

Noise Amplitude in Ambient PMU Data and its Impact on Load Models Identification

Joffre R. Constante , D. Graciela Colomé , and Diego E. Echeverría 

Abstract—A current trend in load modeling topic is to take advantage of ambient data from Phasor Measurement Units (PMU) to estimate the parameters of load models. In this context, the estimation algorithms or methodologies that are proposed or investigated need to be evaluated in a controlled environment, where, among other things, synthetic PMU measurements obtained from simulations are used. These synthetic measurements require the addition of noise to be like the real ones. The problem found in the literature is the large difference in noise magnitudes used by the authors in their research. These magnitudes in several cases are inconsistent with each other and even seem to be exaggerated. It is for this reason that the present work determines the noise contained in the ambient data reported by PMU. The reliability of the results of this work is based, among other things, on the use of real PMU measurements, located in two different countries, with diverse reporting rates, and located at high, medium, and low voltage. Moreover, this work quantifies the impact that noise has on load modeling with ambient PMU data. In conclusion, the main results of this work are two. The first one covers the noise magnitudes contained in ambient PMU data. The second one demonstrates that noise has a significant and negative impact on load modeling.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/8878>

Index Terms— Ambient PMU Data, Load Modeling, Noise, PMU Noise, PMU, ZIP Load Model.

I. INTRODUCCIÓN

Un correcto modelamiento de la carga (elección de un modelo de carga adecuado + sintonización de sus parámetros para que reproduzca fielmente el comportamiento real de las cargas) es fundamental en el diseño, planificación, operación, control y, en muchos otros estudios y aplicaciones relacionados al correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos [1].

En referencia al modelamiento de la carga, una tendencia

Los autores agradecen al “German Academic Exchange Service (DAAD)”, al Instituto de Energía Eléctrica (IEE), a la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y, al Operador Nacional de Electricidad de Ecuador (CENACE).

J. R. Constante está con la Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador (e-mail: joffre.constante2579@utc.edu.ec).

D. G. Colomé está con el Instituto de Energía Eléctrica UNSJ-CONICET, J5400 San Juan, Argentina (e-mail: gcolome@iee-unsjconicet.org).

D. E. Echeverría es Operador Nacional de Electricidad, Quito, Ecuador (e-mail: decheverria@cenace.gob.ec).

actual es la investigación de técnicas que permitan estimar los valores de los parámetros de los modelos de carga con datos tipo ambiente provenientes de Unidades de Medición Fasorial [2].

Una PMU es un dispositivo que a partir de mediciones calcula y reporta, de forma sincronizada (con una referencia temporal global y precisa), fasores de tensión y corriente, frecuencia y, la velocidad de cambio de la frecuencia (ROCOF). A partir de los fasores precitados se calcula la potencia activa, reactiva y aparente. Una de las ventajas de las PMU es que la tasa de reporte es elevada, entre 10 y 60 reportes por segundo (FPS), lo cual permite monitorear la dinámica de las variables eléctricas [3]. Por otro lado, el término “datos tipo ambiente” se refiere a las mediciones que reporta una PMU cuando el sistema se encuentra en condiciones normales de operación, es decir, cuando no se encuentra sometido a una falla, evento o perturbación mayor. De manera general se suele considerar que los datos tipo ambiente contienen variaciones de tensión de hasta 0.03 por unidad (pu) [4]. En este punto es importante mencionar que la utilización de datos tipo ambiente es una tendencia actual no solamente en el modelamiento de carga, sino en muchos otros estudios y aplicaciones [2]. La razón de ello es que este tipo de datos son los de mayor disponibilidad en un sistema eléctrico. Por ejemplo, si para el modelamiento de carga se utilizan netamente datos tipo ringdown (es decir, de perturbaciones mayores), los modelos estimados son representativos de situaciones puntuales y no de una amplia cantidad de escenarios de operación. Adicional a lo anterior, es con datos tipo ambiente donde es realmente desafiante estimar los modelos de carga [2].

La tendencia actual de investigar técnicas que permitan estimar los parámetros de los modelos de carga con datos tipo ambiente [2] muestra la importancia de evaluar el desempeño de diferentes técnicas de identificación paramétrica. Esta evaluación se debe realizar en ambiente controlado puesto que, de lo contrario (en una red eléctrica real), no se la podría cuantificar con precisión. El término “ambiente controlado” se refiere, entre otras cosas, a que las mediciones de PMU empleadas son sintéticas, es decir, provienen de simulaciones. Para que estas mediciones sintéticas sean semejantes a las obtenidas por una PMU es necesario añadirles ruido blanco Gaussiano [5], [6]. Como se verá a continuación, es justamente en la adición del ruido donde se presentan varios inconvenientes.

Un problema que se ha encontrado en la literatura es que los autores utilizan magnitudes de ruido bastante diferentes para simular mediciones de PMU en sus investigaciones. En [7] se utiliza ruido blanco Gaussiano con media cero y desviación

estándar de 0.01 pu para estimar el ángulo del rotor de un generador. En [8] se utiliza una SNR (signal-to-noise ratio) de 92 dB para detectar eventos de forma temprana. En [9] se utiliza ruido blanco Gaussiano con media cero y desviación estándar de 0.002 pu para los registros de tensión y corriente. En [10] se utiliza ruido aleatorio de 1%. En [11], trabajo que se enfoca en el modelamiento de carga, se utiliza ruido blanco gaussiano con SNR de 30 dB para los registros de tensión, potencia activa y potencia reactiva. Otros autores utilizan ruido blanco Gaussiano con media cero y desviación estándar de 0.005, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1 y hasta 0.15 pu [5].

