



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
Y APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TASA DE REPORTE FRAMES  
POR SEGUNDO (FPS) DE MEDICIONES SINCRUFASORIALES EN LA  
PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE  
CARGA POLINOMIAL (ZIP)**

**INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

**AUTORES:  
Ariel León Chiluisa Ochoa  
Joel Sebastián Carasayo Vega**

**TUTOR:  
Ing. Iván Quinatoa Caiza, Mg**

LATACUNGA, MARZO 2026

Latacunga, Marzo 2026

### DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Carasayo Vega Joel Sebastián** y **Chiluisa Ochoa Ariel León**, declaramos ser los autores del proyecto de titulación **"EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TASA DE REPORTE FRAMES POR SEGUNDO (FPS) DE MEDICIONES SINCRÓFASORIALES EN LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP)"**, siendo el Ing. Mgtr. **Quinatoa Caiza Carlos Iván**, tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



Carasayo Vega Joel Sebastián

C.C. 055047680-8



Chiluisa Ochoa Ariel León

C.C. 055061954-8

Latacunga, marzo del 2026

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TASA DE REPORTE FRAMES POR SEGUNDO (FPS) DE MEDICIONES SINCRUFASORIALES EN LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP).”**, propuesto por los estudiantes **Carasayo Vega Joel Sebastián** y **Chiluisa Ochoa Ariel León**, de la carrera de Electricidad, considero que dicho proyecto de investigación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Carlos Iván Quinatoa Caiza, M.S.c

C.C. 050328786-4

TUTOR

Latacunga, marzo del 2026

### **AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas ; por cuanto, los postulantes: Carasayo Vega Joel Sebastián; Chiluisa Ochoa Ariel León ,con el título del Proyecto de Investigación **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TASA DE REPORTE FRAMES POR SEGUNDO (FPS) DE MEDICIONES SINCROFASORIALES EN LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP)”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Para constancia firman:



LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. M.Sc. Freire Armando Salvador

C.C:0503842833



LECTOR 2

Ing. M.Sc. Proaño Xavier Alfonso

C.C:0502656424



LECTOR 3

Lic. M.Sc. Estupiñán Diego Enrique

C.C:0501656508

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco profundamente a Dios por el don de la vida, por cuidarme y guiar cada uno de mis pasos hasta permitirme alcanzar este momento tan importante en mi vida.*

*Expreso también mi más sincero agradecimiento a mis padres, Milton y Gabriel, por su amor, apoyo incondicional y sacrificio en cada etapa de mi formación. Gracias a ustedes hoy logro culminar mi carrera universitaria; todo lo que soy y lo que he alcanzado se lo debo a ustedes.*

*Extiendo mi gratitud a mis hermanos, compañeros de vida, quienes siempre han estado a mi lado brindándome su apoyo, compartiendo alegrías, desafíos y acompañándome a lo largo de este camino.*

*A toda mi familia, por su constante motivación para llegar a culminar mis estudios. Sus palabras de aliento, sus consejos y su guía han sido fundamentales para poder llegar a cumplir esta meta.*

*Finalmente, agradezco a la Gloriosa Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, así como a sus excelentes docentes, quienes con su conocimiento, dedicación y compromiso contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal.*

**Joel S. Carasayo.V**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este logro a mis padres, quienes a pesar de las adversidades y de las múltiples veces en las que me he equivocado, nunca me dieron la espalda y siempre continuaron apoyándome.*

*Hoy logro convertirme en un profesional, pero antes de eso ustedes me enseñaron algo aún más valioso: a ser una mejor persona y alguien útil para servir a la sociedad. Su amor, paciencia y dedicación han sido fundamentales en cada paso de mi vida.*

*Han desempeñado su labor como padres de una manera admirable, y estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Sin ustedes nada de esto habría sido posible.*

*Los amo infinitamente.*

**Joel S. Carasayo.V**

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis padres, Fausto y Gladys, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante que han sido la base sobre la cual he podido construir este logro. Cada paso en este camino académico ha estado acompañado de su esfuerzo, de su ejemplo de perseverancia y de su fé en mí. Este triunfo es tan suyo como mío, porque sin su apoyo incondicional y su amor infinito, nada de esto habría sido posible.*

**Ariel L. Chiluisa O.**

## **DEDICATORIA**

*Agradezco profundamente a Dios, por concederme la vida, la gracia y sabiduría para enfrentar cada reto, por darme lo que tengo, por ser quien soy y por estar donde estoy en estos momentos.*

*Agradezco con gratitud a mis padres, por su apoyo constante, su paciencia infinita y por creer en mí día tras día. Este logro refleja no solo mi esfuerzo, sino también el suyo, pues detrás de cada paso que he dado se encuentran sus sacrificios y su amor incondicional, pues han sido mi ejemplo de vida, mi inspiración y mi mayor motivación para seguir adelante.*

*A mis hermanos, por sus palabras de aliento, motivación y el cariño que han puesto en mí recordándome que no estaba solo en este camino.*

*A mis docentes, por compartir sus conocimientos y sembrar en mí el valor del aprendizaje.*

*Y a mis amigos, por estar presente en el transcurso de este logro, compartiendo risas y dificultades, y brindándome ánimo durante este proceso.*

***Ariel L. Chiluisa O.***

## ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3.	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	4
2.3.1.	Objeto de Investigación .....	4
2.3.2.	Campo de Acción.....	4
2.4.	BENEFICIARIOS.....	4
2.4.1.	Directo.....	4
2.4.2.	Indirecto .....	4
2.5.	JUSTIFICACIÓN .....	4
2.6.	OBJETIVOS .....	6
2.6.1.	General.....	6
2.6.2.	Específicos .....	6
2.7.	SISTEMAS DE TAREAS.....	7
3.	MARCO TEÓRICO .....	9
3.1.	SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA (WAMS).....	9
3.1.1.	Unidades de Medición Fasorial (PMU).....	12
3.1.2.	Definición de Fasor.....	13
3.1.3.	Definición de Sincrofasor .....	14
3.1.4.	Cálculo de Errores.....	15
3.1.5.	Frecuencia y Tasa de Cambio de la Frecuencia (ROCOF) .....	16
3.1.6.	Tasa de Reporte.....	17
3.2.	MODELAMIENTO DE CARGA.....	17
3.3.	MODELOS DE CARGA.....	18
3.3.1.	Modelos Estáticos .....	18
3.3.2.	Modelos Dinámicos .....	18
3.3.3.	Modelos Compuestos.....	19
3.4.	IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA .....	21
3.4.1.	Definición de Identificación Paramétrica .....	21
3.4.2.	Métodos de identificación paramétrica aplicables.....	21
3.4.3.	En base a componentes .....	21
3.4.4.	En base a mediciones.....	22
3.4.5.	Identificación paramétrica del modelo de carga ZIP .....	23

3.5.	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.....	23
4.	HIPÓTESIS .....	26
5.	METODOLOGÍA.....	26
5.1.	REGISTROS SINTÉTICOS .....	27
5.2.	PREPROCESAMIENTO.....	28
5.3.	ADICIÓN DE RUIDO Y ETAPA DE FILTRADO .....	30
5.4.	METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA ZIP .....	30
5.4.1.	Modelo de Carga ZIP .....	31
5.4.2.	Planteamiento del Problema de Identificación Paramétrica del Modelo de Carga ZIP	31
5.4.3.	Indicadores de desempeño .....	32
5.4.4.	Proceso Integral de Identificación Paramétrica del Modelo de Carga ZIP.....	33
5.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	35
6.	DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	35
6.1.	GENERACIÓN DE REGISTROS SINCRÓFASORIALES SINTÉTICOS.....	35
6.2.	PREPROCESAMIENTO.....	39
6.3.	ADICIÓN DE RUIDO Y ETAPA DE FILTRADO .....	41
6.4.	IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA .....	43
6.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	44
6.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	49
7.	CONCLUSIONES.....	50
8.	REFERENCIAS .....	51
9.	ANEXO 1 – SCRIPT DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA IMPLEMENTADO EN MATLAB.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ejemplo de apagón (black-out) en el sistema WSCC. a) Mediciones reales. b) Simulación con caso base. c) Simulación con modelos validados. ....	5
<b>Figura 2.</b> Diagrama estructural de un WAMS. ....	10
<b>Figura 3.</b> Arquitectura WAMS centralizada. ....	10
<b>Figura 4.</b> Arquitectura WAMS descentralizada. ....	11
<b>Figura 5.</b> Arquitectura WAMS distribuida. ....	12
<b>Figura 6.</b> Definición de un Fasor (a) Función sinusoidal (b) Representación Fasorial. ....	14
<b>Figura 7.</b> Relación del ángulo de fase y el tiempo UTC. ....	15
<b>Figura 8.</b> Diferencia entre el Fasor medido y el teórico. ....	16
<b>Figura 9.</b> Modelo compuesto de carga. ....	19
<b>Figura 10.</b> Clasificación de modelos de carga. ....	20
<b>Figura 11.</b> Identificación paramétrica basada en componentes. ....	22
<b>Figura 12.</b> Diagrama de flujo del proceso de investigación para la determinación del impacto de los FPS en la precisión de la identificación paramétrica del modelo de carga ZIP. ....	27
<b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo del algoritmo de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP. ....	34
<b>Figura 14.</b> Sistema IEEE de 39 barras para el análisis de flujos de potencia. ....	36
<b>Figura 15.</b> Configuración de parámetros para el modelo de carga ZIP. ....	37
<b>Figura 16.</b> Script de programación DPL para generación de registros sintéticos. ....	38
<b>Figura 17.</b> Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras. ....	39
<b>Figura 18.</b> Cantidad de registros clasificados por magnitud de variación de tensión – datos tipo ambiente. ....	41
<b>Figura 19.</b> Cantidad de registros clasificados por magnitud de variación de tensión – datos tipo RingDown. ....	41
<b>Figura 20.</b> Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras, añadida ruido. ....	42
<b>Figura 21.</b> Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras, añadida ruido, bajo un evento de gran magnitud. ....	43
<b>Figura 22.</b> Ejemplo de resultados del proceso de identificación paramétrica. ....	44
<b>Figura 23.</b> EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros sin ruidos. ....	46
<b>Figura 24.</b> EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia activa y utilizando registros con ruidos. ....	47
<b>Figura 25.</b> EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros con ruidos. ....	47
<b>Figura 26.</b> EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia activa y utilizando registros filtrados. ....	48
<b>Figura 27.</b> EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros filtrados. ....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Sistema de tareas. ....	7
<b>Tabla 2.</b> Tasas de reporte requeridos en PMU. Fuente: [21]. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Revisión bibliográfica sobre técnicas de filtrado en el modelamiento de carga .....	25
<b>Tabla 4.</b> Ejemplo de archivo plano almacenado para un escenario de operación.....	39
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje de escenarios en los que se alcanza una solución viable – potencia activa. ....	44
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje de escenarios en los que se alcanza una solución viable – potencia reactiva.....	44

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TASA DE REPORTE FRAMES POR SEGUNDO (FPS) DE MEDICIONES SINCRÓFASORIALES EN LA PRECISIÓN DE LA ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA POLINOMIAL (ZIP).”

**Autores**

Carasayo Vega Joel Sebastián  
Chiluisa Ochoa Ariel León

### RESUMEN

La validación de modelos en los sistemas eléctricos de potencia constituye hoy en día un aspecto fundamental, dado que la planificación y la operación de los sistemas eléctricos dependen de simulaciones cada vez más precisas. Entre los elementos que requieren validación, las cargas son las más desafiantes, debido a que los modelos que describen su comportamiento y los parámetros asociados a estos modelos varían de forma continua en el tiempo. Uno de los modelos de carga más utilizados en la industria mundial y en la literatura es el modelo estático ZIP, el cual combina tres tipos de comportamientos: impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P). En la actualidad, la estimación de los parámetros de este modelo se realiza aprovechando las mediciones sincrofásoriales proporcionadas por Unidades de Medición Fasorial (PMU), las cuales ofrecen altas tasas de reporte, de hasta 100 o 120 registros por segundo (FPS, frames per second), dependiendo de la frecuencia nominal de la red. En este contexto, la presente tesis investiga el impacto que tiene la tasa de reporte (FPS, frames per second) de las PMU sobre la precisión alcanzada en los procesos de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP. Los resultados obtenidos demuestran que los FPS influyen de manera significativa en la precisión de la estimación: a mayor FPS, mayor precisión, y viceversa. Además, se evidencia que este efecto es aún más determinante cuando se emplean datos tipo ambiente de PMU, es decir, registros con variaciones de tensión de pequeña magnitud. Este tipo de datos es el más común en la operación real de un sistema eléctrico, dado que los eventos de gran severidad, como fallas o perturbaciones mayores, ocurren con poca frecuencia.

**Palabras clave:** FPS, Modelamiento de Carga, Identificación Paramétrica, PMU, ZIP.

# TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

## FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TÍTULO:** "EVALUATION OF THE IMPACT OF THE REPORTING RATE IN FRAMES PER SECOND (FPS) OF SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS ON THE ACCURACY OF THE PARAMETRIC ESTIMATION OF THE POLYNOMIAL LOAD MODEL (ZIP)."

**Author:**

Carasayo Vega Joel Sebastián

Chiluisa Ochoa Ariel León

### ABSTRACT

The validation of models in electric power systems has become nowadays a fundamental and essential aspect, since both the planning and the operation of electrical systems depend on simulations that are increasingly more precise and reliable. Among the different elements that require validation, electrical loads are the most challenging, because the models that describe their behavior, as well as the parameters associated with these models, change and vary continuously over time. One of the most widely used load models in the global industry and in scientific literature is the static ZIP model, which combines three types of behaviors: constant impedance (Z), constant current (I), and constant power (P). At present, the estimation of the parameters of this model is carried out by taking advantage of synchrophasor measurements provided by Phasor Measurement Units (PMU), which offer high reporting rates, reaching up to 100 or even 120 records per second (FPS, frames per second), depending on the nominal frequency of the electrical network. In this context, the present thesis investigates the impact that the reporting rate (FPS, frames per second) of the PMUs has on the accuracy achieved in the parameter identification processes of the ZIP load model. The results obtained demonstrate that the FPS significantly influences the accuracy of the estimation: the higher the FPS, the greater the accuracy, and vice versa. Furthermore, it is evident that this effect is even more decisive when ambient-type PMU data are used, that is, records with voltage variations of small magnitude. This type of data is the most common in the real operation of an electric power system, since high-severity events, such as faults or major disturbances, occur only rarely and with low frequency.

**Keywords:** FPS, Load Modeling, Parameter Identification, PMU, ZIP

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** Evaluación del impacto de la tasa de reporte Frames por segundo (FPS) de mediciones sincrofasoriales en la precisión de la estimación paramétrica del modelo de carga polinomial (ZIP).

### Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

**Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:** N/A.

### Equipo de trabajo del Trabajo de Titulación:

- **Estudiantes:**

Ariel León Chiluisa Ochoa

Joel Sebastián Carasayo Vega

- **Tutor:**

Ing. Iván Quinatoa Caiza, Mg

**Área de Conocimiento:** 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sub líneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

## 2. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de los SEP, es fundamental contar con modelos validados de los distintos componentes que conforman la red, pues esto permite alcanzar resultados confiables en las simulaciones y estudios que se realizan a los SEP para brindar un servicio eléctrico confiable y de calidad [1].

Uno de los elementos más complejos de modelar en los SEP es la carga, pues no solamente varía su demanda constantemente en el tiempo, sino que también el tipo de modelo (el modelo que representa a una carga en un nodo puede ser distinto en diferentes horas del día) y los parámetros de este modelo [2], [3].

De manera general, los modelos de carga se diferencian en estáticos y dinámicos. Los primeros representan o aproximan el comportamiento estático de las cargas (ejemplo de una carga estática es un calefactor a resistencia), mientras los segundos representan el comportamiento dinámico de las cargas (Los motores de inducción de los aires acondicionados son un claro ejemplo de componentes dinámicos) [4].

A nivel mundial, en la industria energética y en la literatura, uno de los modelos de carga más utilizado es el ZIP [5], el cual es un modelo estático que combina tres tipos de comportamientos de la carga: impedancia, corriente y potencia constante [6].

Por otro lado, en lo que respecta a la temática de validación de modelos, la metodología más empleada en la actualidad consiste en aprovechar el gran despliegue de tecnologías de medición de alta resolución temporal para comparar el comportamiento observado con el simulado y, de ser necesario, ajustar los parámetros de los modelos [1].

Aplicado al modelamiento de carga, una tendencia actual consiste en estimar automática y continuamente en el tiempo los coeficientes de los modelos de carga al aprovechar los datos sincrofasoriales emitidos por as diferentes Unidades de Medición Fasorial (PMU), las cuales a su vez conforman los sistemas WAMS (Wide Area Measurement System) [7].

En cuanto a las PMU, sus principales características son la capacidad de reportar hasta 60 o 50 registros por segundo (FPS, frames per second), donde cada registro contiene fasores de corriente y voltaje (por fase), frecuencia y ROCOF (tasa de variación de la frecuencia, en

inglés, (Rate of Change of Frequency). A partir de los fasores de tensión y corriente se calcula la potencia activa, reactiva y aparente [8], [9].

La tasa de reporte (FPS, frames per second) de una PMU puede ser configurada; dependiendo las necesidades de un sistema eléctrico de 60 Hz, la tasa de reporte se puede ajustar a 10, 12, 15, 20, 30 y 60 FPS, de acuerdo con lo indicado en el estándar IEEE sobre mediciones sincrofasoriales [9]. En este sentido, es objeto de esta investigación evaluar el impacto que tiene la tasa de reporte de las PMU en la exactitud al momento de estimar los valores del modelo de carga ZIP.

## 2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Las redes de transporte y distribución trabajan cada vez más cerca de sus límites nominales de estabilidad debido, entre otras cosas, al incremento de la demanda y a las restricciones de expansión en los sistemas. Esta situación desencadena que progresivamente se deban realizar simulaciones con una mayor precisión, por ende, es muy importante contar con modelos validados de los diferentes componentes que constituyen el ecosistema eléctrico, además de validar su comportamiento en conjunto [1].

Entre los componentes que conforman un sistema eléctrico, simular el comportamiento de la carga es una tarea compleja, pues sus modelos tienen variaciones continuas en el tiempo [2], [3], lo que no ocurre con otros elementos como, por ejemplo, las líneas de transmisión.

Una técnica para validar modelos que es ampliamente utilizada en la actualidad consiste en comparar la respuesta simulada de un modelo con mediciones reales y, de ser necesario, ajustar los parámetros de dicho modelo de tal manera que su comportamiento se ajuste a la realidad [1]. Para lograr una correcta validación de los modelos de carga es evidente que es necesario contar con mediciones adecuadas [2], [3], donde, entre otras cosas, la tasa de reporte es una característica fundamental. Por ejemplo, con una tasa reducida de reporte no permitiría observar la dinámica de los sistemas [8] y de las cargas.

Con base en lo anterior, evaluar la tasa de reporte con el objeto de determinar los FPS (*frames per second*) mínimos necesarios para estimar adecuadamente los parámetros del modelo de carga ZIP bajo diferentes condiciones es un tema fundamental [6] que es abordado en esta investigación.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿La tasa de reporte (FPS) de las mediciones sincrofasoriales tiene un efecto significativo en la exactitud alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga polinomial (ZIP)?

