



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DEL  
REGULADOR DE VOLTAJE DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA EL AMBI UTILIZANDO  
OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MVMO Y  
REGISTROS DE MEDICIONES  
SINCROFASORIALES PARA CONTRIBUIR  
AL ANÁLISIS OPERATIVO DEL SISTEMA  
NACIONAL INTERCONECTADO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ANDRÉS MARCELO PALACIOS BRITO

TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

Quito - Ecuador

2024

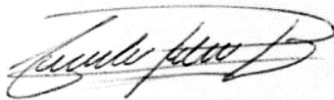
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Andrés Marcelo Palacios Brito con documento de identificación N° 1600708893 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de abril del año 2024

Atentamente,



---

Andrés Marcelo Palacios Brito

1600708893

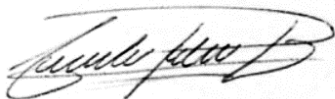
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Andrés Marcelo Palacios Brito con documento de identificación No. 1600708893, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Modelación y validación del regulador de voltaje de la central hidroeléctrica el Ambi utilizando optimización heurística MVMO y registros de mediciones sincrofasoriales para contribuir al análisis operativo del sistema nacional interconectado”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de abril del año 2024

Atentamente,



---

Andrés Marcelo Palacios Brito

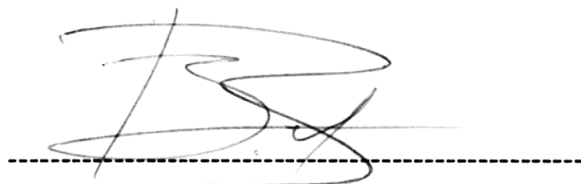
1600708893

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DEL REGULADOR DE VOLTAJE DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA EL AMBI UTILIZANDO OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MVMO Y REGISTROS DE MEDICIONES SINCROFASORIALES PARA CONTRIBUIR AL ANÁLISIS OPERATIVO DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO, realizado por Andrés Marcelo Palacios Brito con documento de identificación N° 1600708893, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de abril del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in dark ink, consisting of a large, stylized 'B' and 'S' intertwined, with a horizontal line drawn through the middle of the signature.

Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, Mst.  
0503503336

## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Alcance .....	4
1.3. Objetivo Principal .....	4
1.4. Objetivos específicos .....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1.1. Medición sincrofasorial y unidades de medición Fasorial (PMU) .....	7
2.1.2. El sistema de medición WAMS .....	7
2.1.3. Pruebas y sincronización de PMU en subestaciones .....	8
2.1.4. Sincronización precisa y la calidad del tiempo en PMUs .....	10
2.1.5. Medición de PMU en la validación de los modelos de red .....	11
2.2. Máquina Sincrónica .....	12
2.2.1. Modelo clásico .....	12
2.3. Regulador Automático de Voltaje (AVR) .....	14
2.3.1. Fundamentos de los Reguladores Automáticos de Voltaje .....	15
2.3.2. Funcionamiento de los AVR .....	16
2.3.3. Modelo matemático del Regulador Automático de Voltaje .....	18
2.3.4. Beneficios y Aplicaciones de los AVR .....	19
2.3.5. Consideraciones para elegir un AVR .....	21
2.4. Modelo de Optimización heurística MVMO .....	23
2.4.1. Validación del Modelo del Sistema Eléctrico de Potencia .....	24
2.4.2. Metodología para Validar el Modelo .....	25
2.5. PowerFactory, DPL y Python .....	28
2.5.1. DPL Lenguaje de Programación Dinámico .....	30
2.5.2. DPL y DSL en la Automatización de Procesos .....	31
2.5.3. Python .....	33
2.6. Estabilidad de Voltaje .....	34
2.6.1. Importancia de la estabilidad de voltaje .....	35
2.6.2. Factores que afectan la estabilidad de voltaje .....	36
2.6.3. Estudio de la estabilidad de voltaje .....	38
2.6.4. Técnicas para mantener la estabilidad de voltaje .....	39
3. MARCO METODOLÓGICO .....	41
3.1. Datos Técnicos Central Hidroeléctrica El Ambi .....	41
3.2. Protocolos de pruebas .....	43

3.3. Implementación en PowerFactory.....	44
3.4. Optimización de los parámetros del AVR .....	53
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
5. CONCLUSIONES .....	60
6. RECOMENDACIONES .....	62
7. BIBLIOGRAFÍA.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modelo clásico del circuito equivalente .....	12
Figura 2 Modelo matemático del AVR Basler DECS-200 .....	18
Figura 3 Diagrama de Flujos del algoritmo MVMO.....	24
Figura 4 Rendimiento del sistema modelado versus su desempeño real. ....	25
Figura 5 Enfoque propuesto de identificación .....	27
Figura 6 Caracterización de los componentes del sistema.....	27
Figura 7 Diagrama de Bloques del AVR Basler DECS-200.....	45
Figura 8 Inicialización de las variables de estado. ....	47
Figura 9 Nexo entre el Generador y el AVR.....	47
Figura 10 Parámetros del Regulador de Voltaje. ....	48
Figura 11 Frame Lectura. ....	49
Figura 12 Ecuaciones del diagrama Inicializar. ....	49
Figura 13 Contenido del archivo de texto (.txt). ....	50
Figura 14 Measurement File. ....	51
Figura 15 Señales recolectadas de las pruebas en campo. ....	52
Figura 16 Señales simuladas en PowerFactory. ....	52
Figura 17 Señales leídas y simuladas.....	53
Figura 18 Señales optimizadas con MVMO. ....	55
Figura 19 Parámetros del AVR optimizados por MVMO. ....	56
Figura 20 Gráfica de convergencia por PSO.....	57
Figura 21 Señales optimizadas con PSO.....	57
Figura 22 Parámetros del AVR optimizados por PSO.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Consideraciones para elegir un AVR.....	22
Tabla 2 Comparativa de valores numéricos de los parámetros del AVR.....	59

## RESUMEN

El siguiente documento presenta un enfoque metodológico detallado para la modelación y optimización del regulador automático de voltaje (AVR) en la Central Hidroeléctrica el Ambi. Se inicia con la descripción técnica de la central, su ubicación geográfica y la variabilidad en el caudal del río Ambi, que impacta la generación de energía. Se destaca la supervisión constante por parte del Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y la contribución significativa de la central a la demanda eléctrica de Ibarra. Se explican los protocolos de pruebas implementados, enfocándose en el rendimiento del sistema "Generador-Regulador de Voltaje". Se detallan los requisitos esenciales para realizar evaluaciones, centrándose en cambios controlados del voltaje de referencia y su impacto en el sistema. Posteriormente, se describe la implementación de los resultados en PowerFactory, proporcionando un vínculo claro entre la teoría y la práctica. Se aborda la optimización de los parámetros del AVR mediante un algoritmo específico, como lo es el "Mean-Variance Mapping Optimization" (MVMO). Se demuestra la eficacia del método al minimizar el error entre las señales simuladas y las obtenidas en pruebas de campo. Se compara y destaca la consistencia entre los resultados del MVMO con otro algoritmo heurístico (Enjambre de partículas o PSO), subrayando su robustez y aplicabilidad en la modelación del regulador de voltaje.

**Palabras clave:** Central Hidroeléctrica, Regulador Automático de Voltaje (AVR), Modelación en PowerFactory, Protocolos de Pruebas, Optimización de Parámetros, Algoritmos de Optimización.

## ABSTRACT

This document deals with presents a detailed methodological approach for the modeling and optimization of the automatic voltage regulator (AVR) in the El Ambi Hydroelectric Power Plant. It commences with a technical depiction of the facility, detailing its geographical placement and variations in the AMBI River's flow, influencing the production of energy. The consistent oversight by the regulatory body (CENACE) and the substantial role played by the facility in meeting Ibarra's electricity requirements are emphasized. The test protocols implemented are explained, focusing on the performance of the "Voltage Generator-Regulator" system. The essential requirements for carrying out evaluations are detailed, focusing on controlled changes of the reference voltage and their impact on the system. Following this, the application of the findings in PowerFactory is elucidated, establishing a coherent connection between theoretical concepts and practical application. The optimization of the parameters of the AVR is addressed by a specific algorithm, such as the "Mean-Variance Mapping Optimization" (MVMO). The method's efficacy is showcased through the reduction of errors between simulated signals and those acquired during field tests. The consistency between the MVMO results with another heuristic algorithm is compared and highlighted, underlining its robustness and applicability in voltage regulator modeling.

**Key words:** Hydroelectric Power Plant, Automatic Voltage Regulator (AVR), Modeling in PowerFactory, Test Protocols, Parameter Optimization, Optimization Algorithms.



## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de electricidad desempeña un papel crucial en atender las crecientes necesidades energéticas de las sociedades actuales. En este contexto, las centrales hidroeléctricas desempeñan un papel crucial al suministrar y proveer distintas fuentes de energías limpias y renovables. No obstante, para asegurar la estabilidad y fiabilidad de la red eléctrica en su totalidad, es crucial que estas plantas funcionen de manera eficiente y se adapten de manera óptima a las fluctuaciones de la demanda y las condiciones del sistema.

La central hidroeléctrica el Ambi, como parte del Sistema Nacional Interconectado, es una instalación estratégica que contribuye significativamente a la creación y producción de energía eléctrica en Ecuador. Para mantener su operación en condiciones óptimas, se requiere un control preciso del voltaje, un aspecto crucial en la gestión de producción de energía y la previsión de interrupciones. En este contexto, la modelación y validación del regulador de voltaje del Ambi se presenta como un desafío técnico y científico de gran relevancia.

El presente proyecto técnico se enfoca en abordar la modelación y validación del AVR mediante la aplicación de técnicas avanzadas de modelación y optimización heurística. Específicamente, se emplea el algoritmo “Mean Variance Mapping Optimization” (MVMO) para ajustar los parámetros del regulador de voltaje de la central hidroeléctrica el Ambi. Además, se aprovechan los registros de mediciones sincrofasoriales, una tecnología de vanguardia en la monitorización y control de sistemas eléctricos, para mejorar la precisión de la modelación y validar la eficacia de las modificaciones propuestas.

La intención primordial de este análisis es colaborar y aportar en el estudio operativo del Sistema Nacional Interconectado al mejorar la capacidad de la central hidroeléctrica el Ambi para mantener un abastecimiento de energía eléctrica estable y confiable, inclusive en condiciones adversas. A través de la modelación y validación detalladas del regulador de voltaje, se espera proporcionar una base firme para la administración de resoluciones notificadas en las gestiones de las infraestructuras eléctricas y, en una terminante instancia, progresar en determinados

aspectos de la vida de la población al lograr un abastecimiento y aprovisionamiento eléctrico seguro, estable y eficaz.

La finalidad de la comprobación y verificación del modelo es interpretar los distintos fenómenos subyacentes del sistema de potencia para que ellos puedan ser sustituidos satisfactoriamente en la ejecución de análisis. El propósito definitivo es referir con un modelo de sistema total que alcance a anunciar de manera razonable el efecto de un evento; sin embargo, para recabar y obtener, se necesita tener elementos particulares del modelo del sistema que también sean vigentes.

El desarrollo y procedimiento de comprobación y verificación del modelo y la eventual "validez" del modelo exigen un "juicio de ingeniería" en vez de fundamentarse en un elemental procedimiento de prueba y error del modelo delimitados por ciertos puntos de vista inflexibles. Esto se debe a que cualquier dinamismo de modelado exigen determinadas presunciones y compromisos, que solo pueden establecerse por medio de una comprensión trascendente del procedimiento que se está modelando y la finalidad por la que se empleará el modelo.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Las variaciones como aumento o disminución de suministro de energía eléctrica pueden ocasionar variaciones o alteraciones en el nivel de voltaje o demás variables dentro de un sistema de energía. En el caso en que la necesidad de suministro eléctrico incremente súbitamente, el sistema puede experimentar una reducción y descenso del voltaje debido a múltiples eventos como por ejemplo una sobrecarga, mientras que un decrecimiento repentino de la demanda puede causar un incremento en el voltaje, fluctuaciones en la producción de energía eléctrica (modificación en la velocidad de giro del generador), o cambios en el número de giros de la bobina poseen la capacidad de provocar modificaciones en los niveles de voltaje o frecuencia en los generadores. [1].

Las condiciones climáticas adversas, como las tormentas eléctricas y la temperatura del ambiente que en ocasiones puede llegar a ser muy alta o en otras ocasiones muy baja, pueden ocasionar complicaciones de nivel de voltaje en la generación eléctrica o daños en las líneas de transmisión o subestaciones. Por ejemplo, una tormenta eléctrica puede suscitar un sobrevoltaje en el sistema, mientras que las temperaturas extremadamente altas pueden ocasionar un descenso en el nivel de voltaje al incrementarse la impedancia serie de una línea de transmisión [2].