Con base en el párrafo anterior, los valores de ruido reportados en la literatura son cuestionables por tres motivos. El primero debido a que claramente algunos valores son exagerados; por ejemplo, si se generara ruido Gaussiano con media cero y desviación estándar de 0.01 pu para las señales de tensión, tal como se indica en [7], se obtendría ruido de hasta ± 3 desviaciones estándar, es decir, ± 0.03 pu. Lo anterior es claramente exagerado por varios factores. Uno de ellos por el simple hecho de que las PMU son parte fundamental de la estructura de los sistemas WAMS (*Wide Area Monitoring System*), los cuales se caracterizan, entre muchas otras cosas, por una gran precisión y tasa de reporte. Para confirmar este hecho, en la Fig. 2, de color azul, se presentan mediciones reales de tensión de una PMU. Se observa que el ruido es, por lejos, inferior a ± 0.03 pu. El segundo motivo debido a que no se observa una clara diferencia en la magnitud del ruido utilizada para las señales de tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva. Dado que la potencia activa y reactiva se calculan a partir del voltaje y la corriente, es lógico pensar que el ruido de las dos señales de potencia es una combinación del ruido de las otras dos (voltaje y corriente); por tanto, se esperaría que el ruido sea considerablemente diferente. El tercer motivo se basa en que, al reportar el ruido mediante la desviación estándar en por unidad es necesario contar con las señales en por unidad. Si se parte de mediciones (de una PMU) de tensión, frecuencia y corriente, la tensión y la frecuencia son fácilmente transformadas a por unidad, sin embargo, no hay un valor base único para transformar la corriente a por unidad.

Como solución a lo anterior, en la literatura se han encontrado dos trabajos, [5], [6], que investigan propiamente el ruido en las mediciones de las PMU.

En [6] se concluye que, para la amplitud de las señales de tensión, corriente, potencia activa y potencia reactiva, es adecuado representar el ruido con ruido blanco y con una desviación estándar, en porcentaje, de 0.011, 0.093, 0.09 y 0.44 %, respectivamente. El inconveniente que se encuentra es que los valores de la desviación estándar recomendados en la "TABLE I" de [6] no concuerdan con sus propias figuras ("Figure 5") por un tema de dos ceros. Es por esto por lo que hay incertidumbre acerca de qué valores tomar como ciertos.

Por otro lado, en [5] se caracteriza y cuantifica el ruido de las magnitudes de tensión, corriente y frecuencia, con PMU ubicadas en alta, media y baja tensión. Concluye que el ruido tiene una distribución Gaussiana con media cero, además, recomienda SNR de 45 dB para la tensión, corriente y frecuencia, ya sea en alta, media o baja tensión. Estos resultados son cuestionables, sobre todo al analizar la frecuencia. Una SNR de 45 dB en la frecuencia significa una

desviación estándar de 0.0055 pu, que, para un sistema de 60 Hz, es 0.33 Hz. Si se generara ruido Gaussiano con media cero y desviación estándar de 0.33 Hz, se obtendría ruido de hasta ± 3 desviaciones estándar, es decir, ± 0.99 Hz. Lo anterior, evidentemente, parece ser exagerado.

Para dar solución a la incertidumbre de ¿qué valor de ruido utilizar en el modelamiento de carga con datos tipo ambiente?, por el hecho de que no se pueden adoptar con certeza valores de ruido de la literatura y, puesto que los valores reportados difieren, en varios casos, de la experiencia práctica en PMU con la que cuentan los autores del presente artículo científico, el primer objetivo de este trabajo es investigar y determinar la magnitud del ruido de los datos tipo ambiente que reportan las PMU. Para cumplir con este objetivo se utilizan mediciones reales registradas en los sistemas eléctricos argentino y ecuatoriano, en alta, media y baja tensión. En este punto es importante mencionar que es fundamental establecer la SNR de los registros de: magnitud de tensión, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva, ya que estas señales son las que se utilizan en el modelamiento de carga.

El segundo y último objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto que tiene el ruido de las PMU en el modelamiento de carga con datos tipo ambiente. Este tema es fundamental puesto que varios trabajos de la literatura (enfocados en el modelamiento de carga) evalúan diferentes técnicas de identificación paramétrica con mediciones sintéticas sin ruido o, de plano, no indican si incorporan o no ruido [12], [13], [14]. En este mismo sentido, en [6] se indica que el ruido de una PMU no genera resultados incorrectos en la estimación de modelos de carga con datos tipo ambiente, sin embargo, en [4] se observa todo lo contrario. Con base en lo anterior, es indudable que es necesario conocer con certeza si el ruido afecta al modelamiento de carga, sobre todo con datos tipo ambiente.

Para cumplir con los dos objetivos precitados, este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se realiza toda la investigación necesaria para cuantificar el ruido que contienen los datos tipo ambiente de PMU. Dentro de esta sección se aborda un marco teórico, se propone la metodología a utilizar y, se presentan los resultados. De manera similar, en la sección III se aborda todo lo necesario para determinar el impacto que tiene el ruido en el modelamiento de carga. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones de este trabajo.

II. CUANTIFICACIÓN DEL RUIDO EN DATOS TIPO AMBIENTE PROVENIENTES DE PMU

En esta sección se tiene como objetivo cuantificar el ruido que contienen los datos tipo ambiente reportados por una PMU. La amplitud de este ruido se calcula para las señales de: magnitud de tensión y corriente, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva, que son las que se suelen utilizar en el modelamiento de carga. Para lograr este objetivo se divide esta sección en tres partes. La primera aborda un marco teórico sobre el ruido. La segunda presenta la metodología propuesta y utilizada para estimar el ruido de las PMU. La tercera y última subsección muestra los resultados de aplicar la metodología precitada en los datos provenientes de 13 PMU

instaladas en dos países distintos, con tasas de reporte (FPS) diferentes y, en alta, media y baja tensión.