## **2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1. Objeto de Investigación**

Modelo de carga ZIP.

### **2.3.2. Campo de Acción**

3306.02 Aplicaciones eléctricas.

## **2.4. BENEFICIARIOS**

### **2.4.1. Directo**

- Operadores de red.
- Operador Nacional de Electricidad CENACE.
- Empresas de transmisión.
- Empresas de distribución.

### **2.4.2. Indirecto**

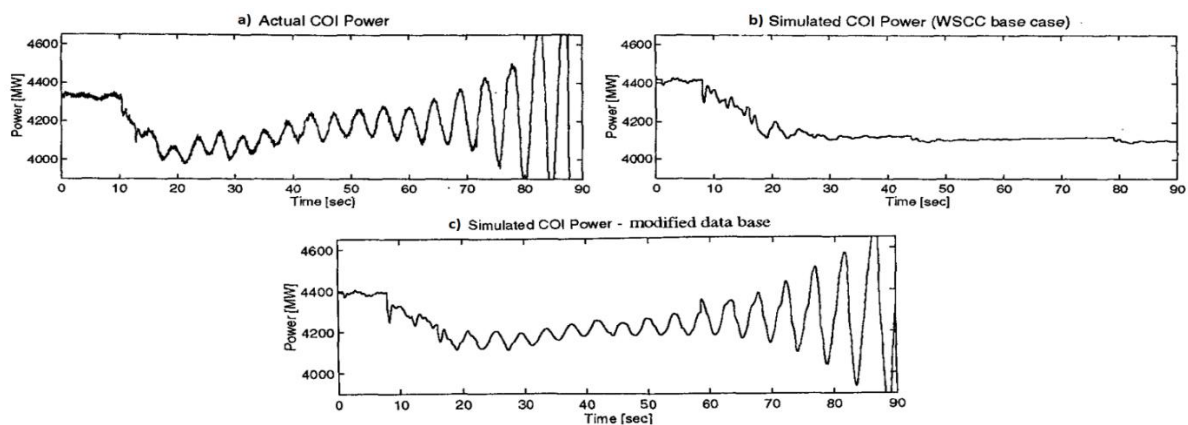
- Consumidores del servicio eléctrico.
- Sector académico y científico.

## **2.5. JUSTIFICACIÓN**

El modelamiento de carga ha sido un tema que se ha estudiado desde el siglo pasado, sin embargo, a partir de estas dos últimas décadas el interés a sido más grande por parte de la industria y de los investigadores. Prueba de esto es que varias organizaciones a nivel mundial han formado grupos de trabajo específicos para realizar investigaciones en el área del modelamiento de carga; las instituciones más destacas son: el “Consejo Occidental de Coordinación eléctrica”, el “Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI)” y el “Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE)”. Varias publicaciones y

reportes técnicos han resultado de dichos grupos de trabajo, algunos de ellos bastante recientes, tales como [10], [11].

Dentro de los análisis desarrollados a los sistemas eléctricos de potencia, modelar de forma correcta las respuestas dinámicas y estáticas de las cargas es fundamental. A pesar de lo anterior, el 72% de compañías eléctricas a nivel mundial utilizan simplemente modelos de carga estáticos para sus simulaciones [4], [5]. Se muestra un ejemplo en la Figura 1, a partir de la cual se visualiza un apagón (black-out) que tuvo lugar el 10/10/96 en el sistema “Consejo Occidental de coordinación de sistemas eléctricos (WSCC)” en USA, desde la interconexión California-Oregon (COI) [12]. En la Figura 1 apartado a) se observan las respuestas reales de las fluctuaciones de potencia. Apartado b) Muestra la simulación con un caso base. y c) Presenta el análisis del sistema desarrollando un proceso de validación a los parámetros eléctricos de varios componentes de la red, entre tales al modelo de la carga se añadió diferentes cargas estáticas y, la dinámica de motores de aires acondicionados. Mediante esta demostración se determina la relevancia de desarrollar los modelos con datos que representen de manera más eficiente el comportamiento ya sea dinámico o estático de las cargas del sistema.



**Figura 1.** Ejemplo de apagón (*black-out*) en el sistema WSCC. a) Simulaciones reales. b) Medición con caso base. c) Registros con modelos validados.  
Fuente: [12].

Por otro lado, con respecto a la necesidad de capturar las variaciones temporales de los modelos de carga, la cantidad requerida de estos modelos viene creciendo contantemente y seguirá creciendo en el futuro [2], [3]. Algunas razones son: la expansión de las redes, interconexiones nuevas, operación del sistema a su capacidad nominal, generación distribuida, almacenamiento, consumidores pasivos que pasan a ser activos, implementación de tecnologías nuevas de demanda con base de electrónica, vehículos eléctricos, entre otros. Todo esto cambia

la tendencia a realizar estudios y aplicaciones cada vez más sofisticados y exactos para planificar y operar correctamente el sistema. Estas aplicaciones y estudios requieren modelos de carga cada vez más precisos y a la vez representativos de una mayor capacidad de análisis en diferentes escenarios de operación. De hecho, hoy en día existen estudios quasi-static-time series que requieren series temporales de modelos de carga [13], [14].

Una muestra clara de la necesidad de conocer cómo varían los modelos de carga con el tiempo se da en lo que hoy se conoce como simulación quasi-dinámica, la cual abarca la solución continua de flujos de potencia, generalmente de un largo periodo, como un año, pero, por ejemplo, cada 5, 10, 15, 30 o 60 minutos.

De lo anterior, es evidente que contar con modelos validados es fundamental para obtener resultados confiables de los estudios y simulaciones. En este sentido, validar los modelos con mediciones reales es un tema fundamental [13], [14]

Con base en lo anterior, para lograr estimar de forma continua los modelos de carga es necesario contar con alguna tecnología que permita capturar la dinámica de un sistema. Hoy en día la tecnología de medición sincrofasorial lo permite, sin embargo, es importante determinar el efecto que tiene la tasa de FPS (*frames per second*) en la precisión alcanzada al estimar los modelos de carga.

## **2.6. OBJETIVOS**

### **2.6.1. General**

Evaluar el efecto de la tasa de reporte (FPS) de las mediciones sincrofasoriales en la precisión alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga ZIP, mediante la generación de datos sincrofasoriales sintéticos que incorporen ruido para emular condiciones reales de medición y la aplicación de un proceso de identificación paramétrica, con el fin de determinar los requerimientos mínimos de FPS necesarios para obtener modelos de carga ZIP confiables bajo diferentes condiciones de operación.

### **2.6.2. Específicos**

- Generar mediciones sincrofasoriales sintéticas con diferentes tasas de reporte (FPS) mediante la simulación de escenarios de operación de un sistema de prueba, con el fin

de disponer de un conjunto de datos representativos que permitan evaluar la precisión de la estimación paramétrica del modelo de carga ZIP.

- Realizar un análisis del estado del arte sobre metodologías de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP e implementar, con base en dicho análisis, un proceso de identificación paramétrica en un software especializado en cálculo numérico.
- Evaluar la exactitud alcanzada en la estimación paramétrica del modelo de carga ZIP utilizando mediciones sincrofásorales con diferentes tasas de reporte (FPS), mediante el análisis de indicadores de desempeño y la comparación sistemática de resultados, con el fin de determinar los requerimientos mínimos de FPS necesarios para obtener modelos de carga ZIP confiables bajo distintas condiciones de operación.

## 2.7. SISTEMAS DE TAREAS

En la Tabla 1 se presentan las tareas que se llevarán a cabo para alcanzar cada uno de los objetivos específicos precitados y, consecuentemente, el objetivo general de esta investigación.

**Tabla 1.** Sistema de tareas.

Objetivos Específicos	Actividades (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar un análisis del estado del arte sobre metodologías de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP e implementar, con base en dicho análisis, un proceso de identificación paramétrica en un software especializado en cálculo numérico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis bibliográfico sobre metodologías de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP.</li> <li>- Implementación y programación del modelo de carga ZIP en un software especializado en cálculo numérico.</li> <li>- Implementación y programación del proceso de identificación paramétrica seleccionado en un software especializado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis del estado del arte, con las metodologías de identificación paramétrica utilizadas y recomendadas en la literatura.</li> <li>- Detectar limitaciones y oportunidades de investigación en la precisión de estimación de datos mediante PMU en procesos de identificación paramétrica.</li> <li>- Script de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisión bibliográfica de literatura (Papers, sitios web, libros).</li> </ul>
Generar mediciones sincrofásorales sintéticas con		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de prueba de la literatura modelado e implementado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Software especializado en</li> </ul>

<p>diferentes tasas de reporte (FPS) mediante la simulación de escenarios de operación de un sistema de prueba, con el fin de disponer de un conjunto de datos representativos que permitan evaluar la precisión de la estimación paramétrica del modelo de carga ZIP.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elección de un sistema de prueba y configuración de las barras de carga del tipo ZIP.</li> <li>- Generación de escenarios de operación con Montecarlo.</li> <li>- Simulación del sistema de prueba usando escenarios aleatorios de operación y, con tasas de muestreo acordes a los FPS de PMU comerciales.</li> <li>- Almacenamiento de registros sincrofasoriales sintéticos de las barras de carga del sistema de prueba y, para diferentes tasas de FPS.</li> <li>- Adición de ruido a las señales sintéticas y consecuentemente ejecutar una técnica de filtrado.</li> </ul>	<p>mediante un software especializado en simulación en sistemas eléctricos de potencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Script para simular los escenarios de operación con Montecarlo para el sistema de prueba.</li> <li>- Mediciones sincrofasoriales sintéticas de las barras de carga del sistema de prueba, para una gran cantidad de escenarios de operación y para diferentes tasas de FPS.</li> </ul>	<p>simulación de sistemas eléctricos de potencia. Específicamente PowerFactory y su lenguaje de programación DPL.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Software de programación especializado en cálculo numérico. Específicamente MATLAB y SIMULINK.</li> <li>- Montecarlo</li> </ul>
<p>Evaluar la exactitud alcanzada en la estimación paramétrica del modelo de carga ZIP utilizando mediciones sincrofasoriales con diferentes tasas de reporte (FPS), mediante el análisis de indicadores de desempeño y la comparación sistemática de resultados, con el fin de determinar los requerimientos mínimos de FPS necesarios para obtener modelos de carga ZIP confiables bajo distintas condiciones de operación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación del proceso de identificación paramétrica con mediciones sincrofasoriales de diferentes tasas de FPS.</li> <li>- Determinación de los requerimientos mínimos necesarios para lograr estimar con suficiente precisión el modelo de carga ZIP con diferentes tasas de FPS.</li> <li>- Obtención de conclusiones con respecto a la exactitud alcanzada al variar la tasa de FPS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Indicadores de desempeño del proceso de identificación paramétrica para diferentes valores de FPS.</li> <li>- Valores de tensión mínimos y máximos requeridos para estimar adecuadamente el modelo de carga ZIP con diferentes tasas de FPS.</li> <li>- Resumen de conclusiones y resultados del impacto de los FPS en la exactitud alcanzada al estimar el modelo de carga ZIP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Software de programación especializado en cálculo numérico. Específicamente MATLAB.</li> </ul>

### **3. MARCO TEÓRICO**

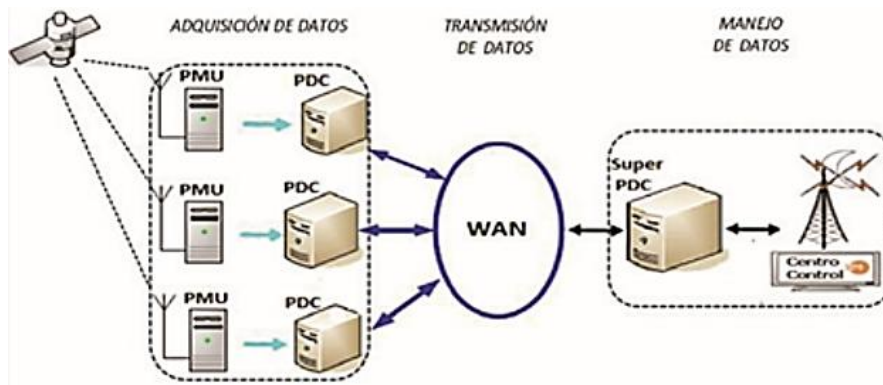
Hoy en día, el funcionamiento de los SEP se enfrenta a una serie de retos técnicos debidos a los cambios de paradigma en la gestión y la planificación. Entre los factores más relevantes se mencionan los cambios bruscos en los patrones típicos de programación para el despacho de centrales de generación y entrega de caudales de corriente en el sistema de transmisión debido a modificaciones estructurales relevantes, producto de la interconexión con sistemas regionales y la diferenciación de las primeras fuentes de energía debido al rápido proceso de tecnologías de energía renovable y a políticas que promuevan la protección ambiental.

En tal sentido, la confiabilidad y seguridad de un Sistema Eléctrico pueden verse severamente involucradas, debido al elevado riesgo de sobrecarga de los límites de seguridad dinámica, haciendo que impacten directamente a la eficiencia operativa del sistema y que puedan llevar a la salida de dispositivos importantes de la misma, o a la vez, a la interrupción parcial o total de sistema. Por otro lado, más allá de las capacidades tradicionales de la red “SCADA/EMS” empleados en las áreas de monitoreo y supervisar el comportamiento del SEP en régimen permanente, necesitan incorporar mejoras tecnológicas adicionales capaces de determinar y optimizar la seguridad dinámica en tiempo real. Dentro de estas invenciones tecnológicas destacan los sistemas WAMS, basados por su uso masivo de Unidades de Medición Fasorial sincronizadas mediante GPS. En una interconexión de sincrofasores se distinguen dos elementos fundamentales: las PMU y PDC.

Las PMU son equipos encargados de medir y reportar sincrofasores de corriente y tensión, así como la frecuencia del sistema, y la derivada de la frecuencia, la estampa de tiempo asociada a cada medición y los metadatos necesarios para interpretar correctamente la información. Por otra parte, los PDC se portan como conexiones en la red de intercambio de información. Estos almacenan, sincronizan y transforman los datos originarios de varias PMU o también de diferentes PDC para luego enviarlos en forma de flujo unificado hacia un concentrador de nivel superior. Entre sus funciones habituales se incluyen la comprobación de la calidad de los datos, el almacenaje para análisis posteriores y la proyección de la información, entre otras [15].

#### **3.1. SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA (WAMS)**

Las estructuras WAMS constituyen el conjunto de instrumentos y canales de comunicación que alimentan las aplicaciones con sincrofasores. La implementación de un conjunto de monitoreo de área extendida inicia con la instalación estratégica de una PMU en subestaciones, para luego transmitir paquetes de datos digitales hacia un elemento concentrador[16].

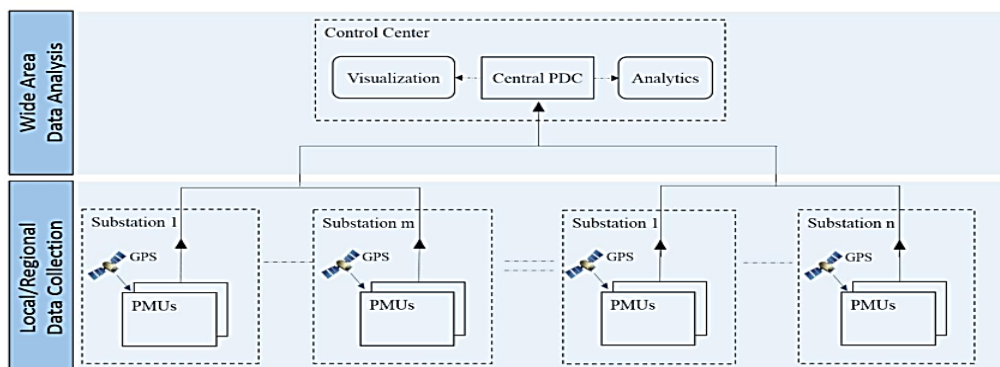


**Figura 2.** Diagrama estructural de un WAMS.  
Fuente: [16].

Por otro lado, se debe tener en cuenta que, la arquitectura de un sistema de monitoreo de área extendida (WAMS), puede adoptar diferentes formas, sea: centralizada, descentralizada o distribuida [17]. En este sentido, lo que diferencia a estos tipos es el flujo de información o datos entre el lugar donde se recopilan los datos, el sitio donde se toman las decisiones y el punto donde se ejecutan las acciones basadas en ellas. A continuación, se explican en detalle los distintos tipos de arquitectura WAMS.

➤ **Arquitectura WAMS centralizada**

En una arquitectura WAMS centralizada, todo el proceso desde la recopilación de datos de las PMU, su análisis y la implementación de medidas correctivas ocurre en un solo lugar central. En la Figura 3 se ilustra esta configuración. Las PMU de distintas subestaciones transmiten los datos fasoriales al PDC central, donde se alinean temporalmente y la concentración de datos de toda la actividad de datos de la PMU recibida. Los datos concentrados se utilizan para análisis y visualización. Finalmente, las medidas correctivas resultantes del análisis se envían a los dispositivos primarios.

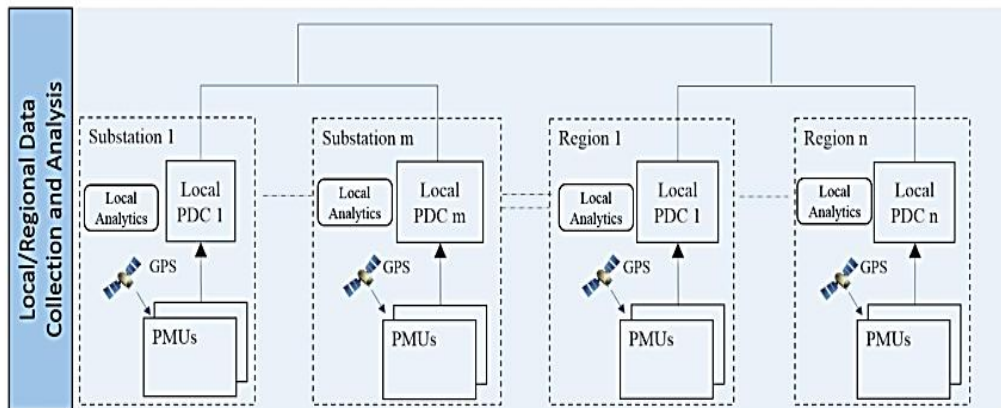


**Figura 3.** Arquitectura WAMS centralizada.  
Fuente: [17].

➤ **Arquitectura WAMS descentralizada**

En la arquitectura descentralizada WAMS, el monitoreo de zonas amplias se divide en múltiples áreas pequeñas y los PDC se encarga de controlar su zona local utilizando datos locales. Si surge algún problema que afecte áreas más grandes, estos controladores locales se conectan entre sí para resolverlo. La Figura 4 muestra cómo funciona esto. Las PMU dentro de un área local, como una subestación o una región específica, envían datos fasoriales al PDC local correspondiente para su procesamiento.