Las posibles variaciones mencionadas deben ser consideradas mientras se lleva a cabo el funcionamiento de un sistema de energía, con el propósito de adoptar acciones adecuadas para conservar la seguridad y eficiencia operativa de la red. Por ende, los organismos responsables de la operación buscan desarrollar modelos de simulación validados que permitan representar con precisión los fenómenos reales. Este objetivo se logra mediante una campaña de modelado de elementos clave del sistema eléctrico, como generadores, transformadores, reguladores de velocidad y voltaje, entre otros.

El Operador Nacional de Electricidad CENACE, con interés en el Control Automático de Voltaje (AVR) de las centrales de generación ecuatorianas, utiliza los datos proporcionados por las Unidades de Medición Sincrofásorial (PMU) como entradas para la simulación (voltaje de campo, corriente de campo y voltaje en los terminales del generador). Esta simulación es de vital importancia para el CENACE, dado que su función principal consiste en planificar la operación del sistema eléctrico en Ecuador y contar con información precisa en su base de datos para enfrentar contingencias.

La central eléctrica el Ambi, como parte del parque generador ecuatoriano, debe ser considerada en los estudios operativos que permitan establecer directrices para la operación del Sistema Nacional Interconectado (SNI). Por lo tanto, es esencial comprender en detalle y validar sus modelos, incluyendo el regulador automático de voltaje, con el propósito de asegurar un funcionamiento seguro y eficaz del sistema eléctrico mediante la toma de decisiones respaldada por simulaciones que reproduzcan resultados lo más fieles posible a la realidad.

## **1.2. Alcance**

En este trabajo se plantea realizar pruebas físicas en el regulador de voltaje (AVR) de la central el Ambi, cuyos resultados serán ingresados en el software PowerFactory para realizar la identificación paramétrica utilizando optimización MVMO. Esto permitirá reflejar el comportamiento real del generador ante las distintas condiciones que puedan presentarse en la operación del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador.

Se considerarán pruebas de escalón en el AVR instalado en la central hidroeléctrica para generar los eventos que se deben modelar en el software PowerFactory y los cuales serán comparados con los registros sincrofasoriales tomados de la PMU instalada en la central. Para la identificación paramétrica del AVR de la central en el software PowerFactory, se utilizará optimización MVMO implementada en el lenguaje DPL y DSL, que compare el error existente entre la simulación y el generador real, y que de acuerdo con el algoritmo corrija la diferencia entre ambos modelos para que cumpla con las características del AVR real.

## **1.3. Objetivo principal**

- Adquirir los datos relativos a los parámetros del regulador de voltaje en la central eléctrica el Ambi a través de optimización para recrear su comportamiento en el Sistema Nacional Interconectado usando como información de entrada mediciones sincrofasoriales.

## **1.4. Objetivos específicos**

- Recopilar información del generador sincrónico, transformador de unidad y regulador de voltaje para la modelación de estos en lenguaje DSL del software PowerFactory.
- Modelar el regulador de voltaje de la central el Ambi para realizar pruebas de desempeño ante función escalón en el software PowerFactory.

- Realizar pruebas de campo en el regulador de voltaje de la central el Ambi y generar registros de medida tomados de la PMU para obtener los parámetros del mencionado sistema de control.
- Utilizar la optimización heurística Mean-Variance Mapping Optimization (MVMO) para encontrar los parámetros del regulador de voltaje mediante la reducción del error entre la simulación y los datos medidos en campo.

## 2. MARCO TEÓRICO

El CENACE tiene la responsabilidad de simular el Control Automático de Voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) utilizando datos reales proporcionados por la Unidad de Medición de Fasor (PMU) de la central hidroeléctrica el Ambi. Esta simulación es esencial para el CENACE, ya que una de sus tareas principales es planificar la operación del sistema eléctrico de Ecuador y contar con información precisa en su base de datos. Con el fin de alcanzar este objetivo, resulta fundamental que los datos de todos los elementos del sistema de potencia guarden la mayor similitud posible con el funcionamiento real de los equipos. En consecuencia, la disponibilidad del modelo genuino del regulador automático de voltaje (AVR) de la central el Ambi se convierte en una necesidad esencial.

Al efectuar una simulación en software de un regulador automático de voltaje (AVR) en la parte de creación y producción de un sistema eléctrico de potencia, fundamentándose en datos alcanzados de una unidad de medición fasorial (PMU), se debe tener en consideración diversos aspectos que nos indican la relevancia, trascendencia e importancia de estos dispositivos de medición en el sistema radican en que las unidades de medición fasorial permiten la realización de mediciones precisas, facilitando la ejecución y análisis detallado del sistema eléctrico tanto en regímenes estables como transitorios. Estos dispositivos desempeñan un papel crucial al proporcionar datos exactos y en tiempo real, lo que es fundamental para comprender y optimizar el rendimiento del sistema, así como para garantizar su operación segura y eficiente. Esto involucra captar las magnitudes eléctricas como voltajes, corrientes y potencias en su configuración compleja, contemplando tanto su amplitud como su fase [3].

Estos valores son fundamentales e indispensables para precisar el correcto comportamiento del sistema. Los reguladores automáticos de voltaje (AVR) son dispositivos críticos para sustentar la estabilidad del sistema eléctrico al examinar y monitorizar el voltaje en los generadores. El conocimiento de las unidades de medición fasorial es indispensable y fundamental para comprender cómo operan los AVR y cómo interactúan con distintos componentes del sistema, como los generadores, transformadores y cargas. Esta capacidad

posibilita el cálculo y evaluación del impacto de las variaciones de voltaje en el sistema, así como la capacidad del regulador automático de Voltaje (AVR) para ajustar su respuesta. Esto es esencial para mantener y respaldar la operación continua, estable y confiable del sistema eléctrico [4].

Entender sobre las unidades de medición fasorial es esencial y elemental para la simulación en software de un regulador automático de voltaje en la generación eléctrica. Suministra la precisión que se necesita para analizar el sistema, simular su comportamiento, afianzar y respaldar la estabilidad, optimar y perfeccionar el diseño del AVR.

### **2.1.1. Medición sincrofasorial y unidades de medición Fasorial (PMU)**

La Unidad de Medición Fasorial (PMU) representa un sensor polifacético de alta velocidad diseñado con la finalidad de medir y evaluar los fasores de voltaje y corriente en sistemas de potencia trifásicos. En 2018, se dio una iniciativa denominada Sincrofasores de América del Norte (NASPI) señaló que el sincrofasor y distintas aplicaciones de mediciones sincronizadas en el tiempo se habían empleado y cada vez más, se aprovecha en el sistema de distribución de energía interconectado para llevar a cabo tareas como la planificación, organización, monitoreo, control y protección [3].

### **2.1.2. El sistema de medición WAMS**

De manera similar a las funciones de control y supervisión del Sistema de Control y Adquisición de Datos (SCADA) y el Sistema de Administración de Energía (EMS), el sistema de monitoreo de área amplia (WAMS) ofrece mayor precisión en la toma de datos en el transcurso del tiempo. Esto se logra gracias a la sincronización de la marca de tiempo de la Unidad de Medición Fasorial (PMU) con el reloj del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Se puede enfatizar que, en las últimas décadas, se incorporó una considerable cantidad de PMU en la red, se implementó progresivamente diversas tecnologías de análisis basadas en medición

sincrofasorial con el fin de fortalecer la capacidad de respuesta ante eventos adversos en las redes eléctricas [5].

Las aplicaciones fundamentadas y justificadas en PMU desarrolladas incorporan e integran detección de eventos, contemplación de topología (una PMU integrada a un sistema de gestión de red eléctrica o EMS le permite comprender la configuración y la estructura de la red eléctrica), valoración de red (consideración de varios parámetros y condiciones, como la carga actual, la calidad de la energía, la estabilidad del sistema, la presencia de eventos o perturbaciones, entre otros), control de fallas y protección de elementos de la red eléctrica (una PMU integrada a un EMS le permite utilizar la información proporcionada por la PMU para tomar decisiones y acciones automatizadas para mejorar la eficiencia y la confiabilidad de la red eléctrica, dando más protección a subestaciones, transformadores de distribución, líneas de transmisión, etc.), distribución y gestión de carga, así como la conexión y desconexión de la misma.

Por lo tanto, las comprobaciones, pruebas, valoraciones y evaluaciones frecuentes y habituales de las PMU desplegadas en los sistemas de energía tienen una gran relevancia para afianzar y certificar la adquisición de mediciones verídicas y fiables para la transmisión de datos efectiva. Para estandarizar y normalizar la particularidad de las pruebas de PMU, los procedimientos, técnicas y rendimiento de las pruebas deberán hacer referencia a IEEE Std C37.118 y el conglomerado de pruebas de PMU se configurará de acuerdo con la delimitación del grupo de pruebas de medición sincrofasorial IEEE (STS) [6].

### **2.1.3. Pruebas y sincronización de PMU en subestaciones**

Las pruebas de PMU siguiendo las pautas de IEEE pueden involucrar y comprometer un trabajo de mano de obra extenso. Antes de implementar las PMU en el campo, se solicita que los proveedores prueben y examinen la precisión de medición del equipo a través de pruebas y verificaciones de cumplimiento. Una vez que se implementan y llevan a cabo las PMU, las pruebas y la calibración extendidas de la PMU son difíciles y complicados de realizar, ya que la estructuración y distribución de las pruebas de la PMU es compleja, costosa y demanda mucho



trabajo manual. Por lo tanto, las PMU deben desinstalarse primero y luego trasladar al laboratorio de pruebas de la PMU [3].

Por las cuatro razones anteriores, es ineludible desarrollar un marco para examinar y verificar remotamente las PMU de la subestación sin desinstalarlas. Es necesario que los relojes empleados para la sincronización de tiempo en las PMU sean muy exactos y específicos. No obstante, su precisión puede cambiar con el paso del tiempo debido a desperfectos de fabricación, transformaciones de temperatura, interposiciones eléctricas y magnéticas, antigüedad del oscilador y altitud. Adicionalmente, incluso los pequeños errores en el cronometraje pueden almacenarse considerablemente durante un largo período [5].

Se pretende realizar un trabajo, observaciones y análisis cuidadosos para explicar, especificar y medir la productividad de la temporalización en los sistemas PMU, para efectuar con las condiciones de precisión de IEC/IEEE 60255-118-1.9. Algunas variaciones del reloj son aleatorias, ocasionadas por variabilidades ambientales o electrónicas; otros son sistemáticos, suscitados por un reloj con una mala calibración o una mala configuración. El manejo exacto y preciso de una PMU requiere una observación de tiempo común, concreta y exacta. La referencia de tiempo se especifica en el estándar de sincrofasores, que decreta la correlación entre la escala de tiempo del Tiempo Universal Coordinado (UTC) y la fase de la onda coseno de referencia [6].

Para alcanzar una referencia de temporización común o el proceso de adquisición de PMU, es sustancial tener una fuente de señales de temporización exacta (esto quiere decir, una fuente de sincronización). La fuente puede ser un receptor GNSS incorporado en la PMU, un protocolo de tiempo de precisión (PTP) a través de IEEE Std 1588, una repartición de tiempo IRIG en toda la subestación o una división de tiempo de medios futuros en una zona extensa. La señal de temporización causada y originada por la fuente de sincronización está referenciada a UTC y facilita competente información para delimitar que la hora corresponde con UTC (por ejemplo, un indicador de estado "bloqueado") [6].

#### **2.1.4. Sincronización precisa y la calidad del tiempo en PMUs**

Para su perfecto manejo, la señal de sincronización está apta sin intermisión en todos los lugares de medición a lo largo de la red conectada. La señal de temporización se puede determinar por la disponibilidad, fiabilidad, credibilidad y exactitud proporcionadas para los requisitos del sistema de potencia. Si las PMU se van a emplear en situaciones de misión crítica, la excedencia de fuentes de tiempo de sincronización excesivas y enrutadas de manera distinta es favorable para evadir la pérdida de sincronización debido a interrupciones de atención o no intencionales [5].

Se anticipa que la señal de sincronización posea la suficiente exactitud para que las PMU mantengan la sincronización con precisión, asegurando que el Error de Vector Total (TVE) permanezca dentro de los límites establecidos por el estándar de sincrofasor. Se requiere que la PMU localice una pérdida de sincronización de tiempo que haría que TVE supere el límite permitido, o dentro de 1 minuto de una disminución de sincronización real, lo que sea menor. En este caso, se confirmaría una indicación en la salida de datos de la PMU (p. ej., el bit 13 de la palabra STAT de la trama de datos IEEE C37.118.2) hasta que la operación de datos se vuelva a sincronizar con el nivel de exactitud requerido [6].