A. Marco Teórico sobre Ruido

De acuerdo con la teoría de análisis de señales, el error con el que se mide una señal se puede descomponer en dos partes que son: error sistemático y, error accidental o ruido [6]. El error sistemático es un valor que permanece casi constante en el tiempo y no cambia de signo. Por ejemplo, el valor medido es siempre superior, o siempre inferior, al valor real. Por otro lado, el ruido es causado por factores estocásticos y no se puede predecir su signo. Además, un dato importante es que el error sistemático suele tener una magnitud varias veces superior al ruido, al menos en las PMU [6].

Una vez aclarado lo anterior, la manera de cuantificar el ruido de una señal es a través de la relación señal-ruido (SNR – *signal – to – noise ratio*). La SNR se define en la ecuación (1), donde P denota la potencia de una señal y A denota su valor RMS (raíz de la media cuadrática) [15].

$$SNR = \left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right) = \left(\frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right)^2 \quad (1)$$

Dado que $A_{señal}$ suele ser sumamente superior a A_{ruido} , el valor de SNR se suele expresar en decibeles y se calcula con la ecuación (2) [15].

$$SNR_{db} = 10 \times \log_{10}(SNR) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right) \quad (2)$$

Para una señal normalizada con energía unitaria, la ecuación (2) se simplifica a la ecuación (3), donde σ_{ruido} es la desviación estándar del ruido [15].

$$SNR_{db} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma_{ruido}} \right) \quad (3)$$

Es importante que no se confundan los términos potencia y RMS aquí utilizados con la potencia eléctrica y con el valor eficaz (también conocido como RMS) de una señal de corriente alterna.

B. Metodología para Estimar la Magnitud del Ruido

En esta subsección se tiene como objetivo presentar una metodología que permita estimar la magnitud del ruido de los datos reportados por PMU. En base a lo propuesto en [5], pero con algunas diferencias, la metodología empleada en este trabajo se presenta en la Fig. 1 y se describe, paso a paso, a continuación:

- i. Se parte de la disponibilidad de registros de una PMU. Se empieza por uno de ellos, ya sea de la magnitud de tensión, magnitud de corriente, frecuencia, potencia activa o potencia reactiva.
- ii. La duración de la ventana de tiempo es variable. Si la señal contiene un escalón, como, por ejemplo, el mostrado en la Fig. 2, la duración de la ventana de tiempo es de 20 segundos [6]. Por el contrario, si la señal no contiene un escalón, la duración de la ventana de tiempo es de 50 segundos [5]. La metodología para determinar si la señal contiene un escalón se presenta en [5], sin embargo, es necesario complementarla con una inspección visual.
- iii. A la señal elegida en el anterior inciso se le realiza un proceso de detección y eliminación de datos atípicos. La

metodología utilizada se basa en el rango intercuartílico. Se dice que un valor es atípico cuando esta por fuera de 1.5 veces el rango intercuartílico. Es importante complementar esta metodología con una inspección visual ya que, para señales con escalones, la metodología puede detectar erróneamente un valor atípico. A la señal resultante se la designa como $x_{señal}$.

- iv. La $x_{señal}$ se somete a un proceso de filtrado. La técnica elegida es: Savitzky-Golay para datos con escalón y, media móvil para datos sin escalón [5], [6]. Lo importante en este punto es ajustar correctamente el o los parámetros de diseño (de la técnica de filtrado correspondiente) con el fin de obtener la mejor señal filtrada, es decir, retirar la mayor cantidad de ruido sin perder información valiosa o nitidez. El criterio para ajustar el parámetro de diseño se indica en el inciso inmediatamente siguiente al actual. La señal resultante de este paso se la designa como $x_{filtrada}$.
- v. A partir de los dos anteriores pasos se calcula la señal del ruido (x_{ruido}) de la siguiente forma: $x_{ruido} = x_{señal} - x_{filtrada}$. El criterio para ajustar el parámetro de diseño de la técnica de filtrado del anterior paso se basa en que la media del ruido sea prácticamente cero a lo largo del tiempo.
- vi. El último paso consiste en calcular la magnitud del ruido. Esto se realiza con la ecuación (2). Donde:
 - $A_{señal}$ es el valor RMS (raíz de la media cuadrática) de la señal resultante de *ii*, es decir, $A_{señal} = RMS(x_{señal})$.
 - A_{ruido} es el valor RMS de la señal resultante de *iv*, es decir, $A_{ruido} = RMS(x_{ruido})$.



Fig. 1. Metodología para obtener la magnitud del ruido.

C. Resultados

En esta subsección se aplica la metodología planteada anteriormente para determinar la magnitud del ruido de los datos tipo ambiente registrados por PMU instaladas en los sistemas eléctricos argentino y ecuatoriano. En la TABLA I se sintetiza la información importante sobre los datos de las PMU utilizadas. Cada una de las 13 filas indica una PMU instalada en un lugar diferente de un sistema eléctrico. Las cuatro primeras PMU están instaladas en el sistema eléctrico argentino y pertenecen al Proyecto MedPlot BT Argentina

[16]. Las siguientes siete se encuentran en el sistema eléctrico ecuatoriano y pertenecen al Operador Nacional de Electricidad de Ecuador (CENACE). Las dos últimas son de origen confidencial. El nivel de tensión línea – línea en la cual se encuentra instalada cada PMU se presenta en la tercera columna. La velocidad con la que reporta mediciones cada PMU, en fasores por segundo (FPS), en la cuarta columna. Las señales con las que se cuenta en la quinta columna, ya sea tensión (V), frecuencia (f), corriente (I), potencia activa (P) y/o potencia reactiva (Q). Los números junto a cada magnitud indican la cantidad de fases de las cuales se tiene mediciones. 2f significa que se cuenta con mediciones de frecuencia en dos tensiones diferentes. En la última columna se presenta la duración, en minutos, de las mediciones; para las cuatro primeras PMUs se cuenta con registros de 15 minutos continuos, de 24 horas diferentes, es decir, de 360 minutos en total. Las 13 PMU pertenecen a proyectos de medición y de monitoreo, por tal razón, son de tipo M y, valga la aclaración, utilizan transformadores de medición.