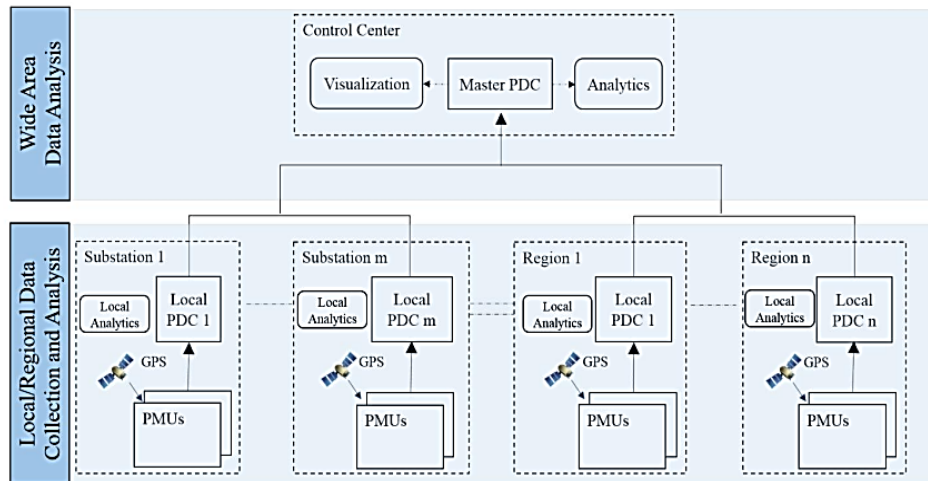
Los PDC locales analizan los datos para tomar las medidas correctivas necesarias para proteger o controlar los activos locales respectivos. Aunque todos los locales PDC están interconectados para compartir datos y monitorear zonas más extensas, esto no resulta muy eficiente para tareas a gran escala.



**Figura 4.** Arquitectura WAMS descentralizada.  
Fuente: [17].

➤ **Arquitectura WAMS distribuida**

La arquitectura de WAMS distribuida se puede mapear entre arquitecturas centralizadas y descentralizadas, estas combinan controladoras locales y centrales, y se puede ver como un sistema centralizado con una fase de ejecución distribuida. La Figura 5 muestra esta configuración. Básicamente, consta de un PDC local ubicado a nivel de subestación o región y un PDC maestro ubicado en la estación de control central. Las PMU dentro de una zona específica, como una subestación o una región, envían datos fasoriales a su respectivo PDC local. Todos estos PDC locales están conectados al PDC maestro en el centro. Lo que la diferencia es el flujo de información: el PDC local procesa los datos de las PMU a nivel local, pero siempre bajo la supervisión y control del PDC maestro.



**Figura 5.** Arquitectura WAMS distribuida.  
Fuente: [17].

### 3.1.1. Unidades de Medición Fasorial (PMU)

Son instrumentos de medida que permiten calcular sincrofasores de las ondas sinusoidales de V y I; en corriente alterna (AC), en diferentes puntos de conexión de un SEP. Las PMU's calculan sincrofasores mediante una interfaz de estimación fasorial. La regulación que especifica y regula los ensayos de precisión de dicho interfaz de estimación sincrofasorial corresponde a IEEE Std C37.118.1a-2014 ó IEC/IEEE 60255-118-1:2018. De esta manera, dichos algoritmos toman un número n de muestras temporales para estimar el fasor. La señal angular es una onda coseno a la frecuencia nominal, sincronizada con el tiempo UTC (Tiempo Universal Coordinado) a través de una señal de GPS. Gracias a su alta exactitud, respuestas instantáneas y sincronización temporal, hacen de las PMUs equipos apropiados tanto para el control global en estado dinámico y estable, y también para usos de control de área y cuidado amplio en tiempo real [18].

Al proporcionar mediciones directas de los fasores de I y V en la red, las PMU, reemplazan la necesidad de recurrir a estimadores de estado. Su tiempo de muestreo del orden, de milisegundos, permite monitorear tanto el comportamiento estático y dinámico del Sistema eléctrico de potencia. Además, se utilizan para identificar desacoples en el sistema, monitorear congestiones, estudiar variaciones en tiempo real e incluso crear plataformas de control de lazo cerrado [19].

### 3.1.2. Definición de Fasor

El fasor es una manera de expresar una onda sinusoidal que no cambia ni en tamaño ni en frecuencia a lo largo del tiempo [20], [21]. La forma de onda sinusoidal se define en la ecuación (1):

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Donde:

$\omega$  = Frecuencia angular de la señal en radianes por segundo.

$\varphi$  = Ángulo de fase en radianes (depende de la escala de tiempo, particularmente donde  $t=0$ ).

$X_m$  = Amplitud pico de la señal.

Se representa comúnmente como el fasor que se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) e^{j\varphi} \quad (2)$$

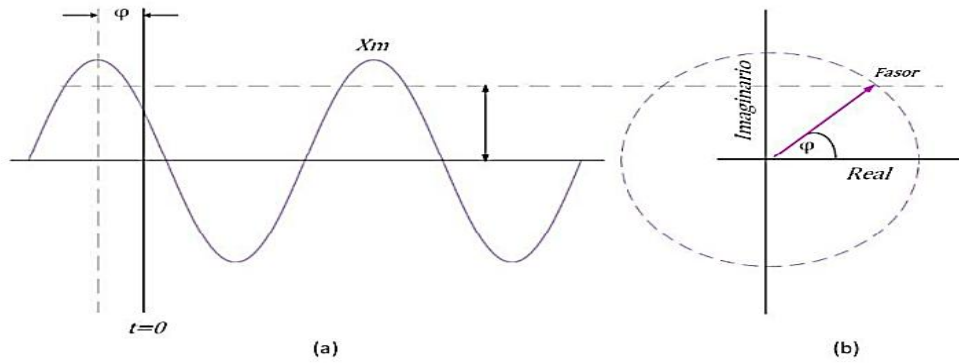
$$X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (3)$$

$$X = X_r + jX_i \quad (4)$$

Donde la magnitud es el valor cuadrático medio,  $\left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right)$ , de la forma de onda, y los subíndices  $r$  e  $i$  representan las partes real e imaginaria de un valor complejo en componentes rectangulares.

Es fundamental señalar que este fasor está definido para la frecuencia angular  $\omega$ ; por lo tanto, cualquier comparación o evaluación con otros fasores debe hacerse utilizando la misma escala de tiempo y la misma frecuencia.

En la Figura 6 se muestra la forma de onda sinusoidal y su interpretación fasorial.



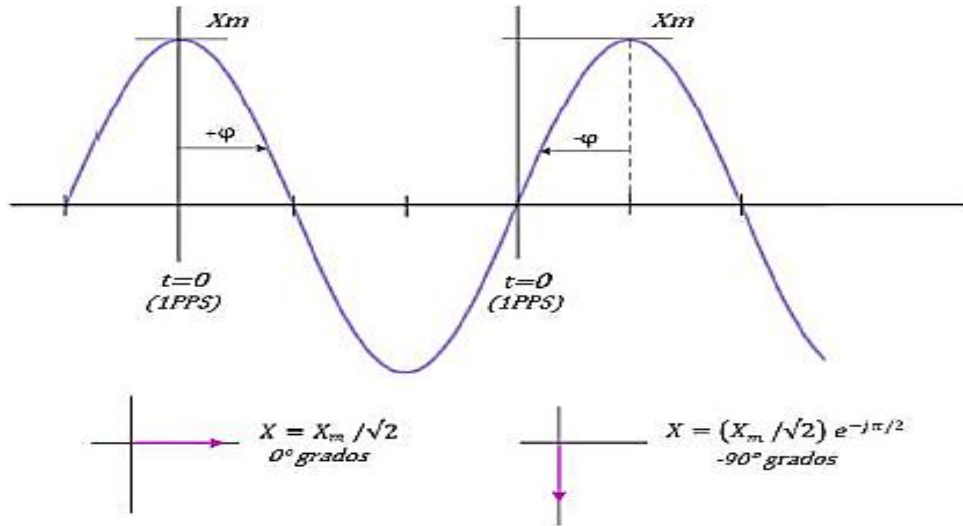
**Figura 6.** Definición de un Fasor (a) Función sinusoidal (b) Representación Fasorial.  
Fuente: [20].

### 3.1.3. Definición de Sincrofasor

Según [21] un fasor que se alcanza a partir de las oscilaciones de onda de V y I, referenciado con exactitud a un fundamento habitual de tiempo.

La función sincrofasorial de la señal  $x(t)$ , según la formula  $X = X_r + jX_i$ , corresponde al resultado  $X$  definido en la ecuación (7), donde  $\varphi$  representa el ángulo de fase instantáneo respecto a una función coseno con frecuencia nominal del sistema, sincronizada con el Tiempo Universal Coordinado (UTC) [20].

En otras palabras,  $\varphi$  representa el movimiento de la función coseno, la cual, alcanza su pico cuando  $t=0$ . De este modo, el ángulo sincrofasorial es de  $0^\circ$  grados cuando dicho máximo coincide con  $x(t)$  con el segundo flanco inferior de la señal del UTC (1 pulso por segundo), y de  $90^\circ$  grados cuando la intersección por cero positivo coincide con ese mismo flanco inferior de la señal del UTC. En la Figura 7 se muestra la relación entre el ángulo de fase y el tiempo UTC [20].



**Figura 7.** Relación del ángulo de fase y el tiempo UTC.  
Fuente: [20].

Es importante tener en cuenta que el estándar de sincrofasores está diseñado para señales en estado estable, diciendo que, aquellas cuya frecuencia de la forma de onda permanece constante durante el intervalo de tiempo en que se lleva a cabo el sondeo.

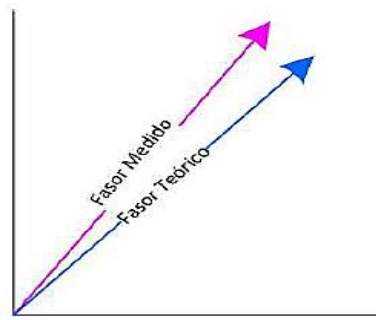
### 3.1.4. Cálculo de Errores

Uno de los principios más importantes para evaluar la precisión de las mediciones es el TVE, definido en la ecuación (5). Dicho indicador representa la magnitud de la diferencia vectorial entre el fasor teórico descrito en la ecuación (4) y el fasor que el dispositivo estima a partir de la medición en un mismo instante de tiempo [20].

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r^2) + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (5)$$

Donde  $X_r(n)$  y  $X_i(n)$  corresponden a los resultados medidos por el dispositivo, es decir, al sincrofasor estimado. En contraste,  $X_r$  y  $X_i$  representan los resultados teóricos exactos de la señal de entrada en el instante de medición.

Como el resultado real no puede conocerse con absoluta precisión, se recurre a un proceso de calibración que permite definir los límites dentro de los cuales una medición puede considerarse potencialmente errónea. El estándar establece que una unidad de medición fasorial debe sostener un TVE inferior al 1% para cumplir con los requisitos de exactitud [21].



**Figura 8.** Diferencia entre el Fasor medido y el teórico.  
Fuente: [20].

La evaluación del TVE solo puede realizarse dentro de un entorno de laboratorio, donde el fasor proviene directamente de la salida controlada de un generador de señales. Este principio de error admitido integra las posibles fuentes de inexactitud, incluyendo tanto los errores de sincronización temporal como los errores asociados a la estimación de la magnitud y el ángulo del fasor.

### 3.1.5. Frecuencia y Tasa de Cambio de la Frecuencia (ROCOF)

Las mediciones de la frecuencia y su derivada deben evaluarse de acuerdo con las definiciones establecidas. Por lo tanto, los errores se determinan como el valor completo de la resta entre las cantidades teóricas y los valores estimados, expresados en Hz para la frecuencia y en Hz/s para la tasa de variación de la frecuencia [20].

- Error de medición de la frecuencia

$$FE = |f_{real} - f_{medida}| = |\Delta f_{real} - \Delta f_{medida}| \quad (6)$$

- Error de medición de ROCOF

$$RFE = \left| \left( \frac{df}{dt} \right)_{real} - \left( \frac{df}{dt} \right)_{medida} \right| \quad (7)$$

Los resultados reales y los resultados medidos corresponden al mismo instante de tiempo, determinado por la estampa temporal asociada a los valores estimados.

### 3.1.6. Tasa de Reporte

Las estimaciones de sincrofasores, frecuencia y ROCOF deben generarse de manera que puedan reportarse con una tasa constante  $F_s$ . Esta tasa corresponde a un número entero de mediciones por segundo cuando es superior a una medición por segundo, o a un número entero de segundos entre mediciones cuando la tasa es igual o menor a una por segundo. Las tres magnitudes deben calcularse y reportarse dentro del mismo intervalo de reporte.

Los tiempos de reporte deben distribuirse de manera uniforme, de modo que los intervalos entre cada reporte sean constantes. Además de estas mediciones específicas, la PMU puede realizar otras tareas de forma simultánea, como registrar estados booleanos, efectuar el muestreo de la forma de onda o generar otros datos derivados [21].

La unidad de medición fasorial (PMU) debe ser capaz de generar informes de datos ya sea mediante registro o transmisión a submúltiplos de la frecuencia nominal del sistema eléctrico. Las frecuencias de reporte para sistemas de 50 Hz y 60 Hz se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Tasas de reporte requeridos en PMU. Fuente: [21].

Frecuencia del sistema	50 Hz			60 Hz					
Tasas de informes (Fotogramas por segundo)	10	25	50	10	12	15	20	30	60

### 3.2. MODELAMIENTO DE CARGA

El modelamiento de carga consiste en la evaluación matemática del desempeño eléctrico de las cargas conectadas al sistema de potencia. Este modelamiento permite describir la relación entre voltaje, corriente y potencia consumida, así como la respuesta de la carga ante variaciones de frecuencia y condiciones dinámicas del sistema.

En el marco de esta tesis, el modelamiento de carga es fundamental para generar señales de entrada realistas y evaluar el desempeño de los algoritmos de estimación utilizados por las PMU, ya que determina la forma de onda medida y, en consecuencia, los errores asociados a la estimación fasorial. Por lo tanto, el modelo matemático permite representar oportunamente el desempeño de las cargas de un SEP en diferentes estudios o servicios. Dicha sección contiene dos puntos importantes: i) seleccionamiento de un modelo de carga y, ii) reconocimiento paramétrico de valores del modelo seleccionado[22].

### 3.3. MODELOS DE CARGA

En el análisis de sistemas eléctricos de potencia (SEP), a estos conjuntos se les permiten representar el funcionamiento de las mismas conectadas a la red ante variaciones de voltaje, frecuencia y otras condiciones operativas. Estos modelos se utilizan en simulaciones, estudios de estabilidad y evaluación de algoritmos de estimación fasorial.

Dicho esto, la clasificación de estos modelos se encuentra en cuatro categorías principales: dinámico, estático y compuesto y los que emplean inteligencia artificial (ANN [7]).

#### 3.3.1. Modelos Estáticos

El comportamiento de las cargas estáticas en el dominio del tiempo puede describirse de manera adecuada mediante una función algebraica que depende del voltaje y/o de la frecuencia. No consideran efectos dinámicos ni transitorios [7]. Entre los más comunes se encuentran:

- ZIP: combina componentes de impedancia, corriente y potencia constante.
- Exponencial: representa la carga mediante funciones exponenciales dependientes del voltaje.
- Dependiente de frecuencia: ajusta el consumo según variaciones en la frecuencia del sistema.

#### 3.3.2. Modelos Dinámicos

Estos modelos incorporan el comportamiento temporal de la carga, permitiendo analizar su respuesta ante perturbaciones. Algunos de ellos son:

- Motor de inducción (IM): simula la dinámica de motores conectados a la red.
- ERL (Exponencial Dinámico): modelo que introduce retardos y respuesta gradual.
- Función de transferencia: representa la carga mediante sistemas de control lineales.

Las cargas dinámicas necesitan un modelado explícito mediante ecuaciones que describan cómo sus variables evolucionan a lo largo del tiempo, tal como ocurre en los modelos de motores de inducción o motores sincrónicos. Para representarlas, se emplean fórmulas diferenciales, tal como ocurre en el modelo mostrado en las ecuaciones (8) y (9) [7].

$$T_p \frac{dx}{dt} = P_s(V) - xP_t(V) \quad (8)$$

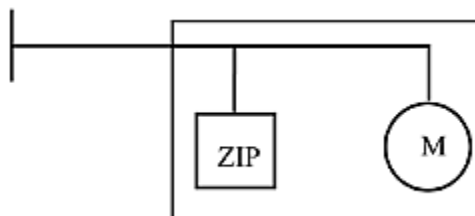
$$T_q \frac{dy}{dt} = Q_s(V) - yQ_t(V) \quad (9)$$

En este modelo,  $P_s$  y  $Q_s$  representan las potencias activa y reactiva de la carga en estado firme, expresadas como funciones del voltaje  $V$ . Por otro lado,  $P_t$  y  $Q_t$  corresponden a las potencias activa y reactiva en estado transitorio (RMS), también dependientes de la tensión. Las constantes  $T_p$  y  $T_q$  definen los tiempos de respuesta de las potencias activa y reactiva, respectivamente, mientras que  $x$  e  $y$  actúan como variables de estado asociadas a cada una de estas potencias [7].

### 3.3.3. Modelos Compuestos

En los SEP, la mayoría de los componentes con comportamiento dinámico corresponde a motores industriales los cuales proporcionan una parte significativa de la potencia total demandada por las cargas. Dicho esto, el uso de modelos compuestos permite acercarse de manera más segura a la composición real de la carga. Esto se debe a que dichos modelos poseen un significado físico claro, ya que combinan explícitamente un motor de inducción en paralelo con una carga estática. Sin embargo, los modelos de tipo “caja negra” no ofrecen esta interpretación física directa y, por tanto, no reflejan con la misma precisión la naturaleza de la carga [7].

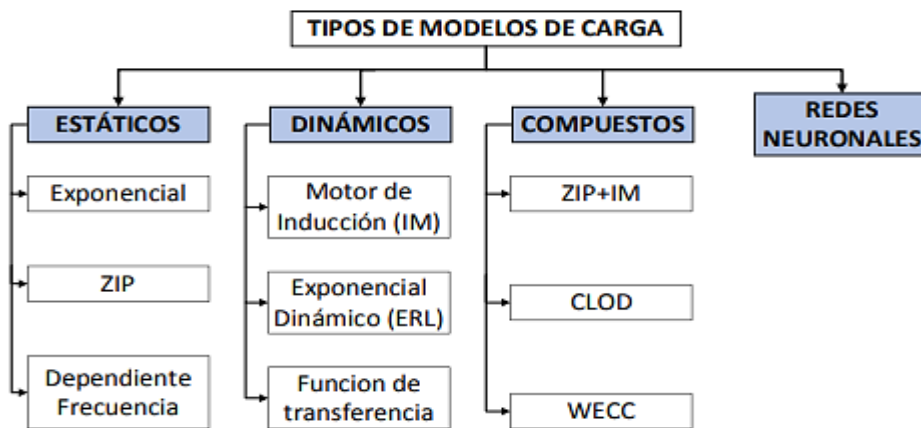
Dicho ejemplo, a comparación de otros modelos de carga dinámicos, se encuentra entre los más empleados por su claro significado físico. La misma que integra un modelo de carga ZIP, que describe el comportamiento de estático de la carga, junto con un prototipo de motor de inducción de tercer orden que interpreta parte dinámica [7]. Ambos elementos suelen conectarse en paralelo, tal como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Modelo compuesto de carga.