Para continuar con el ejemplo de IEEE Std C37.118.2, además de la palabra STAT Bit 13, este modelo especifica sus señales destinadas a especificar la calidad del tiempo de la fuente de sincronización. Cada uno de los mensajes de salida de la PMU definidos (Configuraciones 1, 2 y 3, Cabecera y Datos) tienen un campo de calidad de tiempo de 4 bits. Este campo autoriza que la PMU muestre la calidad de la fuente de tiempo desde el bloqueo del reloj, la inquietud de 1ns a 10s (error estimado en situación catastrófica) o el defecto del reloj. Además, el mensaje de datos STAT tiene dos bits para mostrar el tiempo que el reloj ha estado desbloqueado. Esto varía de bloqueado ha desbloqueado durante más de 10s, 100s o más de 1000s [6], [7].

Otros protocolos de transporte de datos también mantendrán información sobre la calidad del tiempo. IEEE Std C37.118.2 incorpora un campo de calidad de tiempo de PMU de 3 bits a la

palabra de estado en lugar de un campo de bits de seguridad no empleado precedentemente. Cuando se emplea, este campo denota la inquietud en el tiempo de medición en el momento de medición y, tanto cuando está bloqueado como desbloqueado, y desconocido cuando el reloj se está inaugurando. Aunque un reloj puede estar desbloqueado a lo largo de un período extendido, varios relojes pueden conservar una exactitud autosuficiente durante períodos más extensos que otros relojes [7].

Los datos suministrados por las PMU se recolectan en los concentradores de datos fasoriales y se destinan al centro de control para que empleen las aplicaciones de destino. Estos datos se pueden emplear en distintos entornos tanto para aplicaciones online (valoración de estado y valuación de equilibrio de voltaje) como offline (estudio post mórtem y estadístico) [7].

#### **2.1.5. Medición de PMU en la validación de los modelos de red**

Las mediciones de PMU también se pueden utilizar en sistemas inteligentes que efectúan la comprobación, reconocimiento o validación del modelo de red. En este documento, la precisión de alguno de los dispositivos de medición es un requerimiento previo sustancial para la precisión general de los rendimientos de la estimación. No obstante, es de suma importancia indicar que hay muchas fuentes de inquietud que no se pueden desconocer y prescindir. Vale la pena tener presente que, en la mayoría de las aplicaciones habituales, los valores de los parámetros de red se han aceptado como conocidos e iguales a los valores nominales [8].

En determinados casos, los parámetros de la red se han alcanzado por medio de cálculos teóricos y mediciones fuera de línea, empleando la geometría y las propiedades de los conductores. Por consiguiente, los valores de los parámetros de red empleados por los operarios de la red pueden ser notablemente incorrectos e inexactos, con disimilitud de hasta un 25 – 30 por ciento en relación a los valores reales [8].

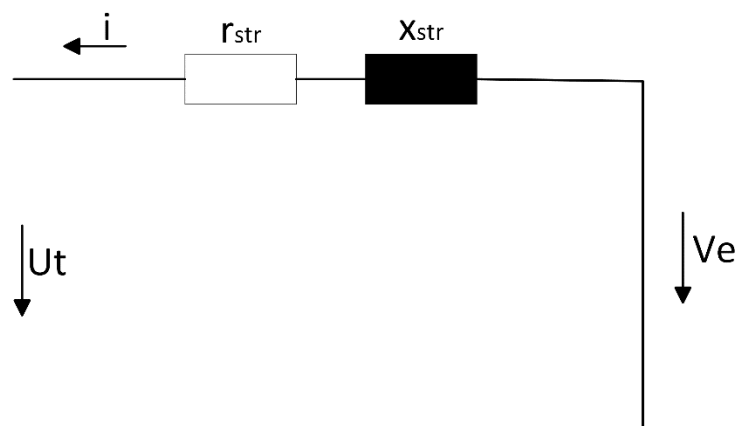
## 2.2. Máquina Sincrónica

Es un tipo de máquina eléctrica rotativa de corriente alterna que exhibe una velocidad de rotación directamente relacionada con la frecuencia de la corriente presente en su inducido o armadura. Esto significa que la velocidad a la que gira su rotor se conoce como velocidad sincrónica. Además, actúa como un dispositivo conversor de energía electromecánica, pudiendo funcionar como generador al convertir energía mecánica en energía eléctrica o como motor al transformar energía eléctrica en energía mecánica [9].

Los generadores sincrónicos desempeñan un papel fundamental como la principal fuente de suministro de energía eléctrica en los sistemas de potencia a nivel mundial. Son impulsados por una turbina que puede ser alimentada por diversas fuentes de energía primaria, como hidráulica, eólica, térmica o nuclear.

### 2.2.1. Modelo clásico

Este modelo se caracteriza por la representación de un voltaje situado tras una impedancia. La configuración del circuito equivalente correspondiente se exhibe en la figura 1.



**Figura 1** Modelo clásico del circuito equivalente

El modelo clásico de máquina síncrona se emplea para representar partes de un sistema que no requieren un nivel detallado de especificación o para máquinas de menor relevancia. Comúnmente, el modelo clásico se caracteriza por mantener constante la magnitud de la fuerza electromotriz interna ( $V_e$ ). Sin embargo, en PowerFactory, este modelo se expande al permitir que  $V_e$  sea definida como una señal de entrada variable (pudiendo ser modificada mediante un modelo DSL) en lugar de una cantidad constante. Es importante destacar que, al ser un modelo simplificado, no se contempla la saturación en este enfoque [10].

La ecuación de voltaje para la simulación RMS es:

$$u_t = -(r_{str} + jx_{str}) * i_t + v_e \angle \delta \quad (1)$$

Donde la amplitud de  $V_e$ , se inicializa como:

$$v_e = \sqrt{(u_t + (r_{str} + jx_{str}) * i_t)^2} \quad (2)$$

De manera similar al modelo estándar RMS de PowerFactory, se dispone de una opción que posibilita obviar la variación de la velocidad del rotor ( $n = 1$  p.u.) durante el cálculo del flujo del estator. Esta alternativa se encuentra en la pestaña "Avanzado" de la página de "Simulación RMS" dentro del cuadro de diálogo de edición de TypSym [10].

$$\psi_{str} = (u_t + r_{str} * i_t) / jn \quad (3)$$

La estabilidad transitoria se orienta hacia el examen de transitorios electromecánicos (ms) en el sistema de potencia, derivados de modificaciones en los ángulos de los rotores de los

generadores, conocidos como ángulos de potencia o ángulos de carga. La formulación matemática del modelo electromecánico que describe el ángulo del rotor de un generador síncrono es encapsulada en la ecuación de oscilación. Esta ecuación representa la evolución temporal del mencionado ángulo, proporcionando una descripción del comportamiento dinámico asociado.

El principio fundamental que rige la dinámica de rotación establece que el torque de aceleración es el resultado de multiplicar el momento de inercia del rotor por su aceleración angular [9].

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m = T_e \quad (4)$$

Donde J representa el momento de inercia del rotor,  $\theta_m$  denota el desplazamiento angular del rotor en relación con el eje estacionario,  $T_m$  corresponde al torque mecánico aportado por la fuente de energía mecánica (turbina),  $T_e$  refiere al torque eléctrico total, y  $T_a$  designa el torque de aceleración [9].

### **2.3. Regulador Automático de Voltaje (AVR)**

El control del sistema de potencia requiere un constante equilibrio entre la generación eléctrica y las variaciones en la demanda de cargas, con el propósito de mantener los niveles de voltaje y frecuencia dentro de rangos aceptables. A medida que transcurría el tiempo, la necesidad de un sistema de excitación de elevado rendimiento se hizo más apropiado para abastecer el estado estacionario y la estabilidad transitoria de los generadores en sistemas de potencia. Los sistemas de excitación utilizan el regulador automático de voltaje (AVR), un dispositivo diseñado para mantener y garantizar un suministro de voltaje continuo y estable a equipos eléctricos sensibles. [11].

Su primordial competencia es monitorizar y regularizar la tensión de salida de un generador o una fuente de alimentación, con el fin de afianzar y verificar que los dispositivos sensibles, como computadoras, servidores, sistemas de telecomunicaciones, equipos médicos, laboratorios conectados actúen dentro de los límites de voltaje indicados. Los reguladores automáticos de voltaje (AVR) son extensamente empleados en diversas aplicaciones, abarcando desde sistemas de generación de energía hasta dispositivos electrónicos, entre otros. Estos dispositivos son particularmente relevantes en áreas donde la particularidad de la energía eléctrica puede ser cambiante y alterable, determinada por fluctuaciones de voltaje, sobretensiones, caídas de tensión y variaciones de frecuencia [12].

La funcionalidad fundamental de un regulador automático de voltaje (AVR) implica equiparar la tensión de salida con una referencia establecida. En caso de que la tensión de salida sea inferior al nivel de referencia, el AVR ajustará automáticamente el voltaje de entrada para aumentarlo. De manera análoga, si la tensión de salida supera el nivel de referencia, el AVR realizará ajustes correspondientes, el AVR decrecerá el voltaje de entrada. Este procedimiento se lleva a cabo mediante la utilización de componentes electrónicos como transformadores, diodos, transistores y circuitos de control [11].

### **2.3.1. Fundamentos de los Reguladores Automáticos de Voltaje**

La operatividad de un AVR se fundamenta en el principio de retroalimentación negativa. Cuando el voltaje de entrada fluctúa, el AVR localiza la variación y toma medidas correctivas para sustentar y proveer un voltaje continuo y permanente en la salida. Para alcanzar esto, emplea un circuito de control que monitorea sin interrupción el voltaje de salida y relaciona su valor con un voltaje de referencia predispuesto. Un AVR consiste de diversos componentes básicos, claves y fundamentales que trabajan agrupados para sustentar y conservar el voltaje de salida constante. Los componentes primordiales incorporan:

- Transformador: El transformador es el encargado de adaptar el voltaje de entrada a un nivel apropiado para su regularización. Puede incrementar o aminorar el voltaje según sea necesario [13].
- Comparador: El comparador vincula la tensión de salida con el voltaje de referencia predefinido y evalúa la presencia de alguna disparidad. Esta diferencia, conocida como error, es la base para las acciones correctivas de AVR [13].
- Controlador: El controlador es la cabeza del AVR y se responsabiliza de transformar la información del comparador y difundir comandos para rectificar cualquier desviación del voltaje de salida [13].
- Actuador: El actuador es el elemento que efectúa las distintas acciones correctivas ordenadas por el controlador. Puede ser un motor, un regulador de conmutación o cualquier otro dispositivo apto para adaptar el voltaje de salida [13].
- Retroalimentación: La retroalimentación es fundamental y primordial para la operatividad del AVR. Facilita información en tiempo real sobre el voltaje de salida, autorizando que el controlador tome decisiones específicas y pertinentes para sustentar la estabilidad del voltaje [13].

### **2.3.2. Funcionamiento de los AVR**

La operatividad de los AVR empieza con la detección de variaciones en el voltaje de entrada. Esto se logra empleando distintos métodos, como sensores de voltaje o transformadores de corriente. Estos dispositivos reciben el voltaje de entrada y lo retransmiten a un circuito de control que examine continuamente su valor [11].

Cuando se detecta una variación en el voltaje de entrada, el AVR toma medidas correctivas para mantener constante el voltaje de salida, asegurando así la estabilidad del suministro eléctrico. Estas operaciones de control dependen del tipo de AVR. En los reguladores electromecánicos, un motor controlado por el circuito de control se emplea para regular manualmente las conexiones del transformador y así alterar la relación de transformación [12].



Esto facilita acrecentar o disminuir el voltaje de salida según sea elemental para conservar la estabilidad. Los reguladores electrónicos emplean circuitos electrónicos de control para adaptar el voltaje de salida. Esto se alcanza por medio del uso de dispositivos semiconductores, como tiristores o transistores, que pueden transformar y corregir la forma de onda de la corriente eléctrica y mantener de manera constante el voltaje [12].

Existen diversos tipos de reguladores automáticos de voltaje, cada uno con su propia técnica de operatividad. Están los reguladores de relé que emplean relés electromecánicos para monitorizar el voltaje de salida. Los relés se accionan o desactivan en labor del voltaje de entrada, lo que admite y habilita adaptar el voltaje de salida de manera proporcional y equitativa. Los reguladores de tiristores que emplean tiristores para supervisar la magnitud del voltaje suministrado a la carga. Al ajustar el ángulo de disparo de los tiristores, se regula la cantidad de energía suministrada y, en consecuencia, el voltaje de salida. [13].

Y los reguladores de transformador inestable y cambiante los cuales emplean un transformador con un devanado secundario inestable y variante para adaptar el voltaje de salida. Al transformar la posición del contacto deslizante en el devanado secundario, se ajusta la relación de transformación y, en consecuencia, se modifica el voltaje de salida. [13].

