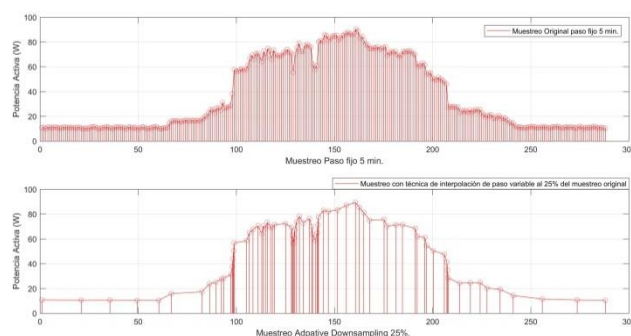


Figura 2 Reducción mediante muestreo adaptativo

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el algoritmo matemático del método de muestreo adaptativo.

Dado un muestreo de datos $Q = q_1, \dots, q_n$ además de un valor θ , que representa la cantidad de datos al que será reducido, primero se calculan las diferencias acumuladas entre cada valor de la serie del muestreo:

$$D_Q[k] = \sum_{i=2}^k |q_i - q_{i-1}| \quad (1)$$

$$D_Q[k] = \sum_{i=2}^k |q_i - q_{i-1}|$$

$$t_i = \min\{k | D_Q[k] \geq d_Q i\}$$

$$B_i = \frac{D_Q[t_i] - d_Q i}{D_Q[t_i] - D_Q[t_i - 1]}$$

$$\hat{t}_i = t_i - B_i$$

$$\hat{x}_i = q_{t_i} - B(q_{t_i} - q_{t_i-1})$$

Para el estudio de flujos de potencia en series de tiempo son requeridos los perfiles de demanda así como los perfiles de generación fotovoltaica.

Con el fin de evaluar el efecto de la interconexión de los sistemas fotovoltaicos en la red eléctrica, el estudio de flujos de potencia extendido en series de tiempo requiere la interacción de los cambios diarios de demanda del usuario y generación del sistema fotovoltaico. El análisis considera el ajuste de cada perfil mediante la interpolación adaptativa a pasos variables del 75, 50, y 25% del muestreo total.

La figura 3 muestra el proceso de simulación de flujos de potencia en series de tiempo.

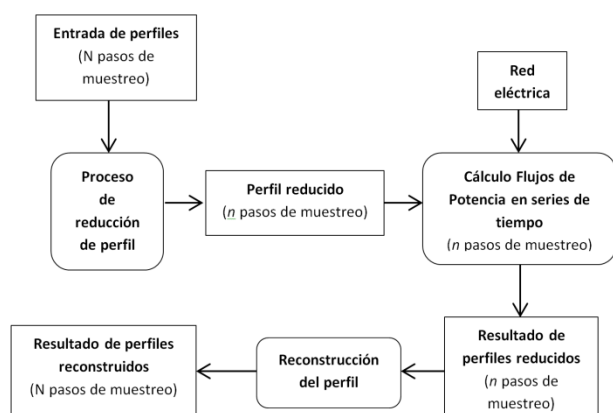


Figura 3 Proceso de simulación de flujos de potencia en series de tiempo

Fuente: Elaboración propia

Descripción del sistema

Con el objeto de evaluar el desempeño del algoritmo de flujos de potencia en series de tiempo cuando fuentes de energía limpia como la fotovoltaica son incorporadas al sistema eléctrico, tres casos de estudio son propuestos para tal fin.

En todos los casos se han realizado simulaciones de todo un mes, incluyendo perfiles de demanda de días laborables y de fin de semana.

Así mismo, se han considerado perfiles de generación fotovoltaica mensuales. Los casos descritos a continuación toman en cuenta la solución de flujos de potencia con pasos de muestreo de 15, 5 y 1 minuto para ser tomados como referencia. Estos pasos de muestreo son interpolados mediante la técnica de interpolación adaptativa al 75, 50, y 25% de sus puntos de muestreo y la solución de estos son punto de comparación con la referencia con el fin de evaluar el error obtenido en la solución.

Las características técnicas de la computadora empleada para las simulaciones es una Laptop Marca Asus, Modelo K46CM-MPR1-H con Core i5-3317U (1.7 GHz), con 6Gb DDR3 en RAM, 500GB de Disco Duro a 7200RPM, Tarjeta de gráficos Nvidia GeForce GTX660M 2GB DDR5, batería de 4 Celdas, Cámara Web HD, Lector de memorias, pantalla de 14.0" y sistema operativo Microsoft® Windows® 10 (64 Bits).

La red eléctrica empleada para llevar a cabo los estudios de flujos de potencia en series de tiempo fue tomada físicamente del campus Coquimatlan de la Universidad de Colima.