TABLA I
DATOS DE LAS PMU UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA AMPLITUD DEL RUIDO

N.º	ORIGEN	TENSIÓN (kV)	FPS	SEÑALES	DURACIÓN (minutos)
1	ARG	0.38	25	3V, f	15 min × 24
2	ARG	0.38	25	3V, f	15 min × 24
3	ARG	0.38	10	3V, f	15 min × 24
4	ARG	0.38	10	3V, f	15 min × 24
5	EC	230	60	3V, f, 3I	20 min
6	EC	230	60	3V, f, 3I	20 min
7	EC	230	60	3V, f, 3I	20 min
8	EC	230	60	3V, f, 3I	20 min
9	EC	230	60	3V, f, 3I	20 min
10	EC	230	60	3V, f, 3I, P, Q	15 min
11	EC	230	60	3V, f, 3I, P, Q	15 min
12	Confidencial	132	60	3V, f, 3I	30 min
13	Confidencial	132 y 500	100	2V, 2f, 3I, 3P, 3Q	15 min

En la

TABLA II se presentan los resultados de aplicar la metodología de estimación de ruido en las distintas ventanas de tiempo de las mediciones disponibles de las trece PMU de la TABLA I. La primera columna de la

TABLA II enumera las PMU en el mismo orden que en la TABLA I. En las siguientes columnas se presenta la mediana y el valor mínimo de la relación señal – ruido (SNR) calculada en las ventanas analizadas y para los registros de magnitud de tensión (V) y corriente (I), frecuencia (f), potencia activa (P) y potencia reactiva (Q). La mediana indica el ruido esperado en una señal medida por una PMU, mientras el valor mínimo indica la magnitud del ruido en el peor de los casos.

De acuerdo con lo observado en la

TABLA II, el peor de los escenarios (el de mayor ruido) corresponde a los SNR de la PMU número trece, sin embargo, estos valores se encuentran alejados de los de las otras doce PMU. Es por esta razón que se recomienda que, cuando sea necesario añadir ruido a las mediciones sintéticas de PMU

(obtenidas por simulación), para datos tipo ambiente, se lo realice con la mediana de los valores de SNR correspondiente a las peores condiciones (Valor Mínimo), es decir:

$$SNR(V, f, I, P, Q) = (73 \ 93 \ 61 \ 65 \ 49) \text{ dB} \quad (4)$$

TABLA II
RUIDO ESTIMADO PARA 13 PMU

N.º	SNR (dB)									
	Valor de la Mediana					Valor Mínimo				
	V	f	I	P	Q	V	f	I	P	Q
1	77	97				73	95			
2	79	99				76	98			
3	77	106				73	104			
4	78	102				73	96			
5	82	98	68			78	93	63		
6	81	97	67			77	92	61		
7	80	96	66			76	91	60		
8	81	98	65			77	92	61		
9	80	95	64			76	90	60		
10	77	104	65	66	49	72	98	62	64	44
11	75	105	64	66	57	65	91	61	65	53
12	73	95	50	89	91	69	93	48	87	87
13	71	96	55	54	47	58	90	44	45	38
Mediana	78	98	65	66	53	73	93	61	65	49

A manera de ejemplo, en la Fig. 2 y Fig. 3 se presentan 10 segundos de mediciones de la magnitud de tensión y potencia reactiva de una de las PMU de la TABLA I. De color azul se observa la señal original medida por la PMU. De color negro la señal filtrada con la metodología presentada en la anterior subsección. De color rojo la señal reconstruida al añadir ruido blanco gaussiano (a la señal filtrada) con una magnitud de SNR de 73 y 49 dB, para la tensión y potencia reactiva, respectivamente. Estas gráficas permiten constatar que los valores de SNR de (4), determinados en este trabajo, corresponden con los observados en las señales.

Para corroborar lo anterior, en la TABLA III se presenta el RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio) entre la señal medida (ej. Línea azul en la Fig. 2) y la señal añadida ruido (ej. Línea roja de la Fig. 2) para las 13 PMU de la TABLA I. Claramente se observa que los valores de RMSE alcanzados son suficientemente pequeños. Esto permite constatar que los valores de ruido encontrados en (4) son adecuados.

Para finalizar, con base en la magnitud de ruido determinada en esta sección, es importante destacar los aspectos más relevantes y que aportan al estado del arte correspondiente:

- A diferencia de lo recomendado por varios trabajos de la literatura, la magnitud del ruido de las señales de tensión, frecuencia, corriente, potencia activa y potencia reactiva, son considerablemente diferentes entre sí. De acuerdo con la experiencia de los autores de este trabajo, esto era algo esperable y hasta cierto punto razonable, pues en el ruido de las señales de potencia activa y reactiva incide el ruido presente tanto en los fasores de tensión como de corriente.
- Las magnitudes de ruido determinadas en este trabajo son, en varias ocasiones, considerablemente menores a las indicadas en la literatura. El caso más evidente es en

la frecuencia, donde el ruido encontrado es significativamente menor. Esto es razonable puesto que, por ejemplo, los sistemas de alivio de carga o los sistemas de protección sistémica no podrían trabajar adecuadamente con magnitudes de ruido tan altas [17] como las recomendadas en algunos trabajos de la bibliografía.

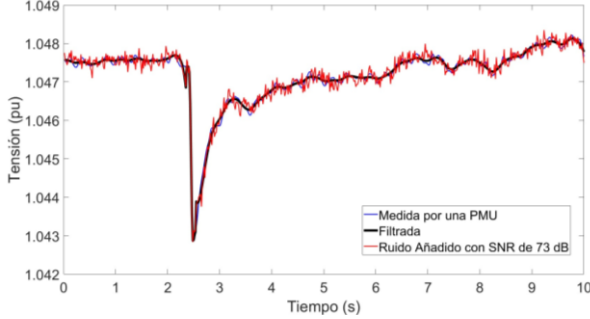


Fig. 2. Ejemplo de la magnitud del ruido de una señal de tensión.