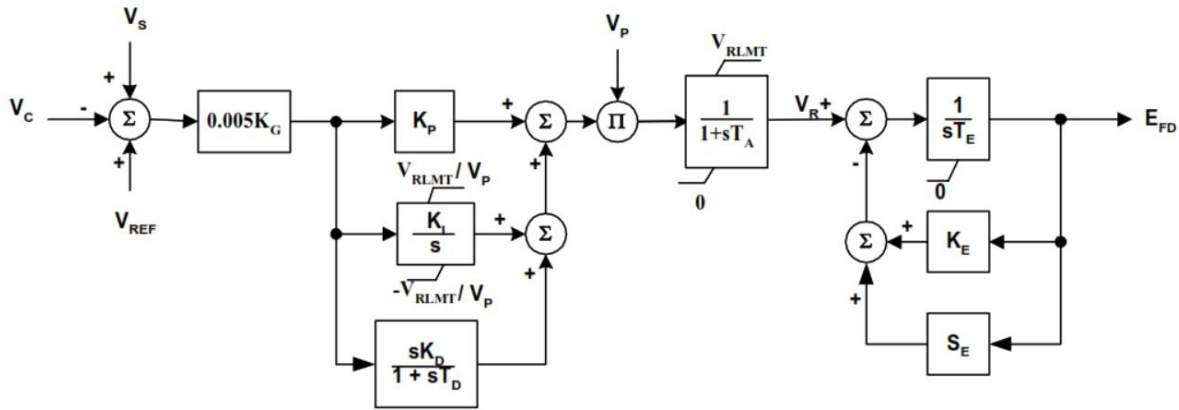
Los AVR proponen una serie de mejoramientos y se utilizan en diversas aplicaciones. El sostenimiento de un voltaje incesante, evidente y constante, obstaculiza daños a equipos y dispositivos sensibles. Protección contra fluctuaciones de voltaje, como sobretensiones y bajadas de tensión, que pueden perjudicar y dañar negativamente los equipos electrónicos. Mejora de la particularidad y superioridad de energía eléctrica, reduciendo las alteraciones, ajustes y variaciones en la forma de onda de la corriente y el voltaje. Ahorro energético al prevenir e impedir pérdidas y desperdicios de energía provocados por fluctuaciones de voltaje.

Las aplicaciones de los AVR son varias e incorporan diversos sectores, integrando la industria manufacturera, los servicios, la infraestructura crítica y las telecomunicaciones. Se

emplean en máquinas industriales, centros de datos, hospitales, aeropuertos, estaciones de telecomunicaciones y muchas otras instalaciones donde la continuidad eléctrica es crucial [11].

### 2.3.3. Modelo matemático del Regulador Automático de Voltaje

La figura 2 presenta el modelo del sistema de excitación Basler DECS-200, el cual se utiliza con un excitador giratorio de tipo cepillo. Los parámetros específicos del excitador giratorio no se abordan en esta discusión, ya que son responsabilidad del fabricante del excitador. VP representa la entrada de la fuente de energía para el sistema de excitación [14].



**Figura 2** Modelo matemático del AVR Basler DECS-200

El valor típico para  $T_A$  es 0. El límite de forzado  $V_{RLMT}$  está vinculado al voltaje de entrada de energía ( $V_{P\_VOL}$ ) al regulador y al voltaje nominal del campo del excitador ( $E_{EF\_BASE}$ ) de la siguiente manera [14]:

$$V_{RLMT} = 1.14 * V_{P\_VOL} / E_{EF\_BASE} \quad (1)$$

Dentro del modelo, la ganancia  $K_G$  cumple la función de compensar las variaciones en las ganancias asociadas con la configuración del sistema, como el voltaje de entrada de energía. La

base por unidad para los parámetros VP (entrada de energía) y VR (salida del regulador) es el voltaje nominal del campo del excitador sin carga (EEF\_BASE).

Las ganancias PID, denominadas KP, KI y KD, son diseñadas de manera personalizada para lograr el mejor rendimiento en cada sistema generador/excitador. Estas ganancias de tiempo continuo se discretizan e implementan en el controlador digital DECS-200. Las ganancias PID pueden consultarse en las tablas proporcionadas por Basler Electric o ser obtenidas a través de un programa puesto a disposición del usuario por Basler Electric.

#### **2.3.4. Beneficios y Aplicaciones de los AVR**

Una de las principales aplicaciones y ventajas fundamentales de los AVR radica en su capacidad para mejorar y elevar la calidad de la energía eléctrica. Al conservar un voltaje constante, invariable y estable, los AVR disminuyen las fluctuaciones y alteraciones en la configuración de onda de la corriente y el voltaje. Esto beneficia a los dispositivos sensibles, como computadoras, sistemas de comunicación y dispositivos electrónicos, previniendo daños y fallos prematuros [12].

Se puede enfatizar que una calidad característica y particular de energía óptima, excelente e inmejorable aporta a un funcionamiento y actividad eficaz y competente de los equipos y a una mayor vida útil y productiva. Los AVR funcionan como una barrera de protección contra fluctuaciones de voltaje dañinas. Las sobretensiones y las bajadas de tensión pueden perjudicar y deteriorar equipos y dispositivos sensibles, como computadoras, servidores, sistemas de control y equipos médicos. Al conservar y perseverar un voltaje estable y permanente, los AVR respaldan estos equipos, impidiendo de esta manera costosas reparaciones o reemplazos y disminuyendo los tiempos de inacción e inmovilidad vinculados [13].

Unos de los rendimientos y beneficios relevantes de los AVR es su cooperación a la eficacia y efectividad energética y el ahorro económico. Al conservar un voltaje persistente, evitan e impiden las pérdidas y desperdicios de energía producidos por fluctuaciones de voltaje. Esto se

evidencia en una disminución del gasto energético, lo que conlleva a un ahorro económico a largo plazo.

Además, al perfeccionar y aumentar la cualidad de energía, los AVR disminuyen y restringen las interrupciones y los fallos en los equipos, lo que se traduce en una mayor producción, rendimiento, competencia y eficacia operativa [15].

Una de las principales aplicaciones y ventajas fundamentales de los AVR radica en su capacidad para mejorar y elevar la calidad de la energía eléctrica. En el contexto de centrales de generación eléctrica, los AVR desempeñan un papel crucial al garantizar un suministro eléctrico estable y constante frente a eventos que puedan modificar el voltaje necesario para la red eléctrica. En la industria manufacturera, donde el equilibrio eléctrico es fundamental y vital para la operatividad de maquinarias y equipos. Afianzan un suministro de energía persistente y respaldan los equipos sensibles empleados en líneas de producción, control de procesos y sistemas de automatización. En el sector de servicios, como centros de datos, instalaciones de telecomunicaciones, hospitales y centros comerciales, los AVR ejecutan y ejercen un papel decisivo y trascendental en la protección de equipos electrónicos y sistemas de comunicación. Mantienen un voltaje permanente y evitan de esta manera provocar daños costosos y distintos fallos en equipos sensibles [15].

En distintas instalaciones críticas tales como aeropuertos, estaciones de tren, plantas de tratamiento de agua y subestaciones eléctricas, los AVR respaldan y aseguran el equilibrio y consistencia del suministro eléctrico. Esto es primordial para impedir interrupciones en los servicios públicos fundamentales y conservar la seguridad la operatividad eficaz y competente de estas infraestructuras. Los AVR también se emplean en sistemas de generación de energía renovable, como parques eólicos y plantas solares. Al estabilizar el voltaje y regular la energía generada, los AVR permiten una integración más eficiente y efectiva de fuentes de energía renovable en la red eléctrica [13].

### **2.3.5. Consideraciones para elegir un AVR**

Al optar por un regulador automático de voltaje proporcionado y ajustado para tus necesidades, es sustancial tener presente una serie de consideraciones. En esta sección, inspeccionaremos los elementos clave que debes tomar en consideración al seleccionar un AVR, desde la competencia de carga hasta las funciones de protección y la particularidad de conectividad. Uno de los aspectos fundamentales e importantes que se deben tener en consideración es la capacidad de carga del AVR. Debes asegurarte de que el AVR seleccionado pueda emplear la carga máxima de tus equipos y dispositivos. Además, es de suma importancia examinar y comprobar el rango de voltaje soportado por el AVR para así poder respaldar y garantizar que se ajuste a las condiciones de tu suministro eléctrico [11].

La precisión veracidad y equilibrio de regulación son factores críticos a considerar. Busca un AVR que facilite y proporcione una regulación exacta, imprescindible y estable del voltaje de salida, con una tolerancia mínima de fluctuación. Esto afianzara una protección apropiada y acondicionada de tus equipos y dispositivos sensibles, impidiendo distintos daños por sobretensiones o bajadas de tensión. Otro aspecto sustancial al tener en consideración son las funciones de protección y monitoreo del AVR. Demanda características como protección contra sobretensiones, cortocircuitos y sobrecargas, que proporcionen una protección global y completa a tus equipos. Además, considera las funciones de monitoreo, como indicadores visuales o alarmas audibles, que te alerten sobre posibles inconvenientes, dificultades, contratiempos o condiciones anormales [16].

En un ambiente cada vez más digitalizado, las particularidades de conectividad y comunicación son sustanciales e indispensables. Al optar por un AVR, es sustancial tener en consideración si brinda determinadas opciones de conectividad, como puertos Ethernet o RS-485, que permitan y accedan la integración con sistemas de monitoreo remoto o la configuración de alarmas. Esto sin duda te ofrecerá una mayor visibilidad y control sobre el rendimiento, utilidad y productividad del AVR [16].

Finalmente, pero no menos importante, se considera la calidad y fiabilidad del fabricante del AVR. Se realiza una averiguación exhaustiva sobre su reputación en el mercado, la pericia en el diseño y producción de Reguladores Automáticos de Voltaje (AVR), así como la disponibilidad de distintos soportes técnicos y servicios postventa. Es sustancial siempre optar por un fabricante confiable y verídico enfatizando que esto te dará la tranquilidad de contar con un producto de alta calidad y condición, pero principalmente contaremos con un respaldo oportuno y apropiado en caso de requerir algún tipo de asistencia o servicio.

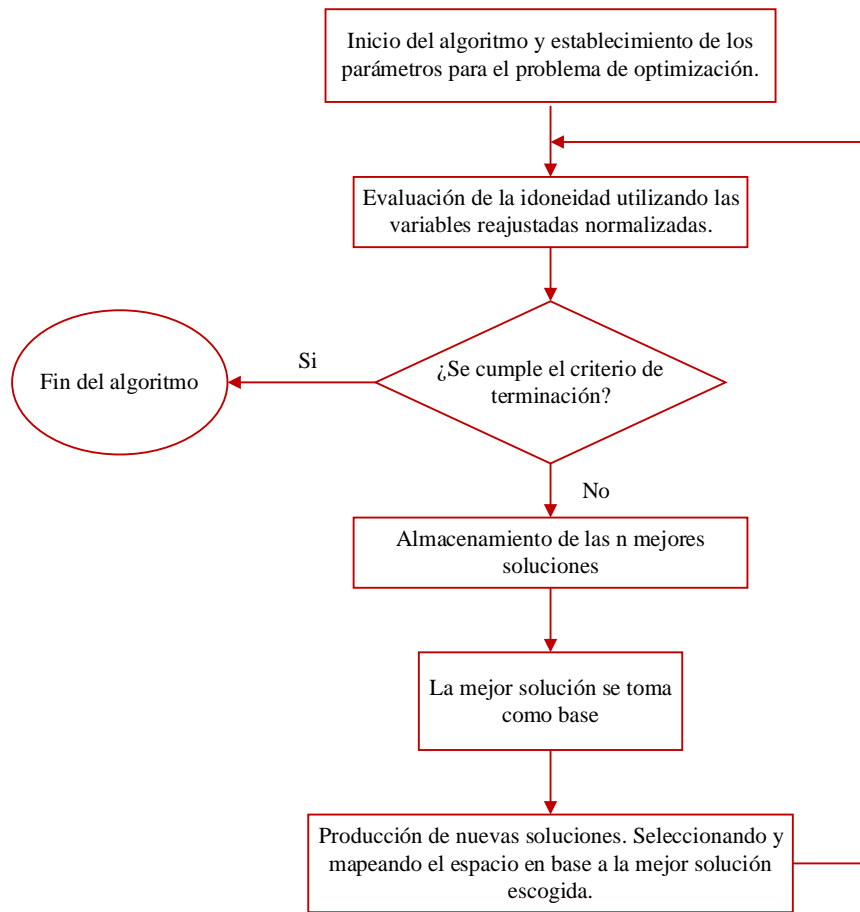
**Tabla 1** Consideraciones para elegir un AVR

Consideración	Descripción
Capacidad de carga	Debe soportar la carga máxima de todos los equipos y dispositivos.
Rango de voltaje soportado	Rango de voltaje que se ajuste a las condiciones del suministro eléctrico.
Precisión y equilibrio de regulación	Regulación del voltaje de salida, con tolerancia mínima de fluctuación.
Protección y monitoreo	Protección contra sobretensiones, cortocircuitos, sobrecargas, y con función de monitoreo.
Conectividad y comunicación	Conectividad, como puertos Ethernet o RS-485.