Esta red opera en media y baja tensión con voltajes de 13.8 kV y 220 V, respectivamente. Está conformada por: 99 nodos, 18 transformadores, y 80 alimentadores operando en baja tensión, 57 nodos de carga (edificios). En la figura 4 se muestra la red eléctrica a detalle con la incorporación de sistemas fotovoltaicos en los nodos de carga, así como la capacidad instalada de estos.

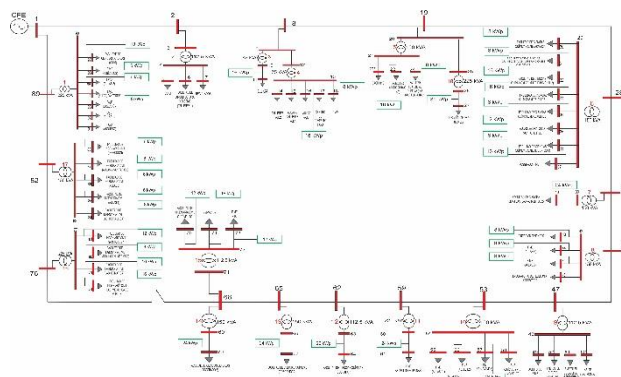


Figura 4 Red eléctrica campus coquimatlan

Fuente: Elaboración propia

- Caso base: Red eléctrica con una sola fuente de energía eléctrica por parte de la compañía suministradora.
- Generación fotovoltaica distribuida: Red eléctrica del caso base incluyendo sistemas fotovoltaicos interconectados sobre las azoteas de algunos edificios. La suma de las capacidades de los sistemas es de 500 kWp.

A continuación se presentan identificadores de las interpolaciones realizadas a los estudios de flujos de potencia en series de tiempo para ajustar distintos pasos de muestreo:

F1 a I75%, I50%, I25%

Estudio de flujos de potencia en series de tiempo con paso de muestreo cada 1 minuto ajustado mediante interpolación adaptativa a pasos variables al 75, 50 y 25% del muestreo total.

F5 a 175%, 150%, 125%

Estudio de flujos de potencia en series de tiempo con paso de muestreo cada 5 minutos ajustado mediante interpolación adaptativa a pasos variables al 75, 50 y 25% del muestreo total.

F15 a 175%, 150%, 125%

Estudio de flujos de potencia en series de tiempo con paso de muestreo cada 15 minutos ajustado mediante interpolación adaptativa a pasos variables al 75, 50 y 25% del muestreo total.

Datos de carga: El estudio de flujos de potencia en series de tiempo requiere la disponibilidad de datos de carga históricos y salida de datos coincidentes. Los datos de carga en series de tiempo que han sido empleadas en este caso, fueron obtenidos mediante mediciones realizadas por el equipo de la compañía suministradora con intervalos de tiempo cada 15 minutos. Los perfiles de carga correspondiente a un día con paso de muestreo cada 15 minutos, fueron ajustados a una resolución de cada 5 y 1 minutos mediante interpolación cúbica.

Datos del Sistema fotovoltaico: Los datos de generación del Sistema fotovoltaico fueron obtenidos de dos sistemas fotovoltaicos interconectados de pequeña escala de 1 y 2 kWp. Perfiles de generación en series de tiempo con paso de muestreo cada 5 minutos han sido registrados históricamente para la localidad del municipio de Colima, Colima., México (Enphase, 2018). Los perfiles de generación fotovoltaica fueron ajustados mediante interpolación cúbica a pasos de muestreo cada 1 y 15 minutos.

Flujos de potencia en series del tiempo

El estudio de flujos de potencia en series de tiempo es llevado a cabo a lo largo de un mes en sus distintos casos de estudio mencionados anteriormente. Para esto se requieren los perfiles ajustados a pasos variables de 75, 50 y 25%. La variable de salida de los estudios de flujos de potencia en series del tiempo (voltaje), son comparados con los resultados obtenidos a partir del muestreo de datos originales con paso de muestreo cada 5 minutos.

Esto con el fin de hacer un análisis comparativo y obtener un error de voltaje en los tres casos de estudio con respecto al voltaje original.

Como se muestra en la figura 5 podemos observar el perfil de voltaje del nodo 88, el cual fue identificado como el nodo con mayor error absoluto de los 99 nodos, así como también el periodo en el que se registró dicho error.



Figura 5 Perfil de voltaje para los tres casos de estudio
Fuente: Elaboración propia

Reconstrucción de perfiles mediante interpolación cúbica

En el estudio de flujos de potencia se obtienen valores de solución a lo largo de un mes. La cantidad de soluciones se vuelve extensa cuando se tiene un muestreo de datos muy fino.

Para el caso de un perfil de muestreo con paso de 1 minuto (1440 datos) se tienen 43200 soluciones. Cuando aplicamos la interpolación adaptativa a los perfiles tenemos una disminución en la cantidad de soluciones.