Fuente: [7].

En la Figura 10 se detallan los Tipos de modelo de carga mencionados anteriormente.



**Figura 10.** Clasificación de modelos de carga.

Fuente: [7].

Por una parte, los modelos de carga se definen como funciones algebraicas que buscan simular la respuesta real de las cargas eléctricas. Aunque hay una gran variedad de modelos, por ende, en este marco teórico solamente se describe únicamente el modelo ZIP [22], dado que es el que se va a utilizar en esta investigación.

Este prototipo se utiliza para describir cómo responde una carga de manera estática frente a variaciones en la tensión. Este enfoque combina tres componentes fundamentales: una parte de corriente, otra de impedancia y una de potencia constante. Las ecuaciones (10) y (11) muestran la formulación del modelo ZIP tanto para la potencia activa como para la potencia reactiva [6].

$$P = P_0 \left[ p_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (10)$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (11)$$

Donde:

- $V_{pu}$  es la tensión actual de la barra, pero en por unidad (pu).
- $P_0$  y  $Q_0$  son la potencia activa y reactiva consumida por la carga a tensión nominal ( $V_0$ ).
- $P$  y  $Q$  son la potencia activa y reactiva consumida por la carga.
- $p_1, p_2$  y  $p_3$  son los parámetros del modelo de carga ZIP de potencia activa y representan la proporción de cada componente Z, I o P constante; deben ser valores entre cero y uno, y deben sumar uno.

- $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  son parámetros del modelo de carga polinomial ZIP de potencia reactiva y representan la proporción de cada componente Z, I o P constante; deben ser valores entre cero y uno, y deben sumar uno.

Este modelo es el más empleado en simulaciones estáticas, ya que integra de manera conjunta las características fundamentales de las cargas: comportamiento de Impedancia, Corriente y Potencia constante [23].

### **3.4. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA**

#### **3.4.1. Definición de Identificación Paramétrica**

Es una etapa fundamental e importante a la hora de desarrollar el modelamiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), ya que en un modelo matemático existen parámetros desconocidos, entonces la estimación de parámetros mediante mediciones del sistema representa estas variables desconocidas y el comportamiento de los sistemas.

Como las cargas son un elemento importante para los modelamientos la técnica de estimación es fundamental para que, al emplear un modelo el mismo represente adecuadamente a las cargas bajo distintos escenarios de operación real.

Para modelar cargas existen dos fases principales las cuales son: elección del tipo de modelo e identificación paramétrica de sus coeficientes como lo mencionan en [6], siendo esta última crítica para la exactitud de estudios en estabilidad planificación y operación en SEP.

En [6] al modelar las cargas, para minimizar errores entre potencias medidas y calculadas en un modelo adoptado se usa identificación paramétrica obviamente ajustando técnicas de optimización que ayuden a contrarrestar variables y obtener respuestas aceptables.

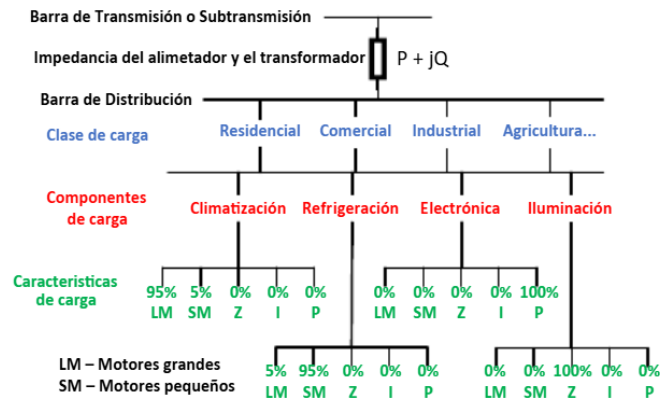
#### **3.4.2. Métodos de identificación paramétrica aplicables**

Pueden clasificarse de acuerdo a las fuentes de sus datos o la metodología que se utilice para su estimación.

#### **3.4.3. En base a componentes**

En la actualidad es imposible representar todas las cargas que conforman un punto de consumo en tiempo real o a lo largo del tiempo, bajo esta problemática surge el enfoque de identificación paramétrica en base a componentes la que permite representar las cargas como puntos con usos finales típicos (cargas especiales, iluminación, domótica, etc) y dependiendo del tipo de

consumidor final a fin de establecer la típicas cargas que comprenden cada componente dependiendo de su clasificación en la tabla de consumidores como lo expone en [7] y su representación dentro de un SEP que se puede observar en la Figura 11.



**Figura 11.** Identificación paramétrica basada en componentes.

Fuente: [7].

La principal desventaja de este modelo es que se representan con su máximo consumo dentro del sistema son estáticos no representan el consumo real variante en el tiempo a lo largo de los días ni se ve afectada por el clima o el comportamiento del cliente y esta composición varía sustancialmente en barras y alimentadores [24].

En el contexto del modelo ZIP, este enfoque permite estimar directamente la contribución relativa de cada componente del modelo, siempre que exista suficiente variación de tensión durante el período de análisis.

#### 3.4.4. En base a mediciones

En [25] la identificación paramétrica basada en mediciones usa las mediciones del sistema eléctrico obtenidas directamente, en ella no hay necesidad de conocer con detalle la composición de las cargas, ha ganado popularidad con la incorporación de Unidades de Medición Fasorial (PMU) con la expansión de sistemas avanzados en medición.

Este método se fundamenta en el uso de mediciones recopiladas en campo mediante los equipos necesarios. En donde se utilizan los datos correspondientes a registros de tensión, frecuencia, potencia activa (P) potencia reactiva (Q). El procedimiento consiste en primero seleccionar un modelo de carga, en él se van a introducir los valores reales de frecuencia, y tensión para calcular las potencias activa y reactiva. Posterior o ello se realiza una comparación entre los valores reales obtenidos en las mediciones de campo con los valores calculados de P y Q por

el modelo, el mismo que a través de una función objetivo minimiza el error por una técnica de optimización para ajustar los parámetros de modelo de carga [24].

Este es el proceso por el cual se estiman parámetros que no se conocen dentro de un modelo matemático con parámetros conocidos como mediciones de frecuencia, corriente, voltaje, potencia. En los SEP al representar líneas de transmisión, maquinas eléctricas o cargas estimar parámetros permiten que los mismo tengan un significado más físico claro real y comprensibles de estos sistemas mediante una combinación de fenómenos eléctricos.

#### **3.4.5. Identificación paramétrica del modelo de carga ZIP**

El proceso de identificación paramétrica del modelo de carga polinomial (ZIP) se lo detalla posteriormente en la sección 5.4.2.

### **3.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE**

En [26] se aborda la identificación paramétrica de modelos de carga usando mediciones reales proporcionadas del SEP, que se enfoca en la estimación de parámetros optimizados. Los autores desarrollan una función objetivo para minimizar el error de las potencias medidas y obtenidas del modelo de carga. Se realiza una evaluación de datos (AMI) cada 15 minutos en (SCADA) cada 5s y utilizan 10 ms (uPMU) para demostrar la robustez del método propuesto de esta manera el estudio muestra que la precisión está sujeta directamente de la calidad y cantidad de datos de mediciones utilizables en la resolución temporal, evidenciando la importancia de datos de alta frecuencia para su estimación.

Por otro lado, [25] se centra en la identificación paramétrica de modelos dinámicos y estáticos, usando funciones objetivo para cuantificar el error entre mediciones reales y proporcionadas por el modelo simulado. Se analizan las limitaciones proporcionadas por mediciones con baja resolución en la estimación de parámetros. De igual manera al caso anterior resalta la necesidad de datos de alta frecuencia para mejorar la confiabilidad de las respuestas en los diferentes procesos.

En [27] se propone que para realizar estimación paramétrica de modelo de carga ZIP es mediante el uso de datos sincrofasoriales proporcionados por una PMU. La función objetivo viene dada por la diferencia entre las potencias activas (P) y reactivas (Q) medidas y calculadas por el modelo ZIP. Para la minimización de dicha función, se emplearon algoritmos genéticos, que muestran mejoras en la precisión frente a métodos clásicos. Este trabajo evidencia que

mediante el uso de datos sincrofásorales con alta resolución temporal permite una estimación más confiable de los parámetros ZIP.

En [28] se presenta un método de estimación paramétrica para modelos de carga compuestos que incluyen componentes estáticas y dinámicas. Para su estimación se plantea un problema de optimización, donde su función objetivo minimiza la diferencia entre mediciones de salida del modelo a diferencia de los otros métodos presentados antes este usa un algoritmo de Particle Swarm Optimization mejorado para obtener parámetros óptimos en su salida. Los resultados obtenidos demuestran que los métodos metaheurísticos también permiten una identificación más exacta en comparación con otras técnicas revisadas, responder mejor al contar con mediciones detalladas de gran magnitud y exactas.

En [29] se propone una estimación basada en métodos estadísticos (Bayes y Muestreo de Gibbs) mediante el cual se obtienen distribuciones de parámetros del modelo ZIP (y también modelo dinámico IM). La función objetivo está implícita en el planteamiento de la verosimilitud de multi-parámetros y el método más robusto ante ruido que los enfoques tradicionales de mínimos cuadrados. Este método no usa datos provenientes de PMU sin embargo su apto radica en proveer estimaciones menos sensibles a errores de medición y presentar información probabilística de los coeficientes ZIP.

En [30] se presenta una técnica de identificación paramétrica que se basa en un algoritmo metaheurístico (Dung Beetle Optimizer mejorado) para ajustar parámetros de los modelos de carga a partir de datos de PMU. La función objetivo se minimiza interactivamente para capturar la curva característica del modelo de carga, y la estrategia propuesta se compara con otros métodos (PSO, GWO), mostrando mejor desempeño. El uso de datos de PMU realza la precisión del proceso de estimación.

De acuerdo con [31] los datos de campo proporcionados por la PMU de Manitoba Hydro, si los modelos ZIP (y variantes con dependencia de frecuencia) reflejan mejor el comportamiento de la carga que otras estructuras. Se emplean test estadísticos (F-test) para verificar la especificación correcta de los modelos paramétricos. La función objetivo subyacente es implícita, mide la bondad de ajuste entre datos y salida del modelo bajo diversas formulaciones ZIP. En este trabajo no solo estima parámetros, sino que evalúa formalmente la validez del modelo ZIP frente a otras alternativas.

En [32] desarrolló un modelo ZIP para caracterizar cargas eléctricas usando datos proporcionados por la PMU y Medidores Inteligentes (SM), aplicando análisis numérico de mínimos cuadrados para determinar coeficientes Z, I y P. Este trabajo muestra que con PMU de alta frecuencia se obtiene un error promedio de 2%, destacando la ventaja de mediciones de alta resolución temporal para identificación paramétrica.

Finalmente, luego de la revisión de la literatura presente muestra que la identificación paramétrica de los modelos de carga, incluyendo el modelo ZIP, en su mayoría predomina la formulación de una función objetivo para minimizar errores entre mediciones de campo y salidas de modelamientos, empleando métodos de optimización metaheurísticos o de optimización clásica. Otros trabajos presentan metodologías que integran inteligencia Artificial (IA) o estimación en tiempo real, mientras algunos analizan condiciones necesarias en las mediciones para lograr que sean confiables las estimaciones sin embargo la limitante de todos los métodos revisados es que no muestran estudios que comparen la precisión de la estimación paramétrica del modelo de carga ZIP mediante un análisis profundo de la tasa reportes (FPS) y como está varía en función de los diferentes muestreos la cual justifica la presente investigación.

**Tabla 3.** Revisión bibliográfica sobre técnicas de filtrado en el modelamiento de carga

Año	Autor(es)	Título	Tipo	Contribuciones	Referencia
2019	H. Ren, N. N. Schulz, V. Krishnan, and Y. Zhang	Online Static Load Model Estimation in Distribution Systems	Artículo	Evaluación del desempeño del método de mínimos cuadrados en la estimación de modelos ZIP. La misma se realiza con datos cada 15 minutos (AMI), 5 segundos (SCADA) y 10 ms (uPMU). Los resultados evidencian que la precisión del modelo estimado (ZIP) se relaciona directamente con la frecuencia de los datos, es decir, una mayor tasa proporciona mejores resultados.	[33]
2018	Tushar, S. Pandey, A. K. Srivastava, P. Markham, and M. Patel	Online Estimation of Steady-State Load Models Considering Data Anomalies	Artículo	Se propone un algoritmo "Adaptive Search" para la estimación de modelos ZIP a partir de datos PMU. Este trabajo de investigación también evalúa diferentes	[34]

				tasas de reporte de las PMU, cada 4 segundos, cada segundo y 30 veces por segundo. La precisión de los parámetros obtenidos es 68%, 79% y 96%, respectivamente, sin embargo, el trabajo no especifica como se calcula la precisión.	
--	--	--	--	---	--

#### 4. HIPÓTESIS

La hipótesis central de esta investigación sostiene que la tasa de reporte (FPS) de las mediciones sincrofásicas influye de manera significativa en la precisión al estimar los parámetros que definen el modelo de carga ZIP. Específicamente, se espera que una mayor tasa de reporte (FPS) se asocie con una estimación más precisa de los parámetros del modelo de carga ZIP, mientras que una tasa menor de FPS tienda a reducir dicha precisión.

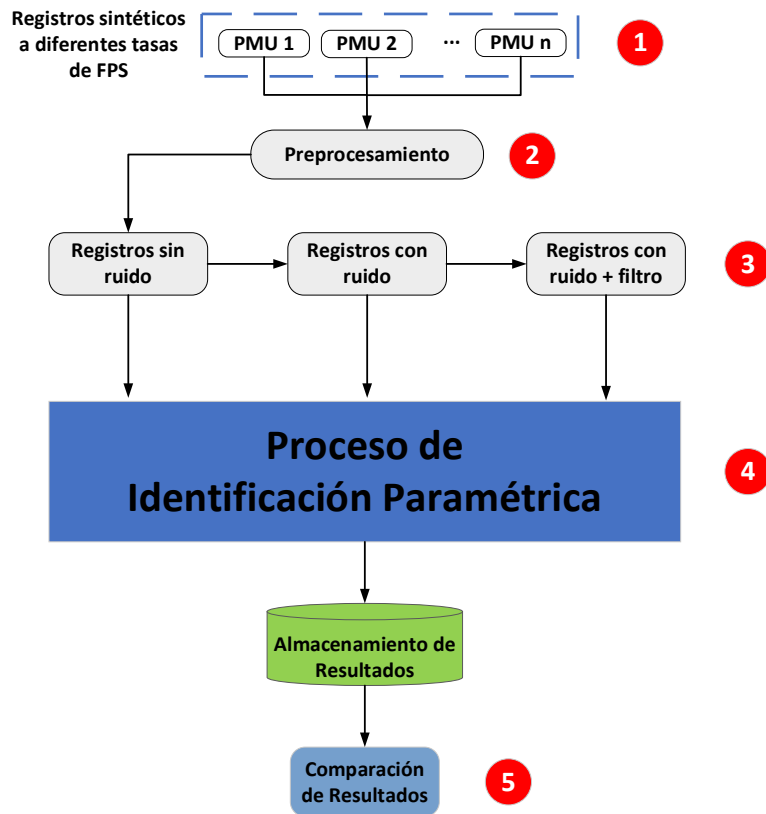
#### 5. METODOLOGÍA

La sección 5 presenta la metodología de investigación para determinar el impacto de los FPS (frames per second) de las PMU en la precisión alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga ZIP.

Esta metodología recopila en el diagrama de flujo presentado en la Figura 12, se divide en seis etapas, las cuales se enumeran con un círculo de color rojo, y se abordan detalladamente a continuación.

Antes de proceder con el desarrollo metodológico, se establecen las variables consideradas en esta investigación:

- **Variable independiente:** la tasa de reporte (FPS) de las mediciones sincrofásicas.
- **Variable dependiente:** la precisión alcanzada en la identificación de parámetros del modelo de carga ZIP, evaluada mediante indicadores de desempeño.



**Figura 12.** Diagrama de flujo del proceso de investigación para la influencia del impacto de los FPS en la precisión de la identificación paramétrica del modelo de carga ZIP.

### 5.1. REGISTROS SINTÉTICOS

Para evaluar el impacto de la tasa de reporte (FPS) de las PMU en la estimación del modelo de carga ZIP resulta necesario contar con mediciones sincrofásorales. En este sentido, al tener presente que en un sistema eléctrico real no es posible asegurar que una barra de carga se comporte estrictamente bajo el modelo de carga ZIP, la estrategia metodológica pertinente para el correcto desarrollo de esta investigación es la generación de mediciones sincrofásorales sintéticas a través de simulaciones.

En función de lo anterior, los pasos a seguir son los siguientes:

- Seleccionar un sistema de prueba, preferiblemente de los disponibles en la literatura o en programas de simulación, pero que cuente con los modelos dinámicos necesarios para realizar simulaciones en el dominio fasorial (RMS).
- Configurar las cargas del sistema de prueba de manera que se comporten bajo el modelo ZIP. Programas especializados como PowerFactory tienen en su interfaz implementada esta función.

- Generar mediante Montecarlo escenarios de operación aleatorios del sistema de prueba. Para cada uno de estos escenarios la idea es:
  - Asignar de manera aleatoria un valor de demanda.
  - Ejecutar un flujo óptimo de potencia para obtener el despacho y las condiciones iniciales del sistema.
  - Configurar de manera aleatoria un evento o contingencia como: falla, salida de generación, cambio en el TAP de un transformador, variación de la demanda, entre otros similares.
  - Variar de manera aleatoria los parámetros del modelo ZIP de potencia activa y reactiva de cada carga.
- Realizar simulaciones en el dominio fasorial (RMS) en cada uno de los escenarios de operación precitados. La duración de las simulaciones debe ser de 10 segundos, de acuerdo con lo recomendado en la metodología de identificación paramétrica de [6], que es la utilizada en esta investigación.
- Almacenar las simulaciones de todas las barras de carga del sistema, emulando que se encuentra instalada una PMU en cada una de estas barras. Para esto, las simulaciones deben ser iguales a los registros reportados por una PMU; aunque los registros contienen la tensión, corriente, frecuencia y derivada de la frecuencia (la potencia activa y reactiva se calcula automáticamente en los sistemas WAMS en función de la tensión y la corriente), para esta investigación y para la identificación paramétrica del modelo de carga ZIP es necesario almacenar únicamente el voltaje, potencias activa y reactiva. La tasa de reporte debe ser en submúltiplos de 60 FPS para sistemas de 60 Hz, que es la frecuencia nominal del Ecuador. En el caso de que la investigación se enfoque en PMU modernas o uPMU, la tasa de reporte sería submúltiplo de 120 FPS.

Como resultado final de esta etapa se cuenta una base de datos que contiene registros (voltaje, potencia activa y potencia reactiva) de 10 segundos de duración, con tasas de reporte submúltiplos de 120 o 60 FPS, para todas las barras de carga del sistema de prueba, y para una gran cantidad de escenarios de operación.