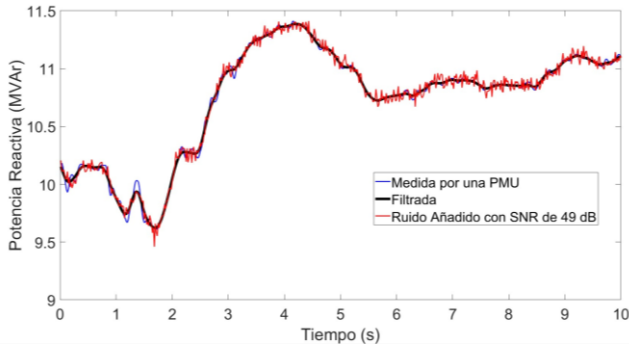


Fig. 3. Ejemplo de la magnitud del ruido de una señal de potencia reactiva.

TABLA III
RMSE ENTRE LA SEÑAL MEDIDA Y LA SEÑAL AÑADIDA RUIDO

N.º	Valor de la Media				
	V	f	I	P	Q
1	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}			
2	9.9×10^{-5}	1.1×10^{-5}			
3	7.9×10^{-5}	4.6×10^{-6}			
4	1.3×10^{-4}	9.0×10^{-6}			
5	7.2×10^{-5}	2.1×10^{-5}	3.3×10^{-4}		
6	7.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}	4.1×10^{-4}		
7	9.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}	4.9×10^{-4}		
8	9.7×10^{-5}	1.7×10^{-5}	5.6×10^{-4}		
9	8.4×10^{-5}	1.5×10^{-5}	5.0×10^{-4}		
10	1.0×10^{-4}	1.7×10^{-6}	6.3×10^{-4}	6.2×10^{-4}	2.6×10^{-3}
11	8.3×10^{-5}	1.8×10^{-6}	6.0×10^{-4}	6.5×10^{-4}	1.2×10^{-3}
12	9.0×10^{-5}	6.7×10^{-6}	4.5×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.4×10^{-4}
13	9.7×10^{-5}	8.1×10^{-6}	4.0×10^{-4}	7.5×10^{-4}	3.9×10^{-3}

III. IMPACTO DEL RUIDO EN EL MODELAMIENTO DE CARGA

En esta sección se tiene como objetivo cuantificar el impacto que tiene el ruido de las señales provenientes de una PMU en la estimación de los parámetros de los modelos de carga, sobre todo con datos tipo ambiente.

Para esto se evalúa, sobre un sistema de prueba, la exactitud alcanzada al estimar los modelos de carga de dicho sistema. La idea es estimar estos modelos al emplear señales sintéticas

de PMU sin ruido y con ruido y, finalmente, comparar los resultados para cuantificar su impacto.

Para lograr el objetivo precitado, esta sección se divide en cuatro partes. La primera aborda un marco teórico sobre el modelo de carga elegido para ser estimado, además de definir el proceso de identificación paramétrica y los indicadores de desempeño. La segunda describe el sistema de prueba. La tercera presenta la metodología que se utiliza para evaluar el impacto del ruido. Finalmente, la cuarta subsección abarca los resultados.

A. Marco Teórico

1) Modelo de Carga ZIP

El modelo de carga que se utiliza en este trabajo para cuantificar el impacto del ruido en el modelamiento de carga es el modelo ZIP (la elección de otro modelo de carga es indiferente). Este modelo es la combinación de tres tipos de cargas: impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P). Las ecuaciones que lo gobiernan son las siguientes [4]:

$$P = P_0 \times \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (5)$$

$$Q = Q_0 \times \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (6)$$

Donde: V_0 es la tensión nominal de la barra; V es la tensión actual de la barra; P es la potencia activa consumida por la carga; P_0 es la potencia activa nominal consumida por la carga a tensión nominal V_0 ; p_1 , p_2 y p_3 son parámetros que definen la proporción de cada componente Z, I o P. Estos parámetros tienen un rango entre cero y uno y deben sumar uno. Igual lógica para (6), donde Q hace referencia a la potencia reactiva.

2) Identificación Paramétrica

La identificación paramétrica es un proceso que permite determinar el valor de los parámetros de los modelos de carga, de tal manera que, al ajustar dichos parámetros, los modelos reproduzcan fielmente el comportamiento real de las cargas [4].

Una forma de realizar este proceso es con mediciones obtenidas por equipos de campo (en este caso PMU). El proceso empieza con la disponibilidad de mediciones de tensión (V_{med}), potencia activa (P_{med}) y reactiva (Q_{med}). V_{med} es V en (5) y (6) [4].

Aplicado al modelo ZIP, el objetivo es determinar los parámetros p_1 , p_2 y p_3 de (5) mediante la minimización de la función objetivo (FO) que se observa en (7), sujeta a las restricciones de igualdad (8) y a los límites superior e inferior (9). P_i y P_{med_i} son vectores $nx1$. P_i de (7) es la potencia P calculada con (5). Notar que en (5) P_0 , p_1 , p_2 , p_3 y V_0 son escalares, mientras que V y P son vectores $nx1$. La potencia reactiva se trata por separado al minimizar una FO similar a (7) y con restricciones análogas a (8) y (9) [4].

$$\min |\sum_{i=1}^n (P_i - P_{med_i})^2| \quad (7)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq p_1 \leq 1 \\ 0 \leq p_2 \leq 1 \\ 0 \leq p_3 \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

Es importante señalar que los valores P_0 y Q_0 de (5) y (6) no son conocidos. Es por esto por lo que también deben ser determinados en el proceso de minimización.