En el caso de un perfil con paso de muestreo cada minuto e interpolado mediante la técnica adaptativa a un 75% (1040 datos) del total del muestreo, se tienen un total de 32400 soluciones. Ambas soluciones son obtenidas en el periodo de un mes, sin embargo, estas nos coinciden en un vector de tiempo por lo tanto, es necesario mediante la interpolación cúbica adaptar las 32400 soluciones a un total de 43200 con un vector de tiempo fijo cada minuto de modo que ambas soluciones coincidan en magnitud y tiempo.

Tiempos de ejecución y errores absolutos

Las simulaciones realizadas de la red eléctrica descrita en la sección anterior son ilustradas mediante resultados de tiempo de trabajo computacional y errores absolutos debidos a la interpolación adaptativa empleada.

La tabla 1 muestra el tiempo de trabajo computacional cuando se analiza la red eléctrica para un mes con diferentes pasos de muestreo.

Se puede observar que entre menor es el tiempo de muestreo, mayor es el tiempo requerido para obtener las soluciones de flujos de potencia en series de tiempo.

Casos	Tiempo de trabajo computacional		
	15 min (seg)	5 min (seg)	1 min (seg)
Base	759.6	1982.4	7933.2
Gen Distribuida	787.8	1993.8	8151

Tabla 1 Trabajo computacional por el estudio de flujos de potencia en series de tiempo para diferente pasos de muestreo

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2 muestra los tiempos de trabajo computacional obtenidos cuando se analiza la red con tres diferentes pasos de muestreo y a su vez cada uno ajustados mediante interpolación adaptativa a pasos variables al 75, 50, y 25% del muestreo total.

Casos	Tiempo Trabajo Computacional	
	Caso Base (segundos)	Generación Distribuida
1 minuto (segundos)	75%	5902
	50%	4092
	25%	2235
5 minutos (segundos)	75%	1436
	50%	1035
	25%	604
15 minutos (segundos)	75%	603
	50%	462
	25%	317

Tabla 2 Trabajo computacional por el estudio de flujos de potencia en series de tiempo aplicando método de interpolación adaptativa

Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se muestran los errores absolutos obtenidos de los tres casos de estudio tomando como base el muestreo con datos cada minuto.

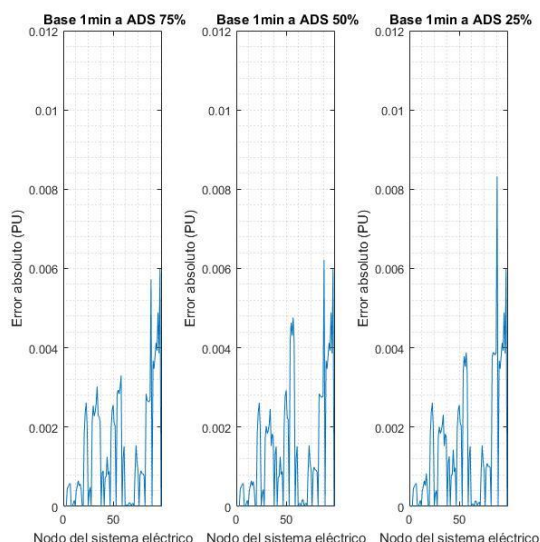


Figura 6 Perfil de voltaje para los tres casos de estudio
Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 se presentan los errores absolutos obtenidos de los tres casos de estudio tomando como base el muestreo con datos cada cinco minutos.

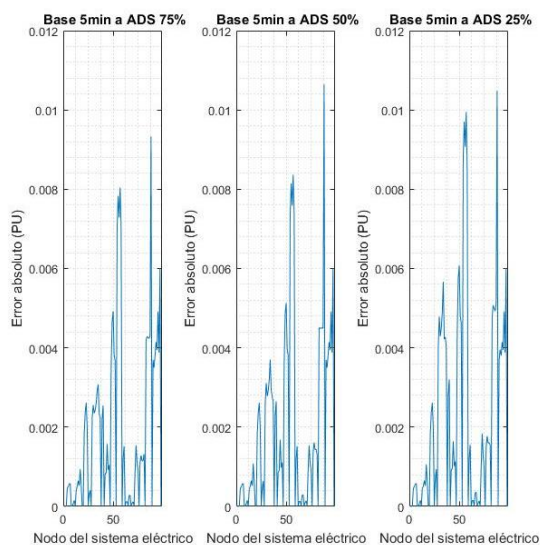


Figura 7 Perfil de voltaje para los tres casos de estudio
Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se muestran los errores absolutos obtenidos de los tres casos de estudio tomando como base el muestreo con datos cada quince minutos.