## **5.2. PREPROCESAMIENTO**

Una vez que se cuenta con mediciones sincrofasoriales sintéticas, la siguiente etapa es el preprocesamiento de estos registros, tal como se observa en la Figura 12. Es importante mencionar que el preprocesamiento no se refiere al preprocesamiento de las señales medidas

por una PMU, o el preprocesamiento realizado por los PDC o los sistemas WAMS, sino un preprocesamiento de los registros enfocado exclusivamente en el correcto desarrollo de esta investigación. En este sentido, en esta etapa se debe realizar lo siguiente:

- Eliminar todos los registros (cada registro contiene mediciones sincrofasoriales de tensión, potencia activa y potencia reactiva de 10 segundos de duración) que contengan datos vacíos, faltantes, errores, o similares.
- Eliminar todos los registros que contengan simulaciones de colapsos.
- Eliminar todos los registros de barras en las cuales exista, además de una carga, generación, sobre todo con control de tensión. Esto se debe a que los modelos de carga relacionan generalmente los cambios en la tensión con las variaciones en la demanda.
- Eliminar todos los registros que contengan una magnitud de variación de tensión<sup>1</sup>( $\Delta V$ ) inferior a 0.003 pu. Esto se realiza puesto que en [6] (trabajo que recomienda, entre otras cosas, las magnitudes de variación de tensión necesarias para estimar con precisión el modelo de carga ZIP) se recomienda utilizar registros con  $\Delta V > 0.003 pu$  con el fin de que los parámetros del modelo de carga ZIP estén correctamente estimados.
- Eliminar todos los registros que contengan una magnitud de variación de tensión ( $\Delta V$ ) superior a 0.2 pu. Aunque en [6] se recomienda utilizar registros con  $\Delta V < 0.6 pu$ , en esta investigación se utilizan exclusivamente registros con  $\Delta V < 0.2 pu$ , dado que en la práctica es sumamente desafiante contar con mediciones con variaciones de tensión superiores a este valor, puesto que generalmente son colapsos parciales o totales.
- Homogenizar la cantidad de registros por  $\Delta V$  con el objeto de prevenir sesgos en los resultados. La razón de esto es que, la precisión con la que se estiman los parámetros del modelo de carga ZIP tiene una relación directamente proporcional con la magnitud de variación de tensión  $\Delta V$ , de acuerdo con lo observado en [6]. Se recomienda homogenizar la cantidad de registros en pasos de 0.001 pu para datos tipo ambiente ( $\Delta V \leq 0.03 pu$ ) y 0.01 pu para datos tipo RingDown ( $\Delta V > 0.03 pu$ ), puesto que en la práctica se cuenta mayoritariamente con datos tipo ambiente.

Como resultado final de esta etapa se cuenta con varias bases de datos, donde cada una contiene registros (voltaje, potencia activa y potencia reactiva) de 10 segundos de duración, sin datos

---

<sup>1</sup> La magnitud de variación de tensión se determina como la disparidad entre el valor máximo y mínimo de tensión en un periodo de tiempo de mediciones de tensión, generalmente 10 segundos para la identificación paramétrica de modelos de carga.

faltantes o vacíos, con registros con  $\Delta V$  entre 0.003 y 0.2 pu, y una cantidad homogenizada de registros por  $\Delta V$ . La diferencia entre las bases de datos es que cada una corresponde a una tasa de registro (FPS) diferente. Cada base de datos debe contener registros con submúltiplos de 120 o 60 FPS, dependiendo cual tasa de FPS se elija.

### **5.3. ADICIÓN DE RUIDO Y ETAPA DE FILTRADO**

Las bases de datos disponibles de la etapa anterior contienen registros (cada registro contiene mediciones de tensión, potencia activa y potencia reactiva de 10 segundos de duración) sin ruido, puesto que las simulaciones en los programas especializados no contienen ruido. Al tener presente que los registros reportados por las PMU contienen ruido en la vida real, es justamente objeto de esta quinta etapa, tal como se observa en la Figura 12, añadir ruido a las mediciones sincrofásicas sintéticas para que sean similares a las reales.

Para lograr este objetivo, se añade ruido blanco gaussiano a las mediciones sintéticas, tal como se recomienda en [35], [36], y con los valores de SNR en decibelios mostrados en (12). Estos valores de SNR son tomados de [36].

$$SNR(V \ P \ Q) = (73 \ 65 \ 49)dB \quad (12)$$

Por otro lado, con respecto a la utilización de un algoritmo de filtrado, se sugiere utilizar uno de la literatura, enfocado específicamente en mediciones para el modelamiento de carga. En este sentido, se sugiera utilizar el algoritmo propuesto en [37], el cual se basa en aprendizaje adversarial. Es importante aclarar que el filtrado se realiza en los registros de mediciones reportados por una PMU almacenados en un PDC (concentrador de datos fasoriales) y a un centro de control; el filtrado no se refiere a los algoritmos internos de medición propios de una PMU, durante el proceso de medición.

### **5.4. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE CARGA ZIP**

Tal como se define en la metodología de investigación planteada en este trabajo y sintetizada en la Figura 12, la siguiente etapa consiste en ejecutar el proceso de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP, utilizando los registros de mediciones sincrofásicas sintéticos generados en las anteriores subsecciones, y con diferentes tasas de FPS.

### 5.4.1. Modelo de Carga ZIP

Para definir el proceso de identificación paramétrica es necesario primero determinar los modelos de carga ZIP de potencia activa y reactiva. Estos fueron detallados en la sección de marco teórico, sin embargo, se presentan nuevamente a continuación [4].

$$P = P_0 \left[ p_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (13)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_1 \leq 1 \\ 0 &\leq p_2 \leq 1 \\ 0 &\leq p_3 \leq 0.2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (16)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_1 \leq 1 \\ 0 &\leq p_2 \leq 1 \\ 0 &\leq p_3 \leq 0.2 \end{aligned} \quad (18)$$

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 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, tal como se observa en las ecuaciones (14) y (15).

Igual lógica para (16), (17) y (18), donde  $Q$  es la potencia reactiva.

### 5.4.2. Planteamiento del Problema de Identificación Paramétrica del Modelo de Carga ZIP

Una vez definidos los modelos, el proceso de identificación paramétrica para determinar los tres parámetros ( $p_1$ ,  $p_2$  y  $p_3$ ) del modelo de carga ZIP de potencia activa consiste en minimizar la función objetivo presentada en (19), la cual es el error cuadrático medio entre las mediciones reales de potencia activa, registradas por una PMU, y la potencia activa obtenida como respuesta del modelo ZIP, cumpliendo las restricciones (14) y (15). Es importante mencionar

que, en la ecuación (15),  $p_3$  tiene un límite teórico de 1, sin embargo, se lo limita a 0.2, de acuerdo con lo recomendado en [6].

Un proceso análogo se realiza para la identificación paramétrica del modelo de carga ZIP de potencia reactiva.

$$\min \left| \sum_{i=1}^n (P_i - P_{med_i})^2 \right| \quad (19)$$

### 5.4.3. Indicadores de desempeño

Antes de presentar el proceso integral de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP es fundamental primero definir ciertos indicadores de desempeño mediante los cuales se puede cuantificar la exactitud alcanzada durante el proceso de identificación paramétrica. Estos indicadores son tomados de acuerdo con lo recomendado en [6], dado que en dicho trabajo se investiga la temática de indicadores adecuados para el modelamiento de carga.

#### Error Cuadrático Medio Estandarizado ( $RMSE_{\Delta P}$ )

La Raíz del Error Cuadrático Medio Estandarizado es un indicador presentado en [6] y se formula en (20).

$$RMSE_{\Delta P} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{med_i})^2}{n}}}{\Delta P} \quad (20)$$

#### Error en la Estimación de Parámetros (EEP)

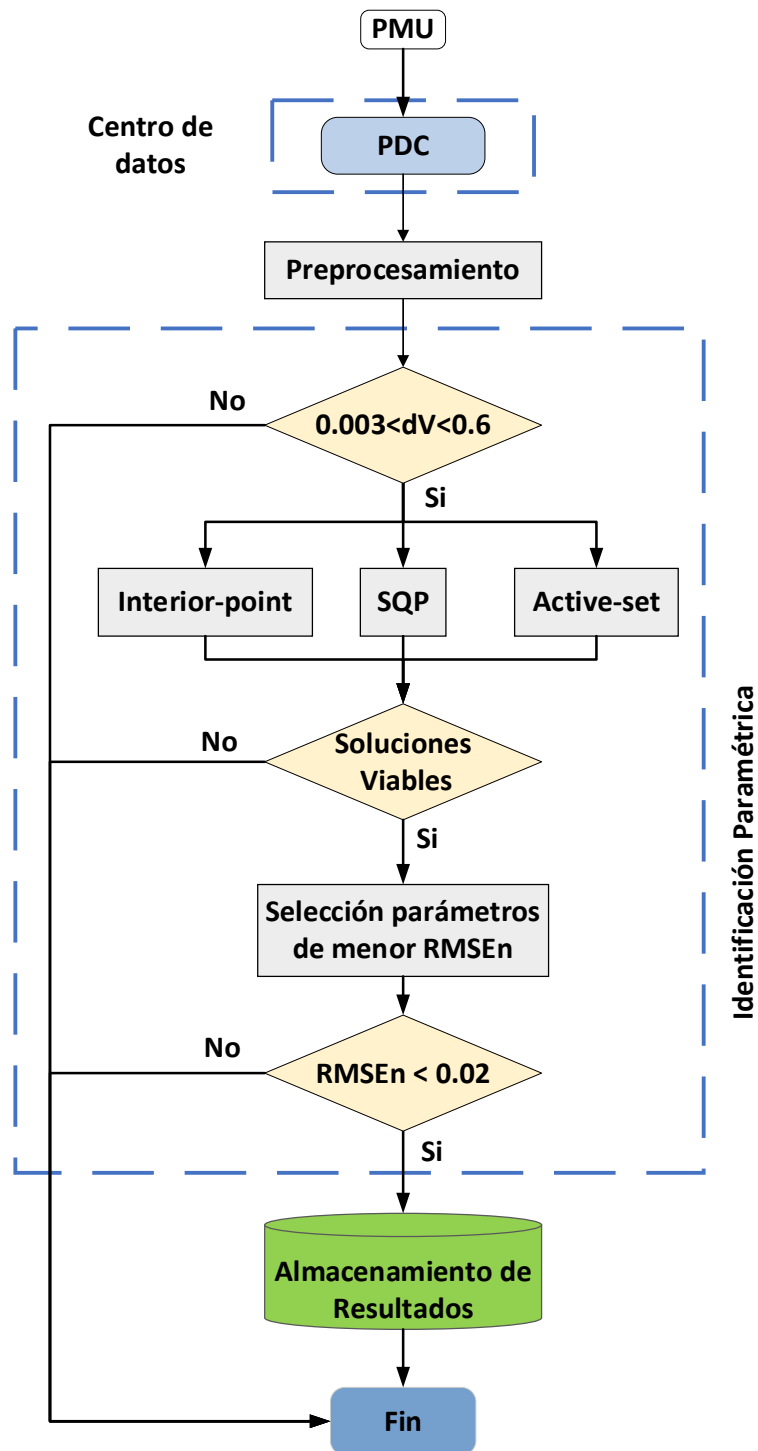
EEP se refiere a un indicador planteado en [6] que contabiliza el error alcanzado al estimar los parámetros  $p_1, p_2, p_3$  o  $q_1, q_2, q_3$  de (13) y (16). Calcular el EEP por medio de (21) y simboliza la distancia tridimensional entre los criterios reales (subíndice r) y estimados (subíndice e). Se usa una ecuación análoga a (21) para cuantificar el EEP del modelo ZIP de potencia reactiva (Q) [6].

$$EEP = \sqrt{(p_{1r} - p_{1e})^2 + (p_{2r} - p_{2e})^2 + (p_{3r} - p_{3e})^2} \quad (21)$$

#### 5.4.4. Proceso Integral de Identificación Paramétrica del Modelo de Carga ZIP

La Figura 13 presenta un diagrama de flujo del proceso de identificación paramétrica integral del modelo de carga ZIP utilizando mediciones sincrofasoriales reportadas por Unidades de Medición Fasorial (PMU). Este algoritmo ha sido tomado de [6] y se lo describe, con un enfoque hacia lo requerido en esta tesis, a continuación:

- El proceso inicia con una PMU que calcula y estima mediciones sincrofasoriales en una barra de carga de un sistema eléctrico de potencia SEP.
- Estas mediciones sincrofasoriales son reportadas o enviadas mediante canales de comunicación a un concentrador de datos fasoriales (PDC) ubicado en un centro de datos.
- Las mediciones sincrofasoriales son sometidas a una etapa de preprocesamiento específica para el modelamiento de carga, donde, entre otras cosas, se las filtra. En esta tesis se utiliza el algoritmo de filtrado planteado en [37], el cual se basa en aprendizaje adversarial, y el cual se referencia en la sección 5.3. Es importante aclarar que esta etapa de preprocesamiento es distinta a la etapa propia que realizan los PDC.
- Luego de la etapa de preprocesamiento se inicia con el proceso de identificación paramétrica. Este proceso se encuentra ampliamente detallado en [6] y empieza por la utilización de una ventana de registros de 10 segundos, en la cual se determina la magnitud de variación de tensión ( $\Delta V$ ). Si esta  $\Delta V$  se encuentra entre 0.003 y 0.6 pu se continua con el proceso, caso contrario, se espera por una nueva ventana de datos.
- Si las mediciones cumplen con la restricción precitada, se desarrolla el proceso de identificación paramétrica expuesto en la sección 5.4.2 con tres métodos de optimización, interior-point, SQP y active-set.
- Los resultados obtenidos de estos tres métodos de optimización se determinan si son viables o no, por ejemplo, si cumplieron las restricciones, los límites superiores e inferiores, entre otros asociados a los algoritmos de optimización.
- De las soluciones alcanzadas de los tres algoritmos de optimización se escoge el que alcance el menor  $RMSE_{\Delta P}$  ( $RMSE_{\Delta P}$  se observa en la Figura 13).
- Si el  $RMSE_{\Delta P}$  alcanzado es menor a 0.02 se colige que los parámetros estimados para el modelo de carga ZIP son lo suficientemente precisos, por lo que se almacenan sus resultados. De lo contrario, se concluye que el modelo de carga ZIP estimado no es lo suficientemente preciso y se descartan los resultados, esperando por una nueva ventana de datos sincrofasoriales, es decir, se reinicia el algoritmo.



**Figura 13.** Diagrama de flujo del algoritmo de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP.  
Fuente: [6].

## 5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez que se ejecuta el proceso de identificación paramétrica con todas las mediciones sintéticas sincrofásorales, y para todas las diferentes tasas de reporte (FPS), se comparan los resultados mediante los dos siguientes indicadores.

### Porcentaje de Soluciones Viables

Porcentaje de escenarios donde el algoritmo de identificación paramétrica encuentra una solución viable. Se entiende por solución viable al cumplimiento de las restricciones, los límites superiores e inferiores, entre otros asociados a los algoritmos de optimización, así como cumplir el  $RMSE_{\Delta P}$  indicado en la Figura 13. Se recomienda mostrar este indicador en tablas, comparando diferentes FPS y señales sin ruido, con ruido y filtradas.

### Error en la Estimación de Parámetros (EEP)

Se comparan los resultados bajo diferentes tasas FPS mediante el indicador EEP detallado en la sección 5.4.3. Se sugiere presentar este indicador en gráficas, clasificadas por magnitud de variación de tensión.

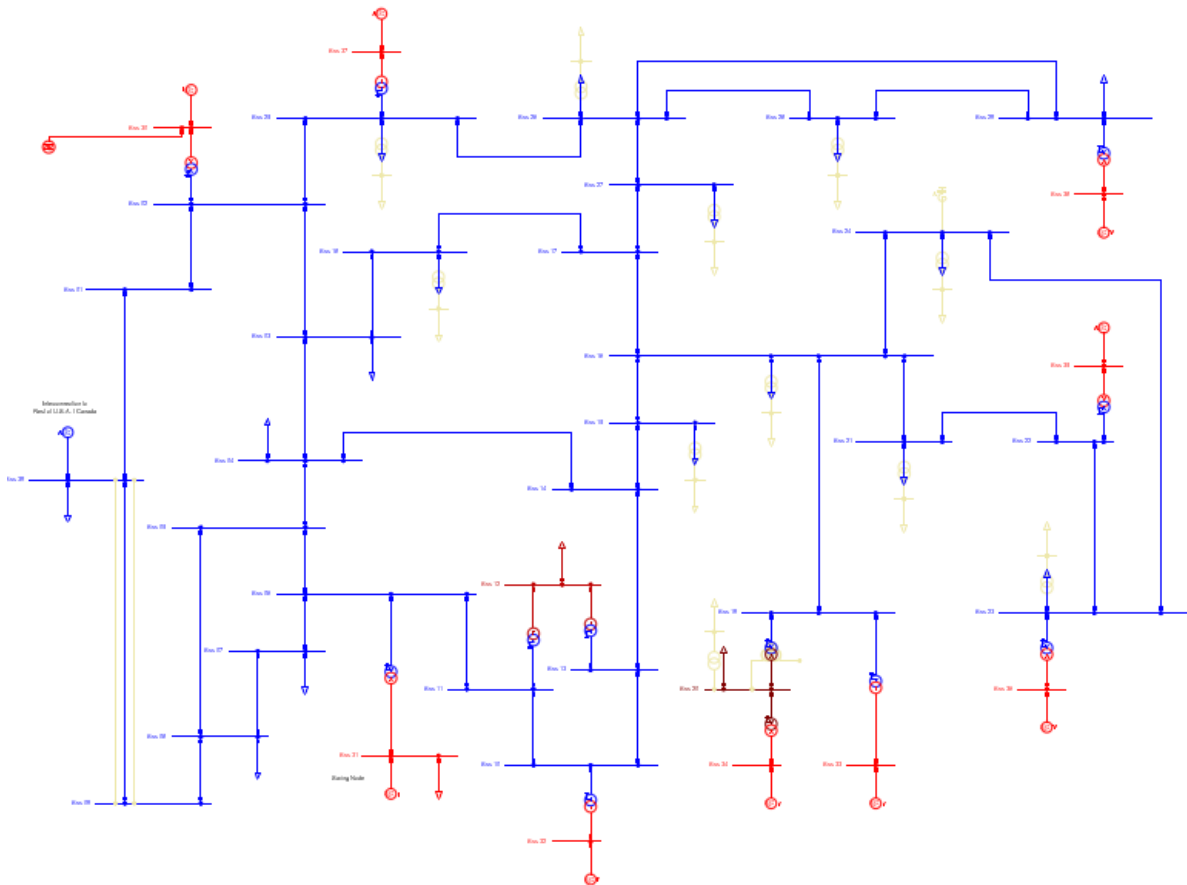
## 6. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Considerando que el objetivo de la investigación es evaluar el impacto de la tasa de reporte (FPS) de las Unidades de Medición Fasorial (PMU) en la precisión alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga ZIP, y que para ello se ha definido la metodología de investigación presentada en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se procede a desarrollar la primera etapa de dicha metodología, es decir, la generación de registros sintéticos, tal como se muestra en la Figura 12.