## **2.4. Modelo de Optimización heurística MVMO**

La optimización heurística implica encontrar soluciones de buena calidad para problemas complejos donde los métodos exactos pueden ser computacionalmente costosos o incluso impracticables. "Mean Variance Mapping Optimization" utiliza principios de mapeo de media-varianza para guiar la búsqueda hacia soluciones prometedoras en el espacio de búsqueda. El algoritmo MVMO generalmente opera con una población de soluciones potenciales y utiliza operadores de búsqueda para explorar y explotar el espacio de búsqueda. A través de la manipulación de la media y la varianza de las soluciones en la población, MVMO busca converger hacia soluciones que sean óptimas o cercanas a la óptima para el problema dado [17].

En el contexto de las Pruebas de Campo, se trata de un enfoque empleado para valorar, estimar y validar la precisión veracidad y fiabilidad de un instrumento o método de medición en situaciones reales o en condiciones de campo. En llevar a cabo las pruebas en un entorno controlado de laboratorio, las pruebas de campo involucran ejecutar mediciones en condiciones reales, donde pueden surgir varios factores externos que pueden dañar y alterar los resultados [17] el proceso iterativo del algoritmo MVMO se observa en la Figura 3.

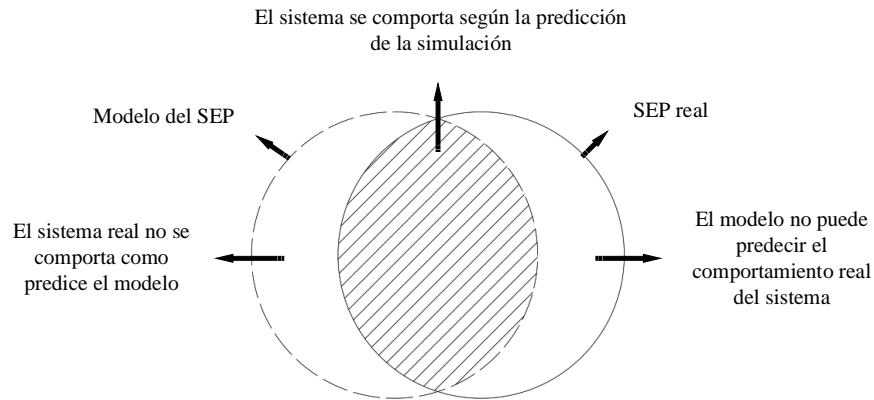


**Figura 3** Diagramade Flujos del algoritmo MVMO

#### 2.4.1. Validación del Modelo del Sistema Eléctrico de Potencia

La Figura 4 ejemplifica el alcance del modelado del sistema [4]. El círculo etiquetado como "Modelo del SEP" figura la productividad de sistemas de energía alcanzado a partir de simulación de dinámica matemática respaldada mediante la computadora. El círculo dibujado con la etiqueta "SEP real" representa el comportamiento real del sistema. Las áreas sombreadas que se cruzan indican y representan las partes del modelo que realmente representan el sistema real. Idealmente, los dos círculos deberían superponerse por completo, lo que indica que el modelo del sistema es una representación inequívoca del sistema real [18].





**Figura 4** Rendimiento del sistema modelado versus su desempeño real.

En la práctica y durante el proceso, es esencial que la zona de sombreado sea lo más extensa posible. En este sentido, resulta extremadamente crucial validar el modelo específico del sistema para garantizar que los efectos y rendimientos reflejen con precisión el comportamiento del sistema. Esta validación es particularmente significativa, especialmente cuando los resultados se utilizan para ajustar la respuesta de las actividades y procesos de control. Esto se evidencia claramente en la sintonización de los Estabilizadores del Sistema de Potencia (PSS), ya que la implementación de esta técnica se llevará a cabo a gran escala mediante una representación adecuada y competente del sistema [19].

#### **2.4.2. Metodología para Validar el Modelo**

Dado que es crucial realizar una configuración apropiada de todos los componentes físicos, con el fin de que las simulaciones reflejen de manera precisa la identificación del comportamiento dinámico modelado de sistemas de potencia, permitiendo el monitoreo en tiempo real y aspirando a lograr la máxima precisión y especificidad posible. Por lo tanto, el modelo del sistema reducido (primordialmente modelos de generador y AVR) tiene que ser confiable y seguro, lo cual solo es posible aplicando el enfoque de validación del modelo. ampliamente robusto [19].

Es por ello que, en base a la naturaleza trabajosa y dinámica de los distintos sistemas de potencialidad, la limitación de optimización y mejoramiento del reconocimiento de parámetros de referencias dinámicas dispone un paisaje multimodal desconectado y no convexo que no permitiría ser empleado con éxito por múltiples algoritmos de refinamiento heurístico existentes, ya que su utilidad y los resultados de búsqueda son sensibles a la configuración correcta de un parámetro con una probabilidad significativa de convergencia prematura y punto muerto local [5].

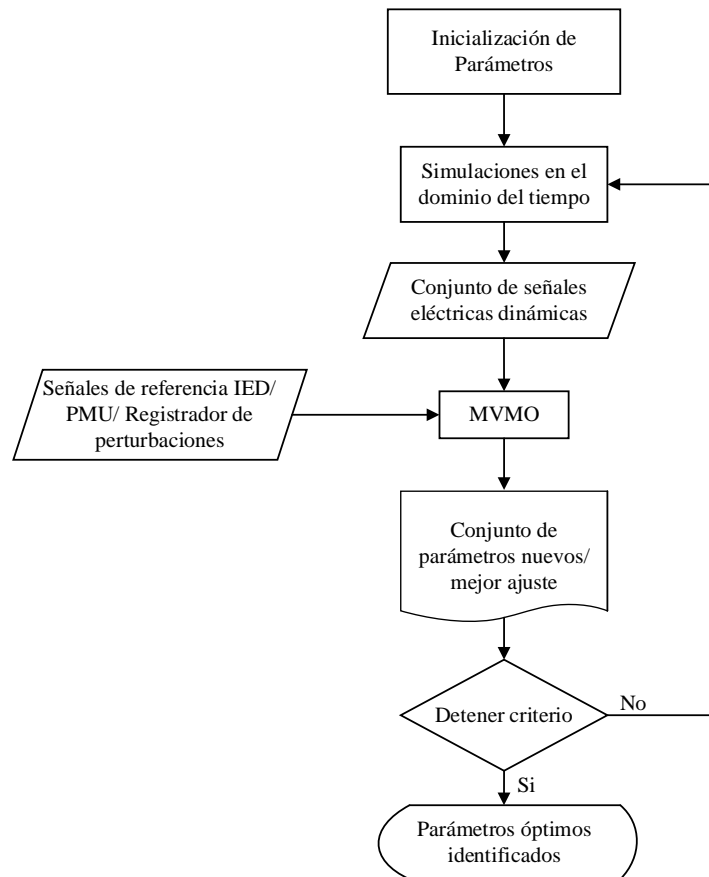
Se puede vencer estas determinadas limitaciones, este proyecto esboza una práctica y método frecuente y usual de caracterización para establecer los parámetros en el dominio del tiempo, en particular, en el optimizador heurístico MVMO que es específicamente apropiado a fin de solucionar esta tarea. El método emplea registros de señales de prueba de campo como estándar para las señales de referencia lo cual autoriza lograr alta confiabilidad del modelo simplificado subyacente con reconocimiento y soporte para la estimación precisa y específica de los parámetros correspondientes a los componentes dinámicos.

El método de identificación de parámetros propuesto comienza con la definición de un modelo dinámico que represente adecuadamente los componentes específicos y característicos del sistema (p. ej. AVR, HVDC, Parques Eólicos, GOV, Equivalentes Dinámicos, etc.) [20].

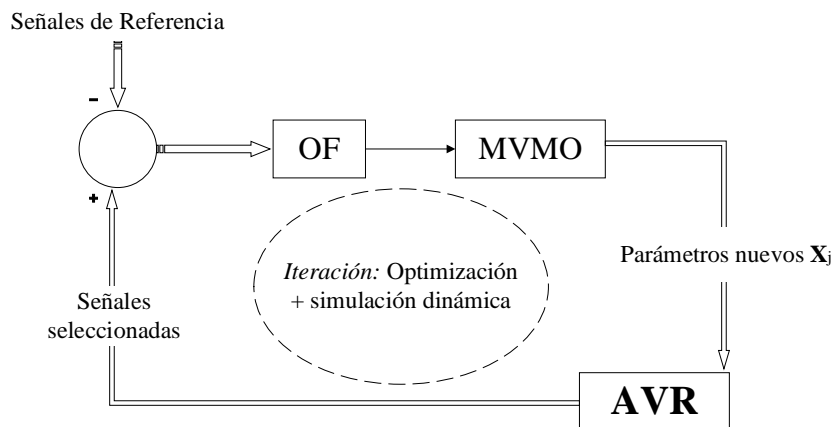
A continuación, instauramos la estimación de los parámetros iniciales a distinguir. Luego se efectúan simulación en el dominio del tiempo de un grupo de perturbaciones características predefinidas (esto quiere decir, contingencias reales registradas en la PMU o registros de pruebas de campo específicas) que se han desarrollado en el sistema. Luego se clasifica un conjunto de señales eléctricas que se correlacionan con las señales de referencia medidas que están relacionadas e interconectadas con el evento anterior [17].

Seguidamente, se estructura la competencia objetiva para la caracterización de factores y parámetros y se soluciona el obstáculo de perfeccionamiento óptimo subyacente por medio de MVMO. El proceso de reconocimiento de parámetros se sintetiza esquemáticamente en la Fig. 5.

Asimismo, el esquema básico para la identificación de parámetros, incrustado en el ciclo iterativo de la Fig. 5, se amplifica en la Fig. 6, ilustrando su aplicación para aprobar y ratificar el Regulador Automático de Voltaje (AVR) modelo de una central eléctrica [4].



**Figura 5** Enfoque propuesto de identificación



**Figura 6** Caracterización de los componentes del sistema

Considerando la diferencia entre la señal de referencia estudiada y la señal seleccionada en la simulación dinámica, la identificación del parámetro (entendido como retroalimentación de optimización) puede formularse de la siguiente manera:

- Reducir la función objetivo:

$$OF = \sum_{np=1}^p \alpha_{np} \int_0^{\tau} g(t) dt \quad (6)$$

$$g(t) = w_1[y_1(t) - y_{1ref}(t)]^2 + \dots + w_n[y_n(t) - y_{nref}(t)]^2 \quad (7)$$

Con la condición de que:

$$X_{j-min} \leq X_j \leq X_{j-max} \quad (8)$$

donde  $y_n(t)$  junto con  $y_{nref}(t)$  indican “n-ésimas” señal de referencias eléctricas registradas,  $w_n$  figura el “n-ésimo” elemento de señal imparcial,  $\tau$  es el periodo de presunción, y  $p$  es el resultado de perturbaciones, ensayos o pruebas de campo.  $(np)$ ,  $\alpha_{np}$  es el componente del peso de la perturbación.  $np$ -th, y  $x_j$  establece los parámetros del modelo [4]. Si es necesario, también se pueden incluir otras restricciones adicionales en el modelo.

## 2.5. PowerFactory, DPL y Python

La creciente y progresiva complejidad de los sistemas de energía eléctrica ha impulsado la demanda de herramientas y técnicas sofisticadas destinadas a su investigación y simulación. En este marco, PowerFactory emerge como una solución destacada en la industria para abordar estas

diversas competencias. PowerFactory es un software ampliamente utilizado a nivel global para la simulación y análisis de sistemas eléctricos, encontrando aplicación en diversas empresas, entidades del sector público, consultorías y fabricantes [21].

En el corazón de PowerFactory se encuentra DPL (Dynamic Program Language), un lenguaje de programación dinámico que autoriza a los usuarios personalizar y automatizar varias funcionalidades y utilidades del software. DPL ofrece a los ingenieros eléctricos la competencia de acoplar a PowerFactory a sus necesidades específicas, lo que resulta en una herramienta altamente transigente, adaptable y variable [21].

PowerFactory se destaca por su extensa y amplia gama de singularidades y su habilidad para llevar a cabo distintos análisis detallados de estructuras eléctricas de corriente alternativa (CA) y corriente de continuidad (CC). Proporciona módulos especializados destinados a realizar estudios de flujo de carga, análisis de cortocircuitos, observación de continuidad, evaluación de condiciones y calidad de la energía, así como análisis y estudio de sistemas de protección, entre otras funciones. Además, PowerFactory contiene e incorpora herramientas e instrumentos avanzados de modelado de redes, lo que permite a los usuarios representar con veracidad y precisión sistemas complejos y ejecutar estudios más exactos y precisos con respecto a otras herramientas o software de simulación y análisis de sistemas eléctricos como lo son Matpower, ETAP, PSSE (Power System Simulation for Engineering), entre otros.

La flexibilidad que propone DPL en PowerFactory es uno de sus aspectos más relevantes. Los usuarios pueden escribir scripts y programas personalizados para realizar cálculos complejos, implementar algoritmos especializados y desarrollar herramientas de análisis específicas para sus necesidades. Esto permite a los ingenieros eléctricos aprovechar al máximo la funcionalidad de PowerFactory y adaptarla a los desafíos específicos que enfrentan en sus proyectos [22].

Mediante DPL, los usuarios también pueden automatizar tareas recurrentes y reiterativas, lo que ahorra tiempo y sintetiza la probabilidad de errores humanos. Pueden escribir scripts para realizar una sucesión de acciones, como importar y exportar datos, efectuar simulaciones y

provocar informes automatizados. La capacidad de automatización de DPL perfecciona la efectividad y eficacia en la afluencia de trabajo, lo que permite y propicia a los ingenieros concentrarse en análisis de superior nivel en lugar de tareas manuales [23].

La incorporación de DPL con otras herramientas y sistemas es otro elemento poderoso de PowerFactory. DPL permite la importación y exportación de datos entre PowerFactory y otras aplicaciones, lo que posibilita la asistencia con otras herramientas empleadas en el análisis de sistemas eléctricos. Además, DPL es compaginable con la interoperabilidad con plataformas de software de terceros, lo que proporciona a los usuarios la probabilidad y viabilidad de emplear y utilizar las habilidades y competencias de otras aplicaciones en conjunto con PowerFactory [22].

### **2.5.1. DPL Lenguaje de Programación Dinámico**

DPL (Dynamic Program Language) es un lenguaje de planificación y proyecto activo empleado en PowerFactory que proporciona a los usuarios la habilidad y competencia de personalizar y automatizar el software. Con su extensa gama de características, DPL se transfigura en un instrumento potente y efectivo para ajustar y adecuar PowerFactory a las necesidades características y particulares de estudio y ficción de sistemas de energía eléctrica [21].

Una de las peculiaridades y aspectos principales de DPL es su adaptabilidad. Los usuarios tienen la autonomía de escribir scripts y programas particularizados para realizar cálculos compuestos y emplear datos en PowerFactory. Esto permite la activación algorítmica especializada y la creación de herramientas de análisis que abordan contratiempos específicos en el campo de la ingeniería eléctrica.

Se puede considerar que sintaxis de DPL es inteligible, accesible y fácil de aprender, lo que posibilita que sea empleado y utilizado por usuarios con distintos niveles de experiencia en programación. Un programa en DPL se compone de instrucciones escritas en un formato legible para humanos, cabe señalar que no es el formato final del programa, en cambio, el código fuente

se ensambla en un archivo binario y se utiliza para ejecutar el programa. Las operaciones pueden incorporar la atribución de valores a variables, la elaboración de operaciones matemáticas, la llamada a utilidades predefinidas y poner en práctica las configuraciones de control, como condicionales, bucles, y ondulaciones [23].

DPL también cuenta con una amplia gama de funciones y objetos incorporados en PowerFactory, lo que amplía aún más sus capacidades. Estas funciones y objetos se pueden utilizar para manipular y analizar datos, crear y modificar elementos del sistema eléctrico, realizar simulaciones y mucho más. Algunos ejemplos de funciones incorporadas incluyen funciones matemáticas, funciones de manipulación de cadenas y funciones para acceder y modificar elementos de la red eléctrica [24].

El lenguaje DPL permite el uso de variables para almacenar y manipular datos. Los usuarios pueden declarar variables y asignarles valores utilizando una sintaxis sencilla. Las variables en DPL pueden contener diferentes tipos de datos, como números, cadenas de texto y matrices, lo que brinda una gran flexibilidad en la representación de la información [24].

La capacidad de DPL para implementar estructuras de control, como bucles y condicionales, es otro aspecto poderoso del lenguaje. Los bucles habilitan y propician repetir una sucesión de procedimientos con un número delimitado de veces o también que se lleve a cabo una disposición delimitada. Los condicionales, por otro lado, permiten efectuar diversos bloques de código según una condición establecida, lo que posibilita tomar distintas resoluciones en representación de los resultados de indagación, simulaciones, distinción o análisis [22].

### **2.5.2. DPL y DSL en la Automatización de Procesos**

Una de las características más poderosas de DPL en PowerFactory es su capacidad para personalizar y automatizar diferentes aspectos del software. DPL brinda a los usuarios la flexibilidad de adaptar PowerFactory a sus necesidades específicas y automatizar tareas repetitivas, lo que mejora la eficiencia y reduce la posibilidad de errores humanos. En esta

sección, se explorarán ejemplos prácticos de cómo DPL se utiliza en PowerFactory con fines de automatización [23].

DPL permite a los usuarios escribir programas específicamente diseñados y adaptados para realizar cálculos complejos y desarrollar algoritmos adaptados a sus necesidades. Por ejemplo, los ingenieros eléctricos pueden desarrollar algoritmos de optimización para encontrar la configuración más eficiente de una red eléctrica, minimizando los costos de operación o maximizando la confiabilidad del sistema [22].

El lenguaje DSL utiliza el modelado de diagramas de bloques (o funciones de transferencia en términos de Laplace o dominio de frecuencia) para desarrollar un modelo DSL, ya que esta es la forma más común de encontrar información sobre los dispositivos de control. En este caso concreto, se ha utilizado la funcionalidad DSL para realizar dos tareas [4]:

- Se implementa el modelo AVR.
- Se procede con el cálculo, en cada paso de integración, la función  $g(t)$ , que es un componente fundamental de la función objetivo OF de la siguiente manera:

$$g(t) = w[Ef_{simu}(t) - Ef_{real}(t)]^2 \quad (9)$$

donde  $w = 100$  (factor de peso),  $Ef_{simu}$  es el voltaje inducido simulado (salida AVR) y  $Ef_{real}$  es el voltaje inducido registrado (de las pruebas de campo). En este caso particular, solo se ha realizado una prueba de campo utilizando una prueba de respuesta de pulso rectangular (también podría ser una prueba de respuesta de paso) realizada en la señal de entrada de referencia del AVR [4].

$Ef_{real}$  constituye la señal de referencia registrada que proviene de la prueba de campo. Estos valores discretos de tiempo se almacenan en un "Archivo de medición", mientras que los valores simulados correspondientes ( $Ef_{simu}$ ) provienen de la salida del AVR



correspondiente, previamente implementado en DSL. Tanto las señales grabadas como las simuladas se utilizan para calcular  $g(t)$  [4].

### **2.5.3. Python**

Es necesario considerar que Python es un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente reconocido en diversas áreas, que incluyen programación web, ciencia de datos, automatización de tareas, inteligencia artificial y numerosas aplicaciones adicionales. Python sobresale gracias a su sintaxis fácil de comprender y su accesibilidad, esto lo convierte en una elección muy apreciada por programadores de todos los niveles de experiencia.

En relación a PowerFactory, Python brinda la capacidad de interactuar con el software de DlgSILENT. PowerFactory, por su parte, se destaca como una aplicación informática empleada en la industria eléctrica para llevar a cabo análisis de sistemas de potencia, planificación, diseño y simulación de sistemas eléctricos. Python ofrece múltiples opciones para conectarse y colaborar con PowerFactory de diversas formas:

- **Scripting y Automatización:** Python se transforma en una herramienta efectiva para la creación de secuencias de comandos que automatizan acciones en PowerFactory. Esta capacidad resulta valiosa para llevar a cabo tareas recurrentes o de alta complejidad, generar informes a medida y ejecutar simulaciones de forma masiva.
- **Integración de Datos:** Python es capaz de leer y escribir datos de forma bidireccional con PowerFactory. Esto habilita la transferencia de información entre PowerFactory y otras aplicaciones o bases de datos, simplificando el proceso de intercambio de datos.
- **Análisis de Resultados:** Tras llevar a cabo simulaciones en PowerFactory, es posible procesar y examinar los resultados mediante Python. Esto implica la creación de gráficos a medida, el cálculo de métricas de desempeño y la realización de análisis estadísticos.
- **Extensiones personalizadas:** Puedes crear extensiones personalizadas para PowerFactory utilizando Python. Esto te permite agregar funcionalidades específicas para satisfacer tus necesidades particulares.

En comparación con C y C++, Python se destaca por ser más accesible para aprender, leer, escribir y depurar. Es un lenguaje de programación de alto nivel que cuenta con una amplia variedad de funciones y herramientas estándar. Además, la prevalencia de Python en las comunidades científicas y de ingeniería ha dado lugar a una extensa colección de bibliotecas de código abierto confiables y de fácil uso, como SciPy para cálculos científicos, scikit-learn para aprendizaje automático y pandas para la manipulación y análisis de grandes conjuntos de datos. Estas cualidades hacen que Python sea atractivo cuando se busca simplificar el proceso de programación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, dado que la versión 15.1 de PowerFactory ofrece una API de Python 3, esta API no puede ser llamada durante una simulación dinámica, y mucho menos desde un modelo DSL, ya que está principalmente diseñada para automatizar tareas relacionadas con la simulación.

## **2.6. Estabilidad de Voltaje**

Este determinado concepto hace referencia a la competencia de los distintos sistemas eléctricos para proveer y suministrar un voltaje constante dentro de los límites permitidos, a pesar de las variaciones en la carga o las condiciones de operación. Un voltaje inestable puede causar daños a los equipos, interrupciones en los procesos industriales e incluso cortes de energía en casos extremos. En los sistemas eléctricos de potencia, la estabilidad del voltaje es un aspecto crucial para asegurar un suministro de energía confiable y seguro.[25].

Se abordará los desafíos asociados con la variabilidad de la carga, las fluctuaciones en la generación de energía y las condiciones de transmisión y distribución. Se presentan técnicas y estrategias de control utilizadas para mantener el voltaje dentro de rangos aceptables, así como estudios de caso y avances recientes en el campo. El objetivo es proporcionar una visión integral en los sistemas de potencia, enfatizando que la estabilidad del voltaje es crucial.

### **2.6.1. Importancia de la estabilidad de voltaje**

Es relevante enfatizar que este concepto tiene como un aspecto fundamental los sistemas eléctricos modernos. En un mundo cada vez más dependiente de la electricidad, mantener un suministro de energía confiable y seguro es esencial para garantizar el funcionamiento adecuado de diversos sectores, desde el hogar hasta la industria.

Un voltaje inestable puede tener consecuencias negativas significativas. En primer lugar, puede provocar daños en los equipos eléctricos y electrónicos sensibles. En un entorno residencial, las fluctuaciones de voltaje pueden afectar electrodomésticos como televisores, computadoras, refrigeradores y sistemas de climatización. Estos dispositivos requieren un suministro de energía estable para un funcionamiento óptimo y una vida útil prolongada [25].

En el ámbito industrial, donde los procesos dependen de maquinarias y equipos complejos, la estabilidad de voltaje es aún más crítica. Las fluctuaciones en el voltaje pueden provocar fallas en los sistemas de control, errores en las mediciones, tiempos de parada no planificados y disminución de la eficiencia de producción. Estos problemas pueden tener un impacto económico significativo, ya que las interrupciones en la producción pueden llevar a pérdidas financieras considerables [26].

Además de ocasionar daños en los equipos y provocar interrupciones en la producción, la inestabilidad del voltaje también puede incidir en la calidad de la energía proporcionada. Las fluctuaciones en el voltaje pueden generar armónicos y desequilibrios en el sistema eléctrico, lo que puede afectar negativamente a otros dispositivos conectados a la red eléctrica. Estos problemas pueden manifestarse en forma de ruido en los sistemas de audio y video, interferencias en las comunicaciones y mal funcionamiento de equipos de precisión, como sistemas de iluminación, equipos médicos y sistemas de control de procesos [26].

Para garantizar un suministro de energía confiable y seguro, es fundamental mantener la estabilidad del voltaje dentro de límites aceptables. Esto implica monitorear de cerca las

fluctuaciones en la carga eléctrica, así como las variaciones en la generación y distribución de energía. Se requiere una coordinación adecuada entre los diversos elementos del sistema eléctrico, como generadores, transformadores, reguladores de voltaje y sistemas de control [27].

En la actualidad, con la creciente integración de ciertas fuentes de energía renovable y el avance de diversos sistemas energéticos, la estabilidad del voltaje ha surgido como un desafío adicional. Fuentes de energía renovable como la solar y la eólica son más variables y menos predecibles en comparación con las fuentes de energía convencionales. Esto puede introducir fluctuaciones y desequilibrios en el voltaje, especialmente durante la transición entre diferentes fuentes de energía [28].

Por tanto, es crucial desarrollar estrategias y tecnologías avanzadas que permitan una mejor integración de las energías renovables sin comprometer la estabilidad del voltaje. Los avances en sistemas de control, monitoreo en tiempo real y tecnologías de almacenamiento de energía juegan un papel fundamental en la realización de estudios sobre el impacto de la estabilidad del voltaje en el sistema de potencia.

### **2.6.2. Factores que afectan la estabilidad de voltaje**

La estabilidad de voltaje en el sistema eléctrico se ve influenciada por diversos factores que pueden tener una influencia significativa en la calidad y fiabilidad de la fuente de alimentación. Comprender estos factores es esencial para implementar las medidas adecuadas y mantener la estabilidad del voltaje dentro de límites aceptables [25].

Uno de los factores clave que afecta la estabilidad de voltaje es la variabilidad de la carga eléctrica. Las cargas no lineales, como los dispositivos electrónicos modernos y equipos de control, pueden generar armónicos y desequilibrios en el voltaje. Estas fluctuaciones pueden propagarse a través del sistema eléctrico y afectar negativamente a otros equipos conectados. Para abordar este problema, es necesario implementar filtros y sistemas de compensación de

armónicos para reducir los efectos adversos de la variabilidad de la carga en la estabilidad del voltaje [26].

Otro factor que influye en la estabilidad de voltaje es la fluctuación en la generación de energía. Los sistemas eléctricos dependen de una combinación de fuentes de energía, que pueden incluir generación térmica, hidroeléctrica, nuclear y, cada vez más, energías renovables. Las fluctuaciones en la generación, ya sea debido a la disponibilidad de combustible, condiciones climáticas variables o fallas en los equipos, pueden causar variaciones en el voltaje suministrado. Para mitigar estos efectos, se emplean sistemas de control de generación y estrategias de despacho de energía que garantizan una generación equilibrada y estable [27].

Las condiciones de transmisión y distribución también pueden afectar la estabilidad de voltaje. Las pérdidas en las líneas de transmisión y la resistencia de los conductores pueden ocasionar disminuciones de voltaje durante el transporte de energía desde las plantas generadoras hasta los puntos de consumo.

Además, la configuración de las ubicaciones y la red de distribución, de los transformadores pueden influir en la estabilidad del voltaje. Se requiere un diseño adecuado de la infraestructura eléctrica, así como medidas de compensación y regulación de voltaje, para garantizar que el voltaje entregado a los consumidores se mantenga dentro de los rangos aceptables [29].

Además de estos factores tradicionales, utilizando e incorporando fuentes de energías renovables, y la interconexión de sistemas de potencia han agregado nuevos desafíos para la estabilidad de voltaje. Las fuentes de energía que son renovables, tales como la solar y la eólica, son inherentemente variables y dependen de las condiciones climáticas. Esto puede causar fluctuaciones en la generación de energía y, por lo tanto, en el voltaje suministrado. Para enfrentar este desafío, se están desarrollando tecnologías avanzadas, como sistemas de control de red inteligentes y sistemas de almacenamiento de energía, con el objetivo de lograr una integración más efectiva de las fuentes de energía renovable y contribuir a mantener la estabilidad del voltaje [28].

### **2.6.3. Estudio de la estabilidad de voltaje**

El análisis de estabilidad de voltaje es una herramienta esencial en la planificación y operación de sistemas de potencia. Facilita la evaluación del comportamiento dinámico de los sistemas y la predicción de su respuesta frente a perturbaciones, con el propósito de mantener una estabilidad de voltaje adecuada. Este análisis se lleva a cabo a través de diferentes métodos y técnicas, que proporcionan información valiosa para el diseño de sistemas eléctricos confiables y eficientes [25].

En el análisis de la estabilidad del voltaje, una de las técnicas empleadas es el análisis de estabilidad transitoria, que se centra en estudiar los fenómenos transitorios con un énfasis particular. Estos fenómenos transitorios ocurren inmediatamente después de una perturbación, como cortes de energía o cambios abruptos en la carga. A través del análisis de las ecuaciones dinámicas del sistema eléctrico y la simulación de su respuesta, se pueden identificar las condiciones críticas que pueden llevar a la inestabilidad del voltaje. Este enfoque no solo proporciona una comprensión detallada de los eventos transitorios, sino que también permite diseñar sistemas de protección y control adecuados. Estos sistemas están diseñados para evitar la inestabilidad del voltaje y garantizar una rápida recuperación del sistema después de perturbaciones, contribuyendo así a mantener la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico [25].

Otro método importante es el análisis de estabilidad a largo plazo. Este análisis es el componente clave de esta estrategia de estabilidad del voltaje en condiciones de operación normal, teniendo en cuenta las variaciones estacionales y las fluctuaciones en la demanda de energía. Mediante la modelización matemática de los componentes del sistema eléctrico, como generadores, transformadores y líneas de transmisión, se pueden realizar simulaciones a largo plazo para evaluar la estabilidad del voltaje en diferentes escenarios operativos. Esto suministra información valiosa para el diseño de redes, la ubicación de equipos de regulación de voltaje y la planificación de la capacidad de generación [26].

En el análisis de la estabilidad del voltaje, también se consideran los límites aceptables de voltaje. Estos límites son definidos por las normativas y estándares eléctricos y representan los valores mínimos y máximos de voltaje que deben mantenerse dentro de los sistemas. La evaluación contribuye a verificar si se están respetando estos límites y a determinar si es preciso aplicar medidas de control suplementarias, tales como la regulación de voltaje o la instalación de dispositivos de compensación de reactivos, con el fin de mantener el voltaje dentro de los márgenes aceptables [27].

Aparte de las técnicas previamente citadas, existen enfoques más sofisticados para analizar la estabilidad del voltaje, como el análisis fundamentado en simulaciones Monte Carlo, así como la aplicación de técnicas de inteligencia artificial. Estas metodologías permiten una evaluación más precisa y detallada de la estabilidad del voltaje, teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros y las incertidumbres en las condiciones de operación [27].

#### **2.6.4. Técnicas para mantener la estabilidad de voltaje**

La estabilidad del voltaje es esencial para asegurar un suministro de energía fiable y seguro en los sistemas eléctricos. Para lograr y mantener esta estabilidad, se utilizan diversas técnicas de control que permiten regular el voltaje y prevenir fluctuaciones no deseadas. Estas técnicas se emplean en diversos niveles del sistema eléctrico, desde la generación hasta la distribución, desempeñando un papel crucial en la mitigación de los efectos adversos de las variaciones en la carga y la generación. [25].

El empleo de reguladores de voltaje automáticos (AVR, por sus siglas en inglés) es una de las técnicas más habituales para preservar la estabilidad del voltaje. Estos dispositivos monitorean constantemente el voltaje y ajustan automáticamente la excitación de los generadores para mantener el voltaje dentro de los rangos aceptables. Los AVR regulan la tensión en los generadores y compensan las variaciones de carga, evitando así caídas o sobretensiones excesivas en el sistema eléctrico [25].

Además de los reguladores de voltaje automáticos, se utilizan dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) para el control y la regulación del voltaje. Los dispositivos FACTS incluyen elementos como los compensadores estáticos de voltaje (SVC) y mecanismos de control de flujo de potencia (PFC). Estos dispositivos ofrecen la capacidad de controlar y regular el flujo de potencia en el sistema eléctrico, contribuyendo así a mantener un voltaje estable y dentro de los límites aceptables [28].

Otra técnica utilizada es el uso del banco de condensadores para compensar la potencia reactiva. Los bancos de condensadores se utilizan para reparar el factor de potencia y mejorarlo eficazmente energética del sistema. Al proporcionar capacitancia adicional, los bancos de capacitores compensan las corrientes reactivas y reducen las caídas de voltaje asociadas con una carga inductiva. Esto ayuda a mantener un voltaje estable y a minimizar las fluctuaciones del sistema [28].

Además de las técnicas de control mencionadas, también se han desarrollado sistemas de control avanzados para mantener la estabilidad de voltaje. Estos sistemas utilizan algoritmos sofisticados y técnicas de control predictivo para monitorear y ajustar constantemente la producción, transmisión y distribución continua de energía. Al predecir y responder rápidamente a los cambios en la carga y la generación, estos sistemas de control avanzados ayudan a mantener la estabilidad del voltaje y minimizar las perturbaciones en el sistema eléctrico [29].



### **3. MARCO METODOLÓGICO**

En esta sección se presenta información importante de la central hidroeléctrica, que se usó para la modelación en software de la misma junto con su unidad de generación y su regulador automático de voltaje, el protocolo de pruebas para el AVR y su implementación detallada en PowerFactory.

#### **3.1. Datos Técnicos Central Hidroeléctrica El Ambi**

La Central Hidroeléctrica AMBI se ubica en el Cantón Ibarra, en la provincia de Imbabura, aproximadamente a unos 8 kilómetros de la ciudad de Ibarra [5]. La localización geográfica se puede caracterizar de la siguiente forma:

- Representación de la latitud en el hemisferio norte: 0 grados, 23 minutos y 45 segundos.
- Representación de la longitud en el hemisferio oeste: 78 grados, 9 minutos y 8 segundos.
- En coordenadas UTM: 17N 17010,30 43805,90.

La Central se abastece mediante las aguas provenientes del río ambi, que fluyen a un ritmo promedio de  $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , estas aguas son captadas aproximadamente a 10 kilómetros en la dirección del flujo del río partiendo desde la casa de maquinaria de la central hidroeléctrica Atuntaqui para llevar a cabo este proceso, se utiliza un canal que tiene una longitud total de 5994 metros de este tramo, 5979 metros corresponden a cuatro segmentos de túneles subterráneos, mientras que los 14.63 metros restantes son un canal al aire libre que finalmente llega al reservorio. Sin embargo, es de suma importancia destacar que el caudal del río AMBI varía a lo largo del año, lo que resulta que se produzca una generación de energía no constante en épocas de sequía, cuando el caudal es mínimo, la capacidad de generación de la central puede disminuir significativamente, llegando a producir tan solo 1500 kilovatios durante las horas pico, que generalmente comprenden el período de 17 a 21 h [5].

Se puede considerar que en momentos en los que el río Ambi cuenta con un caudal adecuado durante las horas de mayor demanda, la central hidroeléctrica opera a su capacidad nominal, generando 8 megavatios (MW), mientras que durante las 20 horas restantes, produce aproximadamente 3 MW, la supervisión de este proceso está a cargo del (CENACE), la entidad a cargo de regular la distribución de energía eléctrica a nivel nacional y llevar a cabo un control constante y horario, y cualquier operación o ejecución de las centrales de generación requiere una notificación anticipada para obtener la autorización correspondiente. Además, cerca del edificio de operaciones de la central El Ambi, existe una subestación denominada con el mismo nombre de la central, encargada de elevar la tensión de 4160 voltios a 34500 voltios, con el propósito de transmitir la energía eléctrica hacia la subestación Alpachaca, la cual su vez suministra energía a la ciudad de Ibarra.

La demanda eléctrica de Ibarra es de aproximadamente 15 mega voltamperios (MVA), y la central El Ambi contribuye con el 51 % de esta demanda; por lo tanto, su operación se encuentra bajo un monitoreo constante por parte de la sección de Generación y Subtransmisión dentro de Emelnorte S.A. asimismo, la central dispone de un reservorio destinado a almacenar una cantidad significativa de agua, con el propósito de garantizar un caudal adecuado durante las horas pico de demanda, proporcionando así un caudal de 5.8 metros cúbicos por segundo para una generación de 8 MW [5].

La central hidroeléctrica El Ambi cuenta con una capacidad declarada de generación de energía de 8000 kilovatios (KW) la cual alcanza su punto máximo durante las horas de mayor demanda, un lapso que perdura aproximadamente 4 horas, abarcando desde las 17:00 hasta las 21:00 horas. Además, las turbinas en la central tienen una potencia nominal de 11356 caballos de vapor (CV) o 8352,32 kW. Esta instalación consta de dos unidades generadoras que son prácticamente idénticas en su configuración las turbinas en funcionamiento aprovechan un caudal de agua de 3.0 metros cúbicos por segundo y se benefician de una caída de altura de 167 metros para generar energía eléctrica los generadores producen electricidad a una tensión de salida de 4160 voltios, pero esta se eleva a 34500 voltios durante la etapa de transmisión, gracias a la presencia de una subestación equipada con dos transformadores de potencia, cada uno con una

capacidad de 5000 kilo voltamperios (kVA). La energía eléctrica generada se transporta a través de una línea eléctrica trifásica de 34.5 kilovoltios (kV), la energía es transportada hasta la subestación Alpachaca, situada en la ciudad de Ibarra. Vale la pena destacar que esta central opera de manera continua, las 24 horas del día, en una coordinación estrecha con el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y su funcionamiento está sujeto al control del CENACE [5].

### **3.2. Protocolos de pruebas**

Realizada la conexión de equipos como el de inyección y adquisición de señales para llevar a cabo las pruebas de rendimiento del sistema “Generador-Regulador de Voltaje” respecto a cambios controlados del voltaje de referencia en el software del AVR ante pruebas de paso o escalón.

Se ejecuta esta evaluación en el Generador-AVR para analizar el rendimiento del sistema de excitación y los parámetros del regulador. Para ello, se introducen señales controladas para modificar el punto de referencia. del voltaje terminal del generador, esto considerando la unidad de generación operando sin carga.

Los requisitos esenciales para llevar a cabo las evaluaciones, es tener la unidad de generación a velocidad y voltaje nominal, el interruptor de la Unidad en posición abierta o cerrada, la transición de un paso a la referencia de voltaje del AVR se debe generar internamente en el sistema AVR mediante software o por inyección externa mediante un inyector de señales.

En las pruebas sin carga (en vacío), se registran el voltaje terminal del generador ( $V_t$ ), la corriente de campo del generador ( $I_f$ ), el voltaje de excitación del generador ( $V_f$ ) y el voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ). Todas las señales se registran con una tasa de muestreo de 16 milisegundos. Los resultados deben ser fácilmente legibles, estar etiquetados de manera clara y contar con la escala adecuada expresada en unidades de ingeniería.

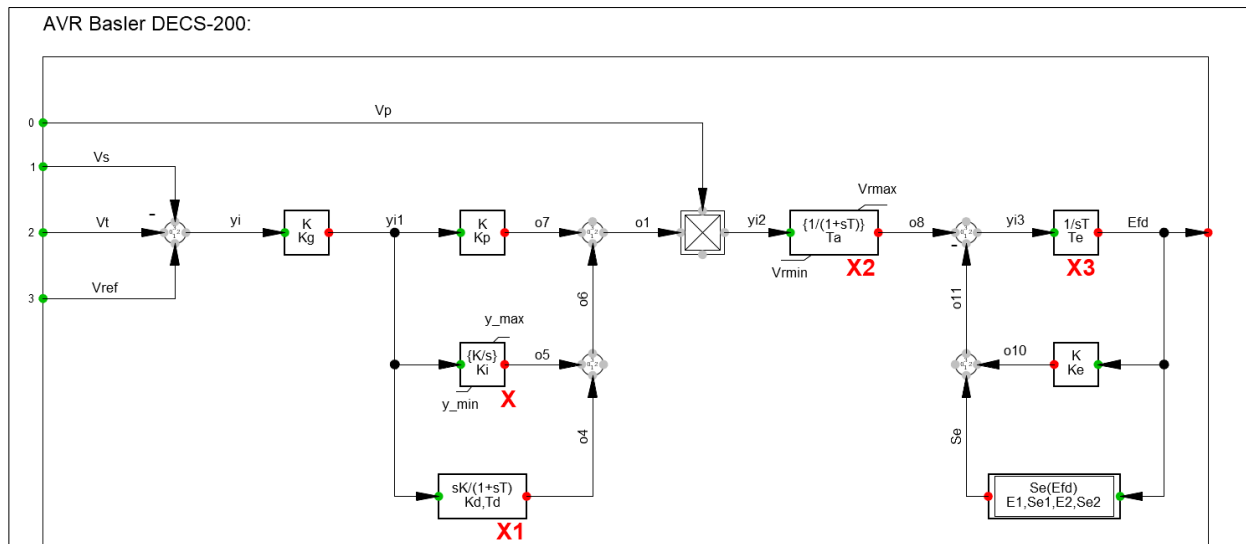
Cambiar el setpoint del voltaje de la referencia de la unidad. En este sentido se realizan las siguientes pruebas:

- Incremento de un paso de 1% hasta que  $V_t$  se estabilice y mantenerlo por 58 segundos.
- Incremento de un paso de 3% hasta que  $V_t$  se estabilice y mantenerlo por 30 segundos.
- Incremento de un paso de 5% hasta que  $V_t$  se estabilice y mantenerlo por 36 segundos.

### **3.3. Implementación en PowerFactory**

Una vez facilitado el diagrama de bloques (Figura 2) y los parámetros correspondientes el AVR Basler DECS-200 ubicado en la central de generación hidroeléctrica El Ambi por parte de Emelnorte, se empieza con el modelado en PowerFactory 2021 SP2. Se crea una nueva carpeta dentro del software con el nombre de “El Ambi” y dentro de esta el proyecto “AVR\_MVMO”, la red denominada “Grid” en el software será de 60 Hz y dentro de esta se utilizará un generador conectado a una barra, cabe recalcar que, a pesar de existir dos generadores en la central, el AVR solo está implementado en la unidad 2 de generación, por tal motivo solo usamos un generador en la simulación.

Se carga en los datos del generador el tipo denominado “G\_H\_Ambi\_2” que contiene la potencia aparente nominal, el voltaje nominal, el factor de potencia, entre otros datos relacionados a la máquina para una mayor precisión en los resultados. Se procede con la implementación del AVR al generador, para esto en la Figura 7 se arma el diagrama de bloques del AVR, en una nueva página se crea un “Block/Frame Diagram” con el nombre de “AVR Basler DECS-200”, se eligen los componentes, los bloques y se genera las conexiones.



**Figura 7** Diagrama de Bloques del AVR Basler DECS-200.

A continuación, se inicializan las variables de estado del AVR:

*Bloque X3:*

- $y_o = x$ ; por lo tanto,  $X3 = Efd$
- $y_i = 0$ ; por lo tanto,  $y_{i3} = 0$

$$o8 = Se * (Ke * Efd)$$

*Bloque X2:*

- $y_o = x$ ; por lo tanto,  $X2 = o8$
- $y_i = x$ ; por lo tanto,  $y_{i2} = X2$

$$X2 = Se * (Ke * Efd)$$

### Bloque PID

*Bloque X1:*

- $y_o = 0$ ; por lo tanto,  $X1 = 0$
- $y_i = x$ ; por lo tanto,  $y_{i1} = 0$

*Bloque X:*

- $y_o = x$ ; por lo tanto,  $X = o5$
- $y_i = 0$ ; por lo tanto,  $y_{i1} = 0$

$$o5 = \frac{Se * (Ke * Efd)}{Vp}$$

Valores Iniciales:

$$X = \frac{Se * (Ke * Efd)}{Vp}$$

$$X3 = Efd$$

$$X1 = 0$$

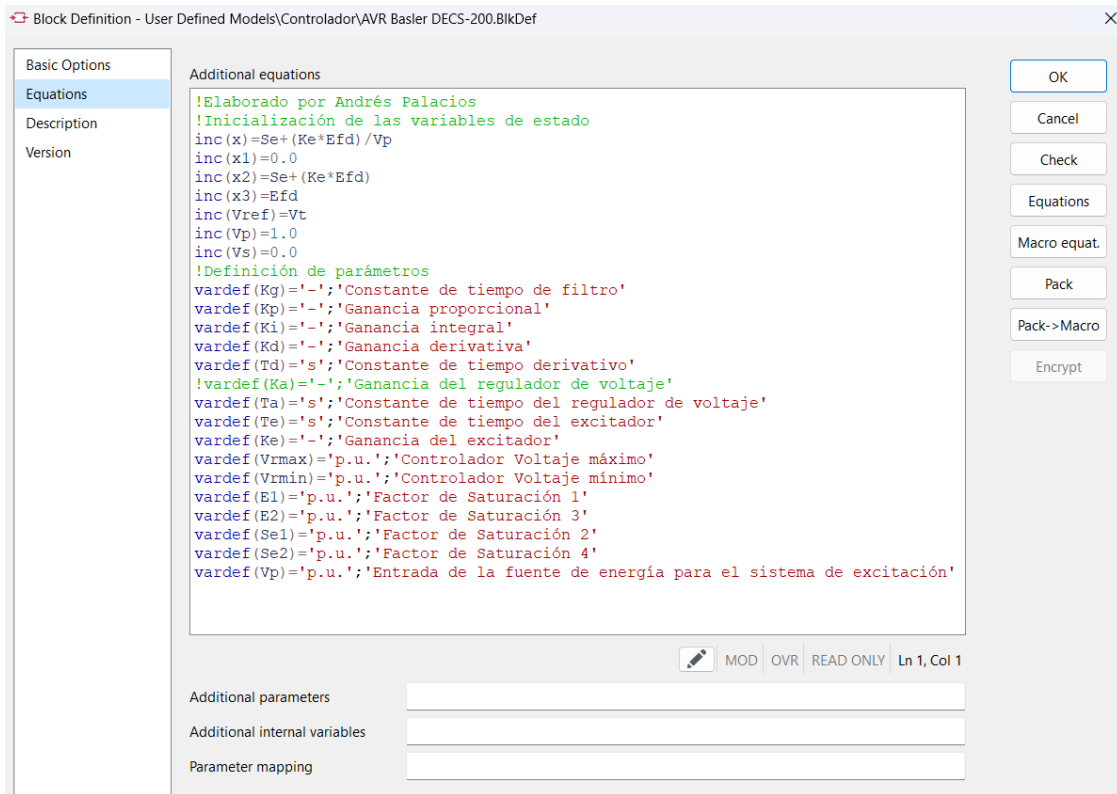
$$Vref = Vt$$

$$X2 = Se * (Ke * Efd)$$

$$Vp = 1$$

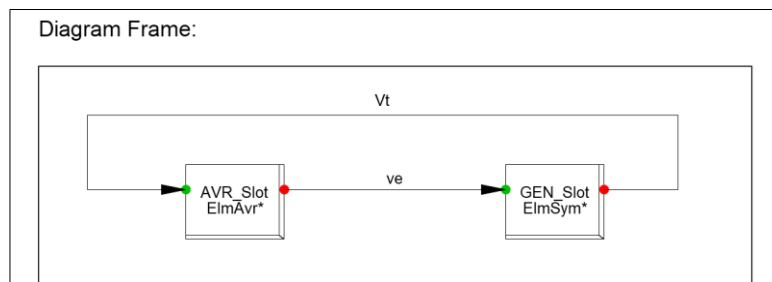
$$Vs = 0$$

Obtenidas las condiciones iniciales de las variables de estado, en la Figura 8 se genera el código dentro del “Block/Frame Diagram”, para otorgarles los valores calculados dentro del software y nombrar a cada parámetro con su respectivo nombre o función dentro del diagrama del regulador automático de voltaje.



**Figura 8** Inicialización de las variables de estado.

Realizado y chequeado que el diagrama de bloques no haya botado ningún error, se procede a crear otro “Block/Frame Diagram”, pero en este caso en vez de usar bloques, se usarán “Slots”, el objetivo de esta nueva ventana a la que se le denominará con el nombre de “Diagram Frame”, es crear el nexo entre la máquina generadora y el regulador de voltaje, dentro de este diagrama que corresponde a la Figura 9, existirán solo dos slots conectados entre ellos.



**Figura 9** Nexa entre el Generador y el AVR.

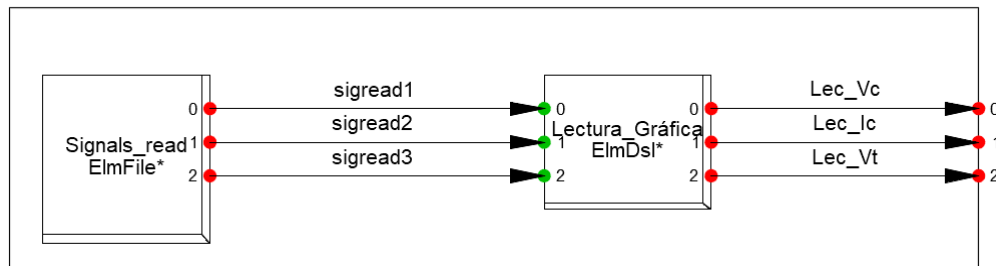
A continuación, en la malla situada en Network Model>Network Data>Grid, se crea un “Composite Model” donde se cargará el “Diagram Frame” y dentro de este se crea un “Common Model” donde se cargará el diagrama de bloques del regulador de voltaje “AVR Basler DECS-200”, una vez realizado este proceso, en la Figura 10 se puede visualizar ya los parámetros con sus respectivos valores numéricos (datos obtenidos de la configuración real del AVR en la central hidroeléctrica).

	Parameter	
Kg	Constante de tiempo de filtro [-]	1,
Kp	Ganancia proporcional [-]	30,
Ta	Constante de tiempo del regulador de voltaje [s]	0,075
Te	Constante de tiempo del excitador [s]	0,35
Ki	Ganancia integral [-]	150,
Kd	Ganancia derivativa [-]	2,
Td	Constante de tiempo derivativo [s]	0,08
Ke	Ganancia del excitador [-]	0,5
E1	Factor de Saturación 1 [p.u.]	3,9
Se1	Factor de Saturación 2 [p.u.]	0,1
E2	Factor de Saturación 3 [p.u.]	5,2
Se2	Factor de Saturación 4 [p.u.]	0,5
Vmin	Controlador Voltaje mínimo [p.u.]	-5,
y_min		-5,
Vmax	Controlador Voltaje máximo [p.u.]	5,
y_max		5,

**Figura 10** Parámetros del Regulador de Voltaje.