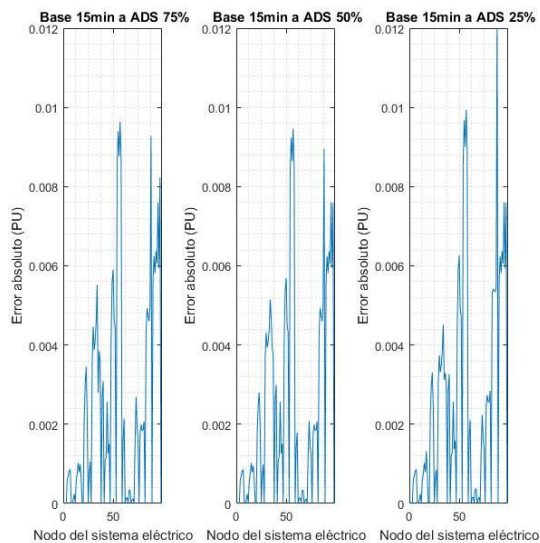


Figura 8 Perfil de voltaje para los tres casos de estudio
Fuente: Elaboración propia

El error absoluto incrementa conforme se reduce el porcentaje de muestreo. De igual manera el error tiende a ser mayor en casos de estudio en el cual el muestreo original tiene una menor cantidad de datos en un periodo de tiempo.

Conclusiones

En este artículo se han presentado simulaciones de flujos de potencia en series de tiempo. El algoritmo de flujos de potencia basado en el método numérico de Newton-Raphson fue extendido para incluir series de tiempo de perfiles de carga y generación de sistemas fotovoltaicos.

El tiempo de trabajo computacional se incrementa cuando un paso de muestreo menor es requerido en el estudio de flujos de potencia en series de tiempo. Realizar ajustes a pasos menores de muestreo a partir de un estudio de flujos de potencia en series de tiempo mediante el empleo de interpolación cúbica, reduce significativamente el tiempo de trabajo computacional y se genera un error absoluto en los voltajes nodales menores a 1×10^{-3} .

Referencias

Adaptive down-sampling (Claudio David López, Basem Idblbi, Thomas Stetz and Martin Braun, 2015)

Apricum analysis, Sener, IEA Key energy statistics 2012.

Aldo De Sabata, Ioan Luminosu, Dan Mărgineanu, Simona Ilie, Dejan Jovanović, Dejan Krstić (2014). Economics of a Small-Scale, Grid-Connected PV System in Western Romania: an LCoE Analysis. IEEE.

Backtrack-Based Variable-Time-Step Solver (Barry Mather, 2017)

Boehme, T., Wallace, A. R., & Harrison, G. P. (2007). Applying time series to power flow analysis in networks with high wind penetration. *IEEE transactions on power systems*, 22(3), 951-957.

Broderick, R. J., Quiroz, J. E., Reno, M. J., Ellis, A., Smith, J., & Dugan, R. (2013). Time series power flow analysis for distribution connected PV generation. *Sandia National Laboratories SAND2013-0537*.

Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., & Karatepe, E. (2013). Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. *Solar Energy*, 91, 337-349.

Forero, N., Hernández, J., & Gordillo, G. (2006). Development of a monitoring system for a PV solar plant. *Energy Conversion and Management*, 47(15), 2329-2336.

<https://enphase.com/en-us> Envoy monitoring system, 2017.

Ley Para El Aprovechamiento De Energías Renovables Y El Financiamiento De La Transición Energética. DOF 12-01-2012. México.

Lorenz, E., Hurka, J., Heinemann, D., & Beyer, H. G. (2009). Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2(1), 2-10.

Monthly Statistics Electricity, IEA, 2017.

Pietruszko, S. M., & Gradzki, M. (2003). Performance of a grid connected small PV system in Poland. *Applied energy*, 74(1), 177-184.

Predetermined time (PT) step solver (Matthew J. Reno, Robert J. Broderick 2017)

Reglamento De La Ley Para El Aprovechamiento De Energías Renovables Y El Financiamiento De La Transición Energética. DOF 30-11-2012. México.

T. Venegas, L. Contreras-Aguilar, J. Arroyo-Ledesma, R. J. Betancourt, E. Guerrero-Solis, F. Torres-Romero. (2016) "Times Series Power Flow Studies in Electric Networks with PV interconnected Systems". Reunión Internacional de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales. RVP-AI/2016-EDU-20. IEEE Sección México.

US law firm Freshfields Bruckhaus Deringer, "What you need to know about Mexico's energy reform" September 2014. USA.

Woyte, A., Van Thong, V., Belmans, R., & Nijs, J. (2006). Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems. *IEEE Transactions on energy conversion*, 21(1), 202-209.

Yona, A., Senjyu, T., Saber, A. Y., Funabashi, T., Sekine, H., & Kim, C. H. (2007, November). Application of neural network to one-day-ahead 24 hours generating power forecasting for photovoltaic system. In *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.