### 6.1. GENERACIÓN DE REGISTROS SINCRÓFASORIALES SINTÉTICOS

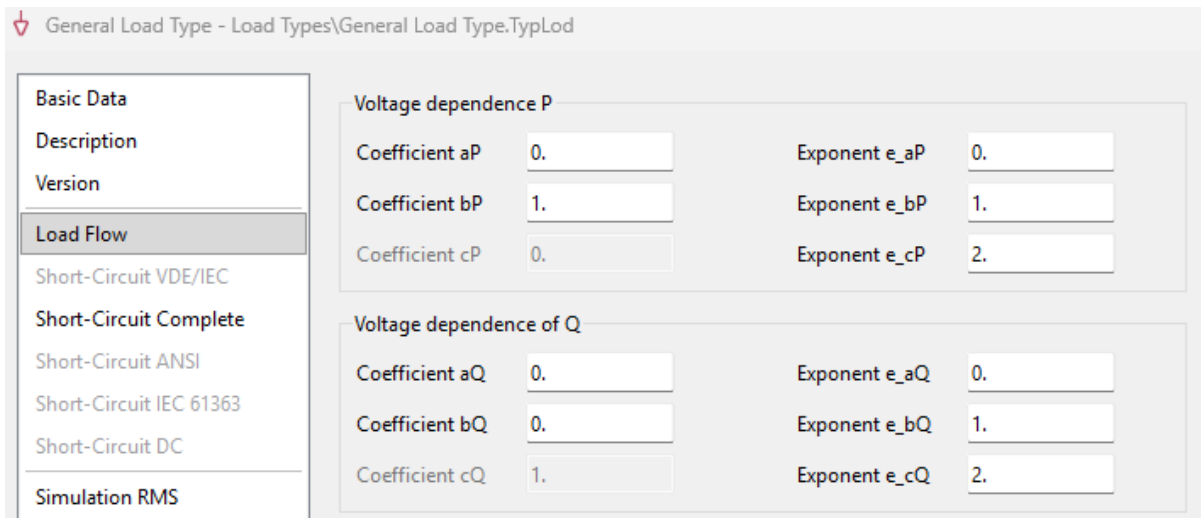
Tal como se describe en la metodología de la sección 5.1, el primer paso consiste en elegir un sistema de prueba. En este sentido, se ha elegido al sistema IEEE de 39 barras disponible en los ejemplos de PowerFactory, y cuyo diagrama se presenta en la Figura 14. Valga la aclaración, se ha elegido PowerFactory como el programa de simulación para el desarrollo de esta tesis.

El sistema IEEE de 39 barras está conformado por 10 generadores, uno de los cuales representa la interconexión con el resto del sistema eléctrico. Adicionalmente, el sistema incluye 46 líneas de transmisión y 19 cargas [38], estas últimas constituyendo el objeto de análisis de la presente investigación.



**Figura 14.** Sistema IEEE de 39 barras para el análisis de flujos de potencia.

Una vez que se ha elegido al sistema IEEE de 39 barras, el siguiente paso consiste en configurar las 19 cargas del sistema para que se desarrollen bajo el modelo definido para esta investigación que es el ZIP. Esto se realiza en las configuraciones de las cargas de PowerFactory, tal como se observa en la Figura 15. Para que el modelo se comporte del tipo ZIP, los exponentes mostrados en la Figura 15 deben tener los valores de 0, 1 y 2, tal como se observa en esta misma figura. La proporción para los tres tipos de comportamientos, impedancia constante ( $Z$ ), corriente constante ( $I$ ) y potencia constante ( $P$ ), se configuran en los coeficientes de la Figura 15, con un rango entre 0 y 1.



**Figura 15.** Configuración de parámetros para el modelo de carga ZIP.

Posterior a lo anterior, y de acuerdo con los pasos determinados en la metodología establecida en la sección 5.1, mediante Monte Carlo se generaron 11 mil diferentes escenarios de operación. Esto se ha realizado con programación DPL (DIgSILENT Programming Language), donde la lógica se detalla a continuación, y una captura del script se presenta en la Figura 16.

- En cada escenario, a cada una de las 19 cargas, se le asigna de manera aleatoria, y con función de densidad de probabilidad (PDF) uniforme, se genera su curva de demanda típica sea industrial, comercial residencial.
- Se generan y asignan de manera aleatoria, con función de densidad de probabilidad (PDF) uniforme, parámetros para el modelo ZIP de potencia activa y reactiva de cada carga. Estos valores para los parámetros tienen un rango entre cero y uno.
- Con función de densidad de probabilidad (PDF) uniforme se establece una hora del día, se toma la demanda de las curvas típicas a dicha hora y, se le asigna dicha demanda a cada carga del sistema IEEE de 39 barras. Es importante considerar que dichas curvas típicas se encuentran expresadas en por unidad, por lo que deben ser escaladas de acuerdo con la potencia máxima de demanda asociada a cada carga del sistema IEEE de 39 barras.
- Se ejecuta un flujo óptimo de potencia para establecer el despacho de cada generador y las condiciones iniciales del sistema.
- Con función de densidad de probabilidad (PDF) uniforme se crean eventos. Los tipos de eventos a considerar son: falla en líneas de transmisión, con ubicación de falla establecida de forma aleatoria con PDF uniforme; salida de un generador; cambio en el TAP de un transformador, con dirección y pasos establecidos de manera aleatoria y con

PDF uniforme; y, cambio en la demanda de una carga, con porcentaje de variación determinada de manera aleatoria y con una PDF de Weibull, de forma que la mayor probabilidad sea para cambios de pequeña magnitud en la demanda.

- Se simula este comportamiento en el dominio fasorial, del tipo RMS (simulación de transitorios electromecánicos), de 10 segundos de duración, para cada escenario de operación. Un ejemplo de estas simulaciones se presenta en la Figura 17.
- Se almacenan las simulaciones de las 19 barras de carga que conforman el sistema de prueba. Los registros guardados son: voltaje, potencia activa y potencia reactiva, que son los requeridos para el proceso de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP. En cuanto a la tasa de muestreo, se realiza con diferentes tasas de muestreo, de manera que se pueda evaluar el impacto de la tasa de FPS de las PMU en la estimación del modelo de carga ZIP. En este sentido, los registros se almacenan para FPS de 120, 60, 40, 30, 24, 15, 12 y 10 FPS (frames per second). Aunque estas tasas son diferentes a las establecidas en el estándar de sincrofasor IEEE C37.118 [39], hoy en día las PMU pueden reportar hasta 120 FPS, por lo cual, están en la capacidad de reportar a los FPS precitados. Un ejemplo de un archivo plano almacenado, para un escenario, se presenta en la Tabla 4.

```

Basic Options
Results
Script
Description
Version

Selecting a remote script destroys all current settings
Remote script
Code
!*****Definición de variables*****
int cases, n, Vul_status, Index, n_line, n_sym, n_load, n_trafo;
int tref, Dpl_time, Time_f, Time_o, error, pasos;
int pgen,pgmax,nmaq,sgnom,pgmin;
object Corto, Apertura, Genoutage, Loadev, Linecc, Genout, Loadcho, TAPev, TRAFout;
set S, G, L, T, Simulacion;
double random_el, Loc_shc, fault_type, Load_step;
double time_os, time_os1, time_os2, time_fr, time_v1, time_v11, time_v12, time_vul;
double Gmax_gov,reserva;
string lineap,cargap,genp,lineapl,cargapl,genpl,TRAp;
double temp, templ;

!*****
ClearOutputWindow();
Time_o=GetTime(4);!Solo para calcular al final cuanto se demora en ejecutar el scrip

!*****Obtención de elementos de la red*****
S = SEL.AllLines(); ! get all selected lines
G = SEL.AllSym(); ! get all selected synchronous machines
L = SEL.AllLoads(); ! get all selected loads
T = SEL.GetAll('ElmTr2'); ! get all selected trafo

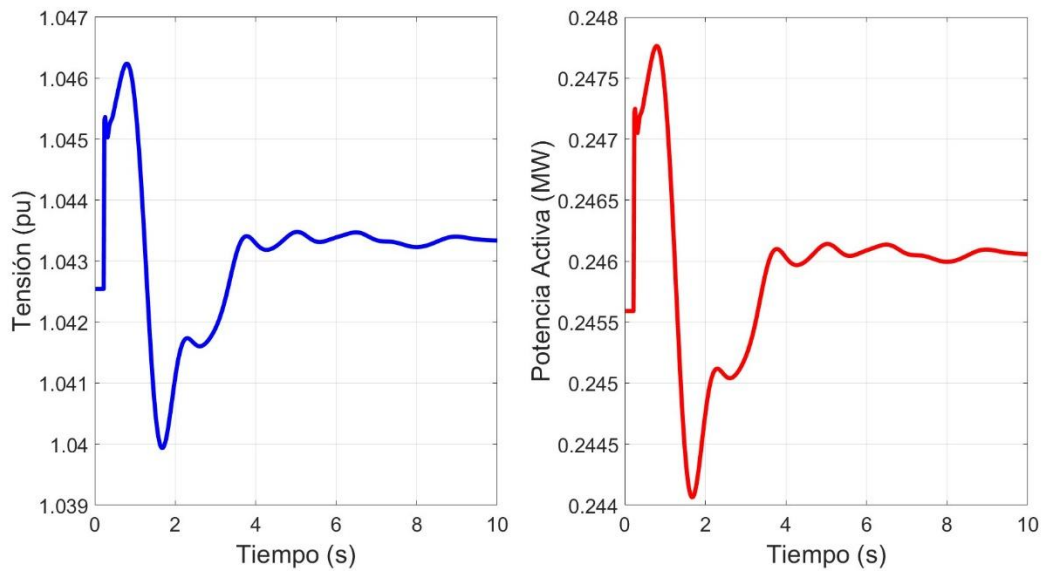
n_line = S.Count(); ! deberian ser 35
n_sym = G.Count(); ! deberian ser 10
n_load = L.Count(); ! deberian ser 19
n_trafo = T.Count();

printf('%s: %d %s','Number of Lines is',n_line,'of 35');
printf('%s: %d %s','Number of Generators is',n_sym,'of 10');
printf('%s: %d %s','Number of Loads is',n_load,'of 19');
printf('%s: %d %s','Number of Trafos is',n_trafo,'of 12');

!*****
MOD OVR READ ONLY Ln 1, Col 1

```

Figura 16. Script de programación DPL para generación de registros sintéticos.



**Figura 17.** Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras.

**Tabla 4.** Ejemplo de archivo plano almacenado para un escenario de operación.

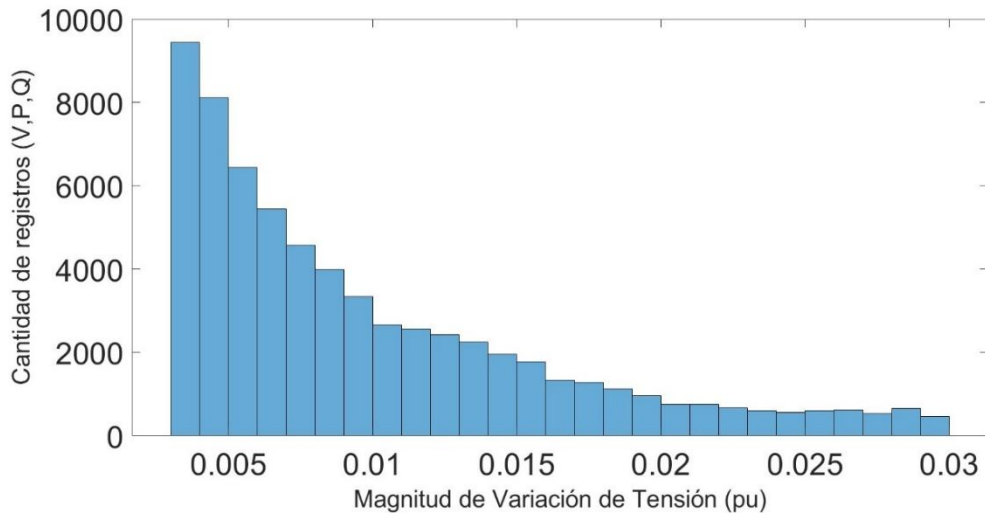
Results	Lod03	Lod03	Lod03	Lod04	Lod04	Lod04	...
Time in s	U, Magnitude in kV	Active Power in MW	Reactive Power in Mvar	U, Magnitude in kV	Active Power in MW	Reactive Power in Mvar	...
0	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.008333	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.016667	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.025	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.033333	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.041667	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
0.05	207.655302	93.813728	0.520442	205.88693	297.303253	21.248922	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
9.969792	207.817732	93.882728	0.521103	205.870518	297.281963	21.246497	...
9.978125	207.817727	93.882726	0.521104	205.870578	297.282039	21.246506	...
9.986458	207.817726	93.882726	0.521104	205.87064	297.282119	21.246515	...
9.994792	207.817727	93.882726	0.521104	205.870704	297.282202	21.246524	...
10	207.81773	93.882727	0.521104	205.870745	297.282255	21.246531	...

## 6.2. PREPROCESAMIENTO

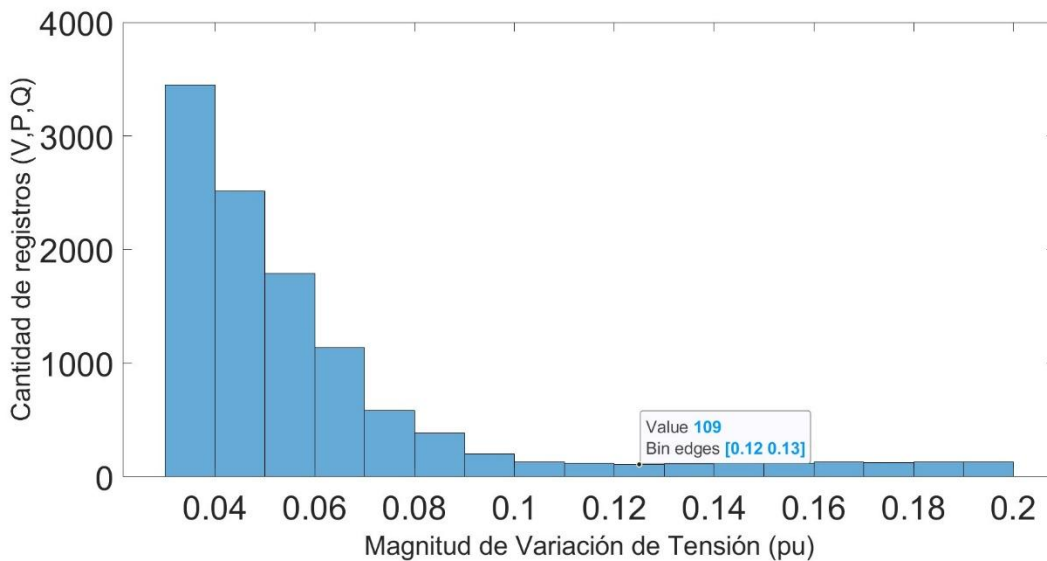
Una vez que se cuenta con mediciones sincrofasoriales sintéticas, la siguiente etapa, tal como se observa en la Figura 12, es el preprocesamiento de estos registros. De acuerdo con lo establecido en la sección 5.2, se realizaron las siguientes acciones:

- Se eliminaron todos los registros (cada registro contiene mediciones sincrofasoriales de tensión, potencia activa y potencia reactiva de 10 segundos de duración) que contenían datos vacíos, faltantes, errores, o similares. Esto se realizó con programación en el software MATLAB.
- Se eliminaron todos los registros de dos barras de carga del sistema IEEE 39, puesto que en dichas barras se cuenta también con generación. Esto se debe a que los modelos de carga relacionan generalmente los cambios en la tensión con las variaciones en la demanda. Esto se realizó con programación en el software MATLAB.
- Se eliminaron todos los registros que contengan una magnitud de caída de tensión ( $\Delta V$ ) inferior a 0.003 pu. Esto se realiza puesto que en [7] se recomienda utilizar registros con  $\Delta V > 0.003 \text{ pu}$  con el fin de estimar con suficiente precisión los parámetros del modelo de carga ZIP. Esto se realizó con programación en el software MATLAB.
- Se eliminaron todos los registros que contenían una magnitud de variación de tensión ( $\Delta V$ ) superior a 0.2 pu. Aunque en [6] se recomienda utilizar registros con  $\Delta V < 0.6 \text{ pu}$ , en esta investigación se utilizan exclusivamente registros con  $\Delta V < 0.2 \text{ pu}$ , dado que en la práctica es sumamente desafiante contar con mediciones con variaciones de tensión superiores a este valor, puesto que generalmente son colapsos parciales o totales. Esto se realizó con programación en el software MATLAB.
- Se eliminaron todos los registros que contenían simulaciones de colapsos. Esto se realizó con programación en el software MATLAB y con verificación visual, sin embargo, dado que previamente se eliminaron los escenarios con variaciones de tensión ( $\Delta V$ ) superiores a 0.2 pu, no se encontraron colapsos.

Una vez realizado lo anterior, los registros resultantes, clasificados por magnitud de variación de tensión  $\Delta V$ , se muestran en la Figura 18 y Figura 19, para datos tipo ambiente y tipo RingDown, respectivamente. Al analizar estas dos figuras se observa que la mínima cantidad de registros se da para variaciones de tensión entre 0.12 y 0.13 pu (ver Figura 19), y es de 109 registros. Con el objeto de prevenir sesgos posteriores en los resultados, y dado que la precisión con la que se estiman los parámetros del modelo de carga ZIP tiene una relación directamente proporcional con la desviación de tensión [6], se homogenizó la cantidad de registro por  $\Delta V$  a 109, para todas las barras de la Figura 18 y Figura 19. Finalmente, dado que se dispone de 44 diferentes  $\Delta V$  (barras de estas dos figuras), se obtiene un total de  $44 \times 109 = 4796$  registros, para cada una de las tasas de FPS consideradas (120, 60, 40, 30, 24, 15, 12 y 10 FPS).