A manera de síntesis, el proceso es minimizar (7) al ajustar cuatro parámetros (P_0 , p_1 , p_2 y p_3) y sujeto a las restricciones (8) y (9). Para Q se sigue un procedimiento análogo [4].

3) Indicadores de Desempeño

Los indicadores de desempeño que se pueden utilizar para evaluar la exactitud con la que se ha estimado un modelo de carga ZIP son los siguientes:

i. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) se encuentra ampliamente definida en la literatura y se calcula como sigue:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{med_i})^2}{n}} \quad (10)$$

ii. Error en la Estimación de Parámetros (EEP)

El EEP es un indicador que cuantifica el error alcanzado al estimar los parámetros p_1 , p_2 , p_3 o q_1 , q_2 , q_3 de (5) o (6). Se calcula como sigue:

$$EEP = media \left(\frac{|p_{estimados} - p_{reales}|}{|ub - lb|} \right) \times 100 \quad (11)$$

Donde:

- p_{reales} y $p_{estimados}$ son vectores 1×3 que contienen los parámetros reales y estimados del modelo ZIP.
- ub y lb son los límites superiores (ub) e inferiores (lb) que restringen el rango de búsqueda durante la minimización de la función objetivo. En este caso, para el modelo ZIP, $|ub - lb| = [1 \quad 1 \quad 1]$.

Antes de finalizar, es importante mencionar que el indicador EEP no se puede calcular en la práctica cuando se procesan mediciones reales ya que no se conocen los parámetros verdaderos de un modelo de carga. A pesar de lo anterior, este indicador es útil para cuantificar la exactitud alcanzada al estimar modelos de carga en ambiente controlado, es decir, con sistemas de prueba y simulaciones.

B. Sistema de Prueba

El sistema de prueba elegido y utilizado es el sistema IEEE de 39 barras. Este consta de 19 cargas cuyos modelos han sido modificados a tipo ZIP. Al modelo ZIP de cada una de las 19 cargas se le generan parámetros (p_1 , p_2 , p_3 y q_1 , q_2 , q_3) aleatorios para 11 mil escenarios de operación. Los parámetros aleatorios se generan respetando los rangos recomendados en la bibliografía [18], [19].

Los 11 mil escenarios de operación se construyen con varias curvas de demanda, se toma un valor aleatorio de una cierta hora, se agrega o reduce un consumo incierto de magnitud aleatoria (puesto que la demanda de energía es algo diferente cada día a la misma hora), se ejecuta un flujo óptimo de potencia y, se obtiene el despacho de cada generador. Además, a cada uno de estos escenarios se asocia un evento aleatorio del tipo: salida de un generador, cortocircuito, variación de carga o cambio del TAP de un transformador. La magnitud de los eventos de carga es aleatoria, al igual que: la posición en la cual se produce el cortocircuito en las líneas de transmisión,

el generador o el transformador elegido y, la cantidad de TAPs que se varían en un transformador [4].

Con base en lo anterior se realizan simulaciones dinámicas RMS (análisis de transitorios electromecánicos) de 10 segundos de duración en el programa PowerFactory de DigSilent. En promedio, 60% de los escenarios generan datos tipo ambiente y 40% tipo ringdown. En el presente trabajo se utilizan solamente los datos tipo ambiente, es decir, los escenarios que generan variaciones de tensión (dV) menores o iguales a 0.03 pu [4]. La magnitud de tensión, la potencia activa y la potencia reactiva, de cada una de las 19 cargas, son almacenadas para ser utilizadas como mediciones de PMU. La tasa de reporte es de 60 FPS. A las mediciones precitadas se les agrega ruido para simular el comportamiento real de una PMU con los valores de (4) determinados en este trabajo.

C. Metodología para Evaluar el Impacto del Ruido

En esta subsección se tiene como objetivo plantear una metodología que permita determinar si el ruido de las PMU tiene un impacto negativo en el modelamiento de carga con datos tipo ambiente.

Para lograr este objetivo se estiman los parámetros de las cargas tipo ZIP del sistema de prueba al utilizar señales sintéticas con y sin ruido. La comparación de la exactitud alcanzada al emplear estos dos grupos de señales (con y sin ruido) permite determinar si el ruido tiene o no un impacto significativo.

La metodología consiste en seguir el proceso de identificación paramétrica presentado en el marco teórico, apartado III. A.2), sin embargo, se ha elegido utilizar de forma independiente dos técnicas de optimización para minimizar la función objetivo (7). La idea de usar dos técnicas es para que los resultados alcanzados sean confiables y no se vean afectados por el desempeño y/o la convergencia de utilizar una sola. Las técnicas de optimización elegidas son “Levenberg-marquardt” e “Interior-point”, de acuerdo con lo utilizado y recomendado en la literatura [4]. Técnicas de optimización heurísticas no se utilizan puesto que en [4] se demuestra que su desempeño es inferior a las técnicas convencionales (en esta aplicación).

Finalmente, la comparación de los resultados al emplear señales con y sin ruido se realiza mediante el indicador EEP definido en (11). El indicador RMSE no se presenta por dos razones. La primera debido a que los valores alcanzados, para variaciones de tensión pequeñas, son representativas en mayor proporción del ruido de las señales y no de la convergencia de las técnicas de optimización. La segunda razón se debe a que un RMSE pequeño no es siempre equivalente a alcanzar un bajo EEP, es decir, no asegura que se ha estimado adecuadamente los parámetros del modelo de carga ZIP [4].

D. Resultados

En este apartado se presentan los resultados de estimar, con la metodología detallada en el apartado inmediatamente anterior (C), los parámetros del modelo ZIP, en todos los escenarios del sistema de prueba y, en las 19 cargas que conforman el mismo.

En la Fig. 4 y Fig. 5 se muestra la mediana del indicador EEP por magnitud de variación de tensión (eje horizontal), para los dos métodos de optimización (“Levenberg-

marquardt” e “Interior-point”) y, para señales con y sin ruido. Es importante mencionar que se presenta la mediana del *EEP* puesto que este indicador se calcula para todos los escenarios de operación y para las 19 cargas que conforman el sistema de prueba. La Fig. 4 corresponde a los resultados de estimar el modelo ZIP de potencia activa, mientras la Fig. 5 al modelo de potencia reactiva.

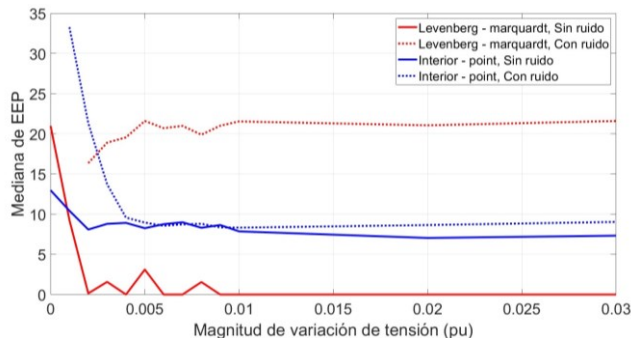


Fig. 4. EEP por magnitud de variación de tensión – modelo ZIP de Potencia Activa.

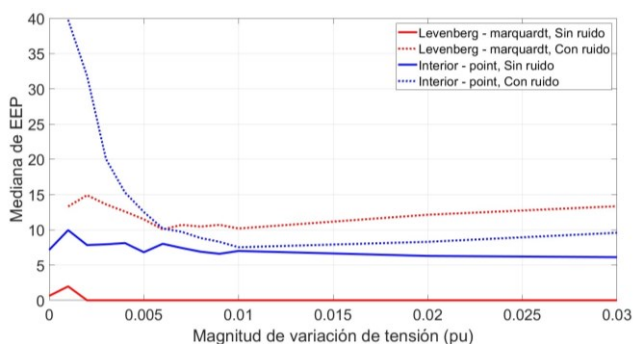


Fig. 5. EEP por magnitud de variación de tensión – modelo ZIP de Potencia Reactiva.

Al observar las Figs. 4 y 5 se concluye que el ruido tiene un impacto significativo en el modelamiento de carga, tanto para el modelo de potencia activa, como para el de potencia reactiva. Dado que los datos tipo ambiente contienen en su gran mayoría variaciones de tensión inferiores a 0.01 pu, en la TABLA IV se presenta el porcentaje de escenarios que alcanzan EEP menores a 10 para variaciones de tensión inferiores a 0.01 pu. Al observar los valores de la TABLA IV se ratifica el impacto significativo y negativo que tiene el ruido en la estimación de parámetros de modelos de carga.

TABLA IV
PORCENTAJE DE ESCENARIOS CON EEP MENOR A 10 PARA VARIACIONES DE TENSIÓN MENORES A 1%

	ZIP POTENCIA ACTIVA		ZIP POTENCIA REACTIVA	
	Sin Ruido	Con Ruido	Sin Ruido	Con Ruido
Levenberg-marquardt	46%	20%	60%	31%
Interior - Point	55%	45%	60%	37%

Además de lo anterior, en las Fig. 4 y 5 se observa que el desempeño del método “Levenberg-marquardt”, con señales sin ruido, es ideal, con un error muy cercano a cero. Por el contrario, al añadir ruido, su desempeño cae drásticamente a

tal forma que no es recomendable su utilización. Dado que en la práctica las señales tienen ruido, por más que se las filtre, no se aconseja su uso. Un análisis exhaustivo del desempeño de una gran variedad de técnicas de optimización (en la estimación paramétrica del modelo ZIP) se encuentra en [4].

Por otro lado, también es importante observar que el ruido causa que sea prácticamente imposible estimar modelos de carga con variaciones de tensión muy pequeñas. Esto es algo lógico y que afirma la importancia de tomar en cuenta el factor ruido.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han abordado dos temas de interés. El primero es la cuantificación del ruido que tienen los datos tipo ambiente provenientes de PMU. Este es un aporte a la literatura por varias razones. Una de ellas es debido a que no se pueden tomar con certeza los valores de ruido recomendados en la literatura ya que son muy variados y, en muchas ocasiones, hasta cuestionables. Otra razón es porque, con base en estos resultados, nuevas y más precisas investigaciones se pueden desarrollar. En este punto es importante destacar que actualmente se realizan diversas y numerosas investigaciones que intentan aprovechar los datos tipo ambiente de las PMU. Una de ellas es, justamente, el modelamiento de carga. Otras son, por ejemplo, aplicaciones WAMPAC (Wide Area Monitoring Protection and Control), tesis doctorales de evaluación en tiempo real de la estabilidad, etc. Por otro lado, pero dentro de este mismo tema, y a diferencia de lo sugerido en varios trabajos de la literatura, aquí se ha determinado y demostrado que la magnitud del ruido es significativamente diferente para las señales de magnitud de tensión y corriente, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva. De igual manera, este es un aporte al estado del arte. Antes de finalizar con este tema, es importante mencionar que las ventajas del presente trabajo van en el sentido de que se han procesado mediciones reales de PMU, situadas en dos diferentes países, con tasas de reporte diferentes y, ubicadas en alta, media y baja tensión. Es por esta razón por la cual se puede tener mayor confianza en los resultados.

Por otro lado, el segundo tema que se ha abordado en este trabajo es la determinación del impacto que tiene el ruido en la estimación de modelos de carga. A diferencia de lo indicado en algunas investigaciones de la literatura, en este trabajo se demuestra que el ruido sí tiene un impacto significativo y negativo en el modelamiento de carga. En tal sentido, se aconseja firmemente que las investigaciones que se realicen referentes al modelamiento de carga tomen en cuenta el factor ruido.

REFERENCIAS

- [1] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, and D. Zhao, “Load modeling - A review,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5986–5999, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2700436.
- [2] J. R. Constante and G. Colomé, “Estado del Arte y Tendencias en el Modelamiento de Carga,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 18, no. 2, pp. 1–12, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.475.
- [3] “IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems,” *IEEE Std C37.118.1-2011*, no. December. pp. 1–61,

2011. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219.
- [4] J. R. Constante and D. G. Colome, "Estimación Paramétrica del Modelo de Carga ZIP basada en Técnicas de Optimización y en Mediciones de PMU," *2022 IEEE Bienn. Congr. Argentina (ARGENCON), San Juan, Argentina*, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9940010.
- [5] M. Brown, M. Biswal, S. Brahma, S. J. Ranade, and H. Cao, "Characterizing and quantifying noise in PMU data," *2016 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2016, no. 2019–07, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741972.
- [6] X. Zhang, C. Lu, J. Lin, and Y. Wang, "Experimental measurement of PMU error distribution and its impact on load model identification," *2016 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. (PESGM), Boston, MA*, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741069.
- [7] P. Tripathy, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "A divide-by-difference-filter based algorithm for estimation of generator rotor angle utilizing synchrophasor measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 6, pp. 1562–1570, 2010, doi: 10.1109/TIM.2009.2026617.
- [8] L. Xie, Y. Chen, and P. R. Kumar, "Dimensionality reduction of synchrophasor data for early event detection: Linearized analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2784–2794, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2316476.
- [9] D. Shi, D. J. Tylavsky, and N. Logic, "An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1575–1583, 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2207468.
- [10] J. Zhang, G. Welch, G. Bishop, and Z. Huang, "A two-stage kalman filter approach for robust and Real-Time power system State Estimation," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 629–636, 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2280246.
- [11] E. O. Kontis, T. A. Papadopoulos, A. I. Chrysochos, and G. K. Papagiannis, "Measurement-Based dynamic load modeling using the vector fitting technique," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 338–351, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2697004.
- [12] H. Ren, N. N. Schulz, V. Krishnan, and Y. Zhang, "Online Static Load Model Estimation in Distribution Systems," *2019 IEEE 28th Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE), Vancouver, BC, Canada*, pp. 153–158, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781530.
- [13] K. Fungyai, N. Sangmeg, A. Pichetjamroen, S. Dechanupaprittha, and N. Somakettarin, "Determination of ZIP Load Model Parameters based on Synchrophasor Data by Genetic Algorithm," *2020 8th Int. Electr. Eng. Congr. (iEECON), Chiang Mai, Thail.*, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1109/iEECON48109.2020.229509.
- [14] H. A. A. Shafiei, Mehdi; Nourbakhsh, Ghavameddin; Ledwich, Gerard; Fernando, Tyrone; Iu, "Dynamic Load Modelling Using Measured Data in Distribution Networks," *3rd Int. Conf. Power Gener. Syst. Renew. Energy Technol.*, pp. 3–6, 2017, doi: 10.1109/PGSRET.2017.8251791.
- [15] J. Price and T. Goble, "Signals and noise," in *Telecommunications Engineer's Reference Book*, Butterworth-Heinemann, 1993, pp. 10-1-10–15. doi: 10.1016/B978-0-7506-1162-6.50016-2.
- [16] D. G. Colomé *et al.*, "Proyecto MEDFASEE BT Argentina. Observatorio del comportamiento dinámico del sistema argentino de interconexión," *I Jorn. Comun. Investig. y Extensión la Fac. Ing. la UNSJ, San Juan, Argentina*, no. May, 2021.
- [17] N. Granda and V. Jácome, "Esquema Automático de Alivio de Carga para Sistemas Eléctricos que sirven a Plataformas Petroleras," *Rev. Técnica "energía"*, vol. 19, no. 2, pp. 58–68,

2023, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.557.

- [18] J. V. Milanović *et al.*, "Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks," vol. February, 2014.
- [19] J. V. Milanović, K. Yamashita, S. Martínez Villanueva, S. Ž. Djokić, and L. M. Korunović, "International industry practice on power system load modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3038–3046, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2231969.



Joffre R. Constante is Electrical Engineering from Universidad Politécnica Salesiana (2013), Master in Energy Efficiency from Escuela Politécnica Nacional (2016), and PhD candidate in Electrical Engineering from Universidad Nacional de San Juan - Argentina. He has professional experience as: i) Technical Analyst at Instituto de Investigación

Geológico y Energético (IIGE); ii) Technical Analyst of tariffs at Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNR), and iii) Technical Research Assistant at Operador Nacional de Electricidad from Ecuador (CENACE). He currently works as professor at Universidad Tecnica de Cotopaxi in the field of Electrical Power Systems.



D. Graciela Colomé is PhD in Electrical Engineering, graduated in 2009, from the Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina. Professor and consultant at the Institute of Electric Energy (IEE), UNSJ – CONICET. Coordinator of the Electrical Engineering career (2011–2018) and director of the Graduate Studies Department of the School of Engineering (2016–2021). She is currently director of research and technology transfer projects. Her main fields of research are: modeling, simulation, supervision, stability, and control of electrical power systems.



Diego Echeverría received his degree in Electrical Engineering from Escuela Politécnica Nacional from Quito, in 2006. In 2021, he obtained his PhD degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de San Juan - Argentina. He currently works at the Operador Nacional de Electricidad from Ecuador (CENACE) and holds the position of National Manager of Technical Development. Additionally,

he is a part-time Professor of the Master's Degree in Electricity at the Universidad Técnica de Copotaxi, and at the Pontificia Universidad Católica from Ecuador, Esmeraldas. His areas of interest are: Real Time Power System Stability, PMU's Synchrophasor Measurement Systems, Power System Reliability and Power System Emergency Control.