**Figura 18.** Cantidad de registros clasificados por magnitud de variación de tensión – datos tipo ambiente.

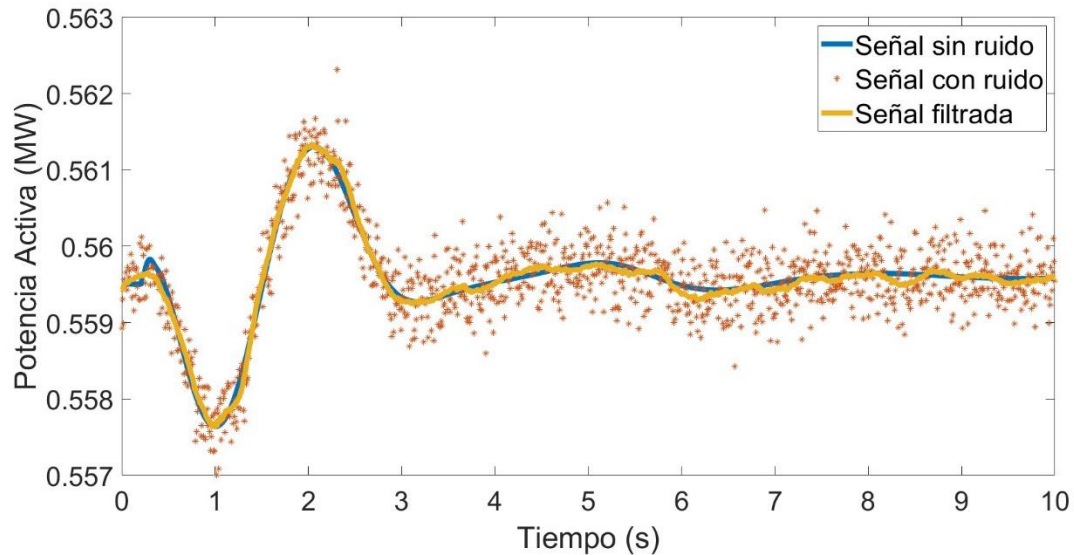


**Figura 19.** Cantidad de registros clasificados por magnitud de variación de tensión – datos tipo RingDown.

### 6.3. ADICIÓN DE RUIDO Y ETAPA DE FILTRADO

De la sección anterior se cuenta con registros de mediciones sincrofasoriales sin ruido, debido a que son generadas mediante simulación. Con la finalidad de que dichas mediciones sean similares a las reportadas por la PMU de uso real, se les añade ruido blanco gaussiano, con los valores de SNR mostrados en la ecuación (12), tal como se indica en la sección 5.3. Un ejemplo de medición de potencia activa (uno de los 4796 registros disponibles precitados), añadida ruido, a 120 FPS, se presenta en la Figura 20; este escenario de operación corresponde a registros tomados en la carga de la barra 3, cuando sucede, como evento aleatorio, una variación de carga de 2.1% en la barra 18.

Una vez que las señales contienen ruido, es decir, son similares a las reportadas por una PMU, se las filtra, con el algoritmo presentado en [37], el cual se basa en aprendizaje adversarial. Un ejemplo de medición sincrofasorial sintética, correspondiente a potencia activa, filtrada, a 120 FPS, se presenta en la misma Figura 20.



**Figura 20.** Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras, añadida ruido.

En la Figura 20 es importante mencionar que, las variaciones de potencia que se observan corresponden a la respuesta del modelo de carga ZIP de la carga de la barra 3 ante las variaciones de voltaje en la misma barra 3. Las variaciones de voltaje se deben a un cambio de 2.1% en la demanda de la carga de la barra 18 del modelo IEEE de 39 barras.

Otro ejemplo de simulaciones RMS del sistema IEEE de 39 barras se presenta en la Figura 21. Esta figura representa la respuesta del modelo ZIP de la carga de la barra 26 ante una variación de voltaje en la misma barra, como consecuencia de una falla en la línea que conecta las barra 26 con la 28. Dado que este evento es de mayor magnitud, resulta en una mayor variación del voltaje en la barra 26 y, por tanto, en la potencia demandada por la carga 26. Es importante notar que en la Figura 21 el ruido no juega un papel fundamental, pues su magnitud en comparación de la magnitud de variación de potencia es mínima.



**Figura 21.** Ejemplo de una simulación RMS del sistema IEEE de 39 barras, añadida ruido, bajo un evento de gran magnitud.

#### 6.4. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA

Una vez generadas las mediciones sincrofatorias sintéticas, se ejecutó el algoritmo de identificación paramétrica del modelo de carga ZIP, conforme a lo descrito en la sección 5.4.4 y representado en la Figura 13. El Script de identificación paramétrica se adjunta en el ANEXO 1. Este proceso se aplicó de manera independiente a cada uno de los 4796 registros disponibles y se replicó para las bases de datos (cada base de datos contiene 4796 registros, donde cada registro a su vez contiene simulaciones de 10 segundos de voltaje, potencia activa y potencia reactiva) que contienen mediciones sin ruido, con ruido y con filtro. Adicionalmente, el análisis se repitió para cada una de las tasas de reporte consideradas, correspondientes a 120, 60, 40, 30, 24, 15, 12 y 10 FPS. En total, se ejecutó el proceso de identificación paramétrica  $4796 \times 3 \times 8 = 115104$  veces. Se presenta en la Figura 22 el ejemplo de los resultados obtenidos donde cada fila corresponde a los resultados de uno de los 4796 registros disponibles y, por ejemplo, se observan los indicadores  $RMSE_{\Delta P}$  y EEP (Error en la Estimación de Parámetros) alcanzados.

	1	2	3	4	5	6			7		8	
	id_esc	RMSE_dPQ	R2	EEP	P0_est	Param_est			Param_orig		dV_pu	
1	294	0.0476	0.9159	1.5001	75.5915	74.4872	23.7499	1.7630	73	26	1	0.0063
2	341	0.0460	0.9594	10.6783	26.6610	73.0837	26.0174	0.8989	88	10	2	0.0077
3	442	0.0416	0.9659	5.3441	89.3797	75.6485	18.0161	6.3354	81	10	9	0.0075
4	443	0.0470	0.9128	3.3600	65.6042	54.9600	36.1491	8.8908	60	36	4	0.0078
5	445	0.0498	0.9573	4.8001	23.0976	55.5676	34.2001	10.2322	59	27	14.0000	0.0083
6	450	0.0462	0.9399	1.1654	55.1630	86.2519	11.2851	2.4630	88	10	2	0.0075
7	453	0.0462	0.9468	12.2304	40.9967	78.5351	20.3456	1.1193	94	2	4	0.0084
8	454	0.0452	0.9493	2.5851	44.6703	72.1224	27.7569	0.1207	76	24	0	0.0080
9	456	0.0496	0.9435	1.1661	72.7300	68.2509	26.9531	4.7960	70	26	4	0.0081
10	457	0.0484	0.9422	11.5125	53.9553	63.4176	35.2687	1.3137	75	18	7.0000	0.0076
11	459	0.0491	0.9283	6.4646	47.2059	86.3519	12.6969	0.9512	96	3	1	0.0073
12	466	0.0488	0.9598	17.5746	15.1209	70.5768	27.3620	2.0613	86	1	13	0.0078
13	477	0.0433	0.9601	10.8046	43.1099	79.8284	17.2069	2.9646	88	1	11	0.0081
14	480	0.0431	0.9621	3.1114	20.4060	78.2782	18.6671	3.0548	81	14.0000	5	0.0080
15	482	0.0427	0.9091	3.1844	26.6770	85.6313	13.2234	1.1453	82	18	0	0.0078
16	484	0.0490	0.9368	5.9414	34.6266	70.4163	26.9121	2.6715	76	18	6	0.0080
17	486	0.0498	0.9519	8.1550	62.8384	86.9234	12.2325	0.8441	91	0	9	0.0074
18	488	0.0429	0.9398	15.4174	55.0307	74.3980	25.1261	0.4759	90	2	8	0.0080
19	489	0.0475	0.9669	4.4472	68.1557	81.5324	16.6709	1.7967	86	10	4	0.0087
20	494	0.0464	0.9609	8.9097	18.3958	60.6527	30.6354	8.7119	54	44	2	0.0078
21	496	0.0441	0.9485	6.3027	62.9769	59.2856	32.5460	8.1684	58.0000	42	0	0.0081
22	500	0.0497	0.9633	1.3701	16.3110	87.9713	11.0552	0.9735	90	9	1	0.0073

**Figura 22.** Ejemplo de resultados del proceso de identificación paramétrica.

## 6.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez que se ha ejecutado el proceso de identificación paramétrica para todas las mediciones sintéticas sincrofásicas, sin ruido, con ruido y filtradas, y para todas las diferentes tasas de reporte (FPS), se procede a analizar los resultados.

En la Tabla 5 y Tabla 6 se presenta el porcentaje de soluciones viables que se ha obtenido para cada tasa de reporte y para registros sin ruido, con ruido y filtrados, al estimar el modelo ZIP de potencia activa y reactiva, respectivamente. Se entiende por solución viable a cuando el algoritmo de optimización converge a una solución y el valor de  $RMSE_{\Delta P} < 0.02$ , de acuerdo con lo determinado en el algoritmo de identificación paramétrica de la Figura 13.

**Tabla 5.** Porcentaje de escenarios en los que se alcanza una solución viable – potencia activa.

FPS	Sin Ruido	Con Ruido	Con filtro
120	100%	81%	93%
60	100%	73%	93%
50	99%	60%	85%
30	95%	57%	78%
24	92%	55%	77%
20	89%	54%	75%
15	85%	52%	74%
12	81%	52%	74%
10	78%	52%	74%

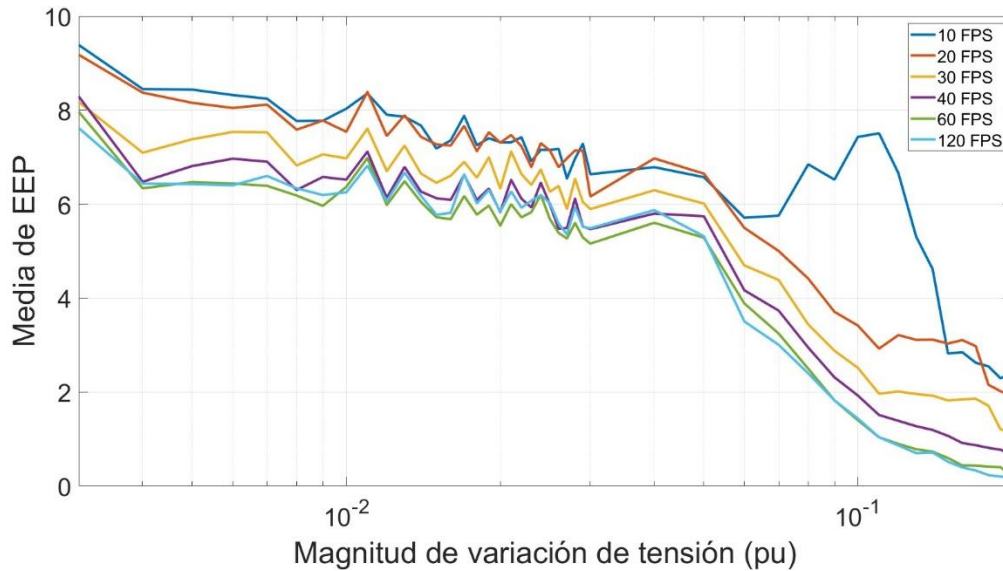
**Tabla 6.** Porcentaje de escenarios en los que se alcanza una solución viable – potencia reactiva.

<b>FPS</b>	<b>Sin Ruido</b>	<b>Con Ruido</b>	<b>Con filtro</b>
120	94%	73%	84%
60	91%	65%	84%
50	92%	52%	79%
30	86%	52%	71%
24	85%	46%	68%
20	85%	45%	67%
15	80%	43%	68%
12	74%	43%	65%
10	75%	47%	69%

Al analizar la Tabla 5 y Tabla 6 se concluye que la tasa de reporte impacta en la cantidad de veces que el algoritmo de identificación paramétrica logra encontrar una solución viable. La relación es directamente proporcional, es decir, a mayor tasa de FPS, mayor es la cantidad de escenarios en los que el algoritmo encuentra una solución viable, y viceversa.

Por otro lado, la Figura 23 presenta el indicador EEP (Error en la Estimación de Parámetros) clasificado por magnitud de variación de tensión, al utilizar señales sin ruido y al estimar el modelo ZIP de potencia reactiva. Una gráfica muy similar se obtiene para el modelo ZIP de potencia activa. Con colores diferentes en la Figura 23 se distinguen los valores de EEP alcanzados para cada tasa de FPS establecida.

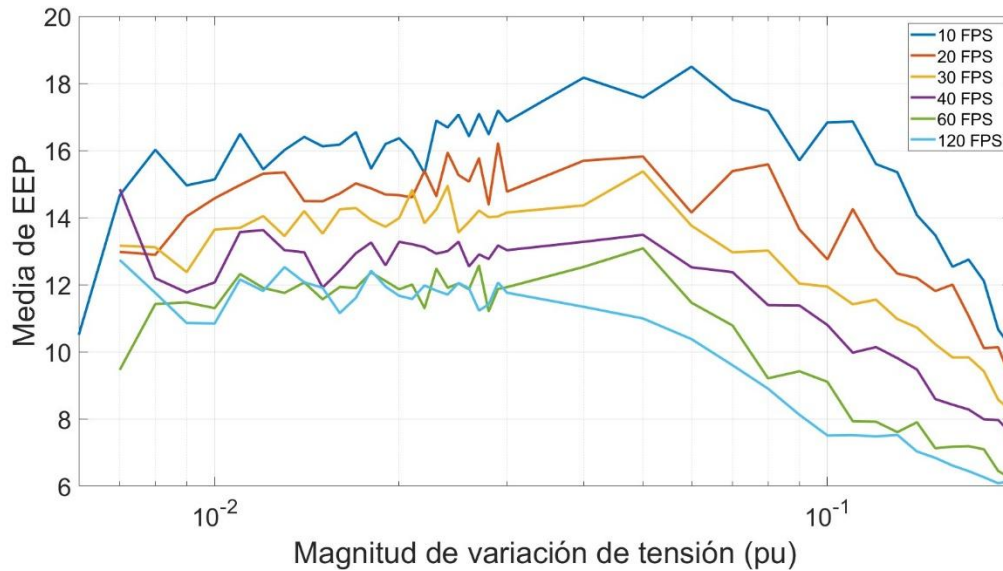
Al analizar la Figura 23 se observa que la tasa de FPS tiene un impacto mínimo en el EEP alcanzado, es decir, con señales sin ruido la tasa de FPS no repercute considerablemente en la precisión alcanzada. Lo que sí, es importante notar que con una tasa de 10 FPS el EEP es bastante superior para magnitudes de variación de tensión elevadas, mayores a 0.06 pu, por lo que no se recomienda estimar el modelo ZIP con una tasa de 10 FPS.



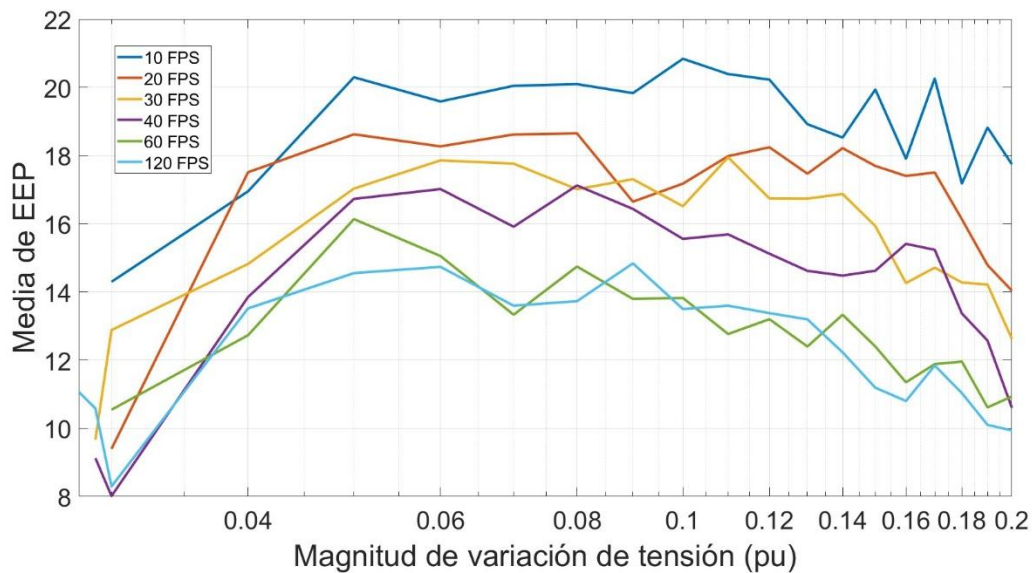
**Figura 23.** EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros sin ruidos.

Similar a lo anterior, en la Figura 24 y Figura 25 se considera el indicador EEP (Error en la Estimación de Parámetros) clasificado por magnitud de variación de tensión, pero al utilizar señales con ruido y, al estimar el modelo ZIP de potencia activa y reactiva, respetivamente.

Al analizar la Figura 24 y Figura 25 se evidencia que la tasa de FPS tiene un impacto significativo en el EEP alcanzado. En particular, para señales con ruido la tasa de FPS repercute considerablemente en la precisión alcanzada. A pesar de lo anterior, estos resultados no pueden considerarse concluyentes, ya que en la Tabla 5 y Tabla 6 el porcentaje de escenarios en los que se identifica una solución viable es reducido. Además, en ambas figuras se observa que los EEP resultan inusualmente bajos cuando la magnitud de la variación de tensión es pequeña, comportamiento que contradice la lógica esperada. Esto permite inferir que, para bajas magnitudes de variación de tensión, existen muy pocos escenarios en los que el algoritmo de identificación paramétrica logra converger hacia una solución válida.



**Figura 24.** EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia activa y utilizando registros con ruidos.

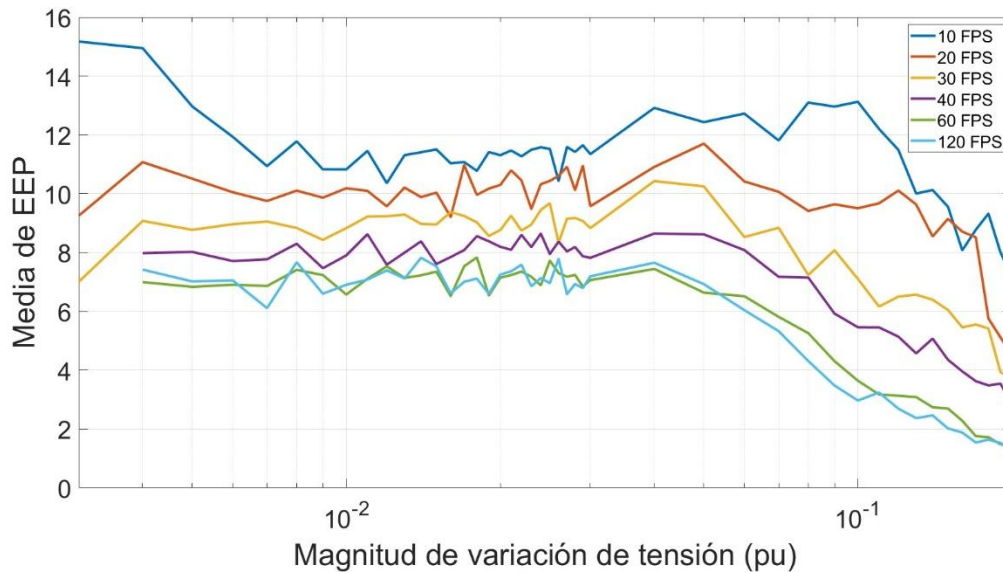


**Figura 25.** EEP en magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros con ruidos.

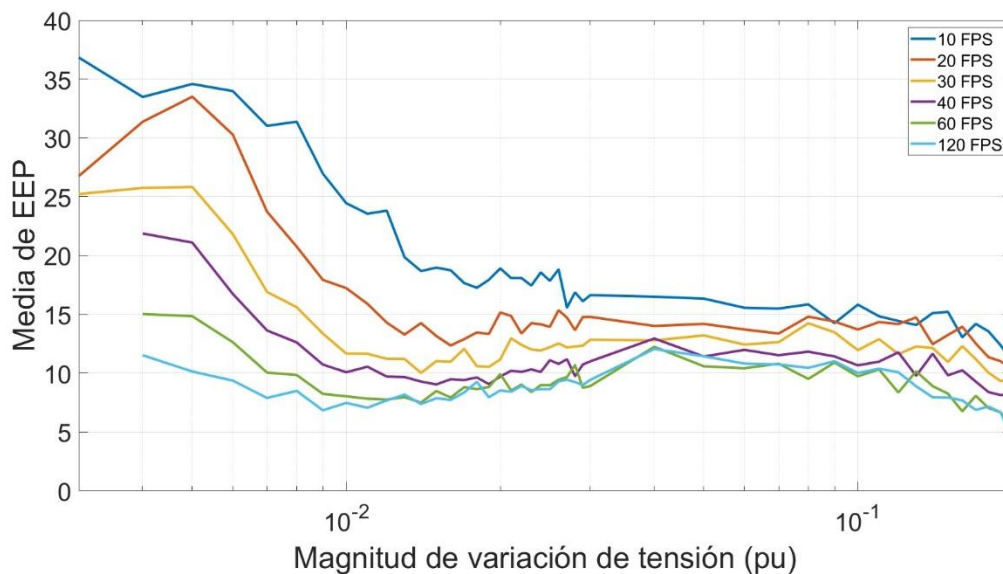
Similar a lo anterior, en la Figura 26 y Figura 27 se presenta el indicador EEP (Error en la Estimación de Parámetros) clasificado por magnitud de variación de tensión, pero al utilizar señales filtradas y, al estimar el modelo ZIP de potencia activa y reactiva, respectivamente.

Al analizar la Figura 26 y Figura 27, correspondiente a señales filtradas, tal como se emplearía en una metodología de identificación paramétrica automática, los resultados se vuelven concluyentes y evidencian con claridad que la tasa de FPS influye de manera significativa en el EEP obtenido. En particular, en la Figura 27, asociada al modelo ZIP de potencia reactiva,

se observa que una tasa de FPS elevada permite estimar con mayor precisión los parámetros del modelo incluso cuando las mediciones sincrofatorias presentan variaciones de tensión de pequeña magnitud. Considerando que, en condiciones reales de operación, un sistema eléctrico de potencia permanece la mayor parte del tiempo dentro de rangos de variación reducida, la tasa de reporte de los FPS adquiere un rol determinante en la precisión alcanzada en la estimación del modelo ZIP.



**Figura 26.** EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia activa y utilizando registros filtrados.



**Figura 27.** EEP por magnitud de variación de tensión para el modelo ZIP de potencia reactiva y utilizando registros filtrados.

En función de todo el análisis realizado en esta sección se concluye que la tasa de FPS tiene un impacto considerable en la precisión alcanzada al estimar los componentes del modelo polinómico. En particular se destaca que, dado que en el mundo real las metodologías de identificación paramétrica utilizan previamente etapas de filtrado, la tasa de FPS tiene un impacto considerable al emplear mediciones con pequeñas variaciones, que son las de mayor disponibilidad en un sistema, puesto que normalmente no se encuentran sometidos a fallas. Adicional a lo anterior, no se recomienda utilizar tasas menores a 60 FPS para estimar el modelo ZIP de potencia reactiva con mediciones sincrofasoriales de pequeña magnitud; y para el modelo de potencia activa no se recomienda utilizar FPS menores a 30.

## **6.6. ANÁLISIS ECONÓMICO**

Desde la perspectiva económica, incrementar la tasa de reportes por segundo (FPS) de una PMU no genera costos adicionales directos, ya que esta variación corresponde únicamente a una configuración interna del dispositivo. Las PMU cumplen con los estándares IEEE Std C37.118.1a-2014 y IEC/IEEE 60255-118-1:2018, los cuales establecen que estos equipos pueden operar a diferentes tasas de muestreo sin requerir modificaciones de hardware

Sin embargo, al configurar una PMU para transmitir a una mayor tasa de FPS, los Concentradores de Datos Fasoriales (PDC) deben procesar y almacenar un volumen superior de información. Esto implica una mayor demanda de capacidad de almacenamiento. Aun así, este requerimiento adicional no se traduce necesariamente en un incremento de costos, debido a que los sistemas WAMS están diseñados para operar con almacenamiento rotativo: los datos nuevos sobrescriben automáticamente los registros más antiguos, lo cual constituye el comportamiento normal y esperado de estos sistemas.

Finalmente, la validación de los modelos de carga mejora de manera directa la confiabilidad de las simulaciones, ya que una representación más precisa del comportamiento de la red reduce la probabilidad de eventos que puedan derivar en interrupciones del suministro. Esta mejora tiene un impacto económico claro: la energía no suministrada en Ecuador se valora en aproximadamente 1,54 USD/kWh, son valores establecidos en las Normas de Calidad del Servicio Eléctrico y Sanciones de ARCONEL, utilizadas para la valoración del Costo de la Energía No Suministrada (CENS). En este sentido, si un mayor número de FPS contribuye a validar con mayor precisión los modelos de carga, se reduce la energía no suministrada anual del sistema, disminuyendo así las pérdidas económicas de todo un país.

## 7. CONCLUSIONES

En esta tesis se ha evaluado el impacto que tiene la tasa de FPS (frames per second) de las Unidades de Medición Fasorial (FPS) en la precisión alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga ZIP. A partir del desarrollo metodológico y del análisis de resultados, se establecen las siguientes conclusiones:

- La generación de mediciones sincrofasoriales sintéticas con diferentes FPS permitió obtener un conjunto de datos representativo y consistente para múltiples y vastos escenarios de operación. Tras aplicar preprocesamiento, adición de ruido y filtrado, se dispone de registros adecuados y confiables que sirven como base para evaluar el impacto de la tasa de reporte en la estimación del modelo de carga ZIP.
- La tasa de FPS influye de manera significativa en la exactitud alcanzada al estimar los parámetros del modelo de carga ZIP. A mayores tasas de reporte, la identificación paramétrica presenta mejores niveles de exactitud, y viceversa.
- Cuando se emplean datos tipo ambiente ( $\Delta V \leq 0.03 pu$ ), la sensibilidad a los FPS es aún mayor. En estas condiciones, incluso pequeñas variaciones en la tasa de reporte generan diferencias notables en la exactitud de la estimación, lo que evidencia la importancia de disponer de mediciones de alta resolución temporal.
- Para la estimación del modelo ZIP de potencia activa, se recomienda utilizar mediciones sincrofasoriales con una tasa mínima de 30 FPS. Este valor garantiza niveles adecuados en la precisión de estimación de los valores de los parámetros del modelo de carga.
- Por otro lado, para estimar el modelo ZIP de potencia reactiva se recomienda utilizar mediciones sincrofasoriales con al menos una tasa de reporte de 60 FPS.

## 8. REFERENCIAS

- [1] NERC, “Power System Model Validation, A White Paper by the NERC Model Validation Task Force of the Transmission Issues Subcommittee,” 2010.
- [2] M. Mohammed, A. Abdulkarim, A. S. Abubakar, A. B. Kunya, and Y. Jibril, “Load modeling techniques in distribution networks: a review,” *Journal of Applied Materials and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 63–70, 2020.
- [3] 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.
- [4] J. V Milanović *et al.*, “Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks,” 2014, *CIGRE WG C4.605*.
- [5] J. V. Milanović, K. Yamashita, S. Martínez Villanueva, S. Ž. Djokić, and L. M. Korunović, “International industry practice on power system load modeling,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3038–3046, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2231969.
- [6] 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 Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Juan, Argentina*, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9940010.
- [7] J. R. Constante and G. Colomé, “Estado del Arte y Tendencias en el Modelamiento de Carga,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 18, no. 2, pp. 1–12, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.475.
- [8] Diego Ernesto Echeverría Jurado, “Evaluación y mejora de la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos en tiempo real utilizando PMUs,” Universidad Nacional de San Juan, 2020. Accessed: Nov. 30, 2025. [Online]. Available: <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/10408385>
- [9] “IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems,” 2006. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.99376.
- [10] EPRI, “Enhanced Load Modeling: Leveraging Expanded Monitoring and Metering,” 2019.
- [11] NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY CORPORATION, “Dynamic Load Modeling, Technical Reference Document,” Atlanta, Nov. 2025. Accessed: Nov. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.nerc.com/globalassets/who-we-are/standing-committees/rstc/0-rstc-agenda-links/20251210\\_1\\_14\\_draft\\_dynamic-load-modeling-technical-reference\\_2025\\_8\\_19\\_lmwg\\_approved\\_rev.pdf](https://www.nerc.com/globalassets/who-we-are/standing-committees/rstc/0-rstc-agenda-links/20251210_1_14_draft_dynamic-load-modeling-technical-reference_2025_8_19_lmwg_approved_rev.pdf)
- [12] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, and W. A. Mittelstadt, “Model validation for the august 10,1996 wsc system outage,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 967–979, 1999, doi: 10.1109/59.780909.
- [13] S. R. Salkuti, A. R. Abhyankar, and P. R. Bijwe, “Multi-objective day-ahead real power market clearing with voltage dependent load models,” *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 12, no. 4, 2011.

- [14] V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Capacitor Allocation in Radial Distribution System with Time Varying ZIP Load Model and Energy Savings," *Procedia Comput Sci*, vol. 70, pp. 377–383, 2015.
- [15] Juan Carlos Vargas Rubio, "DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR DE DATOS DE SINCRÓFASORES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE C37.118.2," UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2017.
- [16] L. de Alba Carlos Alberto, A.-Z. Federico, and O.-M. Víctor Hugo, "Ingeniería Investigación y tecnología volumen XIX (número 2), abril-junio 2018 195-207 Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de laboratorio para sistemas eléctricos de potencia Implementation of a Wide Area Monitoring System o...," doi: 10.22201/fi.25940732e.2018.19n2.017.
- [17] R. Gore and M. Kande, "Analysis of Wide Area Monitoring System architectures," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, vol. 2015-June, no. June, pp. 1269–1274, Jun. 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125272.
- [18] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, "Panorama Eléctrico".
- [19] K. Soledad and C. Ortiz, "Caracterización de Armónicos en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) a partir de información del Sistema de Monitoreo de Área Extendida (WAMS).," May 2015, Accessed: Jan. 03, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10595>
- [20] G. F. Tuza Tacuri, "Análisis del cálculo de sincrofasores durante transitorios en las Unidades De Medición Fasorial," Oct. 2018, Accessed: Jan. 03, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20734>
- [21] "C37.118.1-2011 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems."
- [22] C. WG C4.605, *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*, no. February. 2014.
- [23] "ESTABILIDAD TRANSITORIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO MODELOS DE CARGA ESTÁTICO-DINÁMICOS".
- [24] J. Matevosiyán, A. Gaikwad, and C. Members, "Modelling and Aggregation of Loads," 2014.
- [25] H. Ren, N. N. Schulz, V. Krishnan, and Y. Zhang, "Online Static Load Model Estimation in Distribution Systems," *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, BC, Canada*, pp. 153–158, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781530.
- [26] G. A. Barzegkar-Ntovom, T. A. Papadopoulos, and E. O. Kontis, "Robust Framework for Online Parameter Estimation of Dynamic Equivalent Models Using Measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2380–2389, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3033385.
- [27] 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 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chiang Mai, Thailand*, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1109/iEECON48109.2020.229509.

- [28] P. Regulski, D. S. Vilchis-Rodriguez, S. Djurović, and V. Terzija, “Estimation of Composite Load Model Parameters Using an Improved Particle Swarm Optimization Method,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 553–560, 2015.
- [29] H. Li *et al.*, “Bayesian Estimation on Load Model Coefficients of ZIP and Induction Motor Model,” *Energies 2019, Vol. 12*, vol. 12, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/EN12030547.
- [30] C. Xing, X. Xi, X. He, and C. Deng, “Parameter identification method of load modeling based on improved dung beetle optimizer algorithm,” *Front Energy Res*, vol. 12, p. 1415796, Aug. 2024, doi: 10.3389/FENRG.2024.1415796/BIBTEX.
- [31] J. Lv, M. Pawlak, U. D. Annakkage, and B. Bagen, “Statistical testing for load models using measured data,” *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 66–72, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.EPSR.2018.05.026.
- [32] C. E. Yáñez Yáñez, “Caracterización de la carga eléctrica por medio de fasores de voltaje y corriente,” 2017, Accessed: Jan. 04, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14291>
- [33] H. Ren, N. N. Schulz, V. Krishnan, and Y. Zhang, “Online Static Load Model Estimation in Distribution Systems,” *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2019-June, pp. 153–158, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781530.
- [34] Tushar, S. Pandey, A. K. Srivastava, P. Markham, and M. Patel, “Online Estimation of Steady-State Load Models Considering Data Anomalies,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 1, pp. 712–721, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2753719.
- [35] M. Brown, M. Biswal, S. Brahma, S. J. Ranade, and H. Cao, “Characterizing and quantifying noise in PMU data,” *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2016, no. 2019–07, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741972.
- [36] J. R. Constante Segura, G. Colome, and D. Echeverria, “Noise Amplitude in Ambient PMU Data and its Impact on Load Models Identification,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 22, no. 8, pp. 678–685, 2024, doi: 10.1109/TLA.2024.10620390.
- [37] J. R. Constante, D. G. Colomé, D. E. Echeverria, E. G. Lincango, and J. L. Camacho, “Adversarial Learning as a PMU Signal Filtering Technique in Load Models Identification,” *IEEE Access*, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3577897.
- [38] “IEEE 39-Bus System - Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG).” Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-39-bus-system/>
- [39] “IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems,” 2011. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219.

## 9. ANEXO 1 – SCRIPT DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA IMPLEMENTADO EN MATLAB

```
%*****
clear
clc;
% delete(gcp('nocreate'));
% myCluster = parcluster('Processes');
% delete(myCluster.Jobs);
% delete(gcp('nocreate'));
% clear
% clc;

%% Parametros a ingresar
SNR_INPUT=[73 65 49]; % [V P Q] SNR en db.
load("advDenoiser.mat")

filename_parametros_loads='C:\Users\ 2_Simulaciones\c2_param_reales.mat';
filename_simulaciones='C:\Users\2_Simulaciones\Simulaciones_ZIP_FPS\tseries_ZIP_';

%% Importación de datos de las cargas
load(filename_parametros_loads)
clear filename_parametros_loads

%% Lazo for para 10899 escenarios de operación
resultados_P=cell(4796,1);
resultados_Q=cell(4796,1);

for i_escenario=1:4796
    disp(num2str(i_escenario));

    %% Importacion de simulaciones
    datos_sin_ruido=load(strcat(filename_simulaciones,num2str(i_escenario)));
    datos_sin_ruido=datos_sin_ruido.mediciones_in;

    % plot(datos_sin_ruido.V_pu)
    % max(datos_sin_ruido.V_pu)-min(datos_sin_ruido.V_pu)

    %% Función para bajar la resolución de las simulaciones (datos importados)
    %Poner 1 si no se baja la resolución (120 FPS), 2 para 60 FPS, 3 para 40 FPS,
    % 4 para 30 FPS, 5 para 24 FPS, 6 para 20 FPS, 8 para 15 FPS, 10 para 12 FPS
    % 12 para 10 FPS

    [datos_sin_ruido] = fun_baja_resolucion_datos_local(datos_sin_ruido,12);

    % hold on
    % plot(datos_sin_ruido.V_pu)
    % hold off
    % max(datos_sin_ruido.V_pu)-min(datos_sin_ruido.V_pu)

    %% Aumento de Ruido a los datos originales

    %datos_con_ruido=datos_sin_ruido; % Elegir este si desea ejecutar sin ruido

    [datos_con_ruido] = fun_aumenta_ruido_local(datos_sin_ruido,SNR_INPUT); %
    Elegir este si desea ejecutar con ruido o con filtro
end
```

```

%% Preparación de datos
[V_pu,P_pu,Q_pu,dV_pu,dP_pu,dQ_pu] =
fun_preparacion_datos_local(datos_con_ruido); % Todo en Pu

%% Ajuste de los parametros del modelo ZIP de 0 a 1

param_reales_P=table2array(param_P(i_escenario,1:4));
param_reales_Q=table2array(param_Q(i_escenario,1:4));

param_reales_P(2:4)=param_reales_P(2:4)./100;
param_reales_Q(2:4)=param_reales_Q(2:4)./100;

%% Filtrado de señales (elegir solo si se va a filtrar las señales)

[V_pu,~] = fun_filtrado_IA (V_pu,advDenoiser);
[P_pu,~] = fun_filtrado_IA (P_pu,advDenoiser);
[Q_pu,~] = fun_filtrado_IA (Q_pu,advDenoiser);

%% Optimizacion para P
xdata=V_pu;
ydata=P_pu;

[res] =
fun_identificacion_pametrica_ZIP_P(ydata,xdata,param_reales_P(2:4),i_escenario,dP_
pu,dV_pu,0,dP_pu,dQ_pu);

resultados_P{i_escenario,1}=res;

%% Optimizacion para Q
xdata=V_pu;
ydata=Q_pu;

[res] =
fun_identificacion_pametrica_ZIP_Q(ydata,xdata,param_reales_Q(2:4),i_escenario,dQ_
pu,dV_pu,0,dP_pu,dQ_pu);

resultados_Q{i_escenario,1}=res;

end

%% Limpieza de variables
clear ans i i_escenario x_PQ x_ZIP b4_esc_a_sim_ZIP_10metodos
clear parametros_reales_P parametros_reales_Q param_reales_P param_reales_Q
clear filename_simulaciones ZIP_all_values SNR_INPUT mediciones_in advDenoiser
clear escalon t_filtrado xdata ydata dV_pu dP_pu dQ_pu V_pu P_pu Q_pu
clear tiempo_alg res datos_sin_ruido datos_con_ruido dV param_P param_Q

%% Colocación de resultados en orden
for i=1:height(resultados_P)

if width(resultados_P{i,1})~=13
resultados_P{i,1}=[];
end

if width(resultados_Q{i,1})~=13
resultados_Q{i,1}=[];
end

end

end

```

```

clear i

resultados_P = {cat(1, resultados_P{:})};
resultados_P=resultados_P{1,1};
resultados_P(resultados_P.P0_est<=0,:)=[];
resultados_P=sortrows(resultados_P);

resultados_Q = {cat(1, resultados_Q{:})};
resultados_Q=resultados_Q{1,1};
resultados_Q(resultados_Q.P0_est<=0,:)=[];
resultados_Q=sortrows(resultados_Q);

resultados_P(resultados_P.dV_pu>0.4,:)=[];
resultados_Q(resultados_Q.dV_pu>0.4,:)=[];

resultados_P(resultados_P.id_opt==1,:)=[];
resultados_Q(resultados_Q.id_opt==1,:)=[];

%% Guardado de resultados
clear num_esc_a_sim num_loads_a_sim baja_resolucion
save ('b3_res_CF_10FPS.mat')

disp('Finalizado')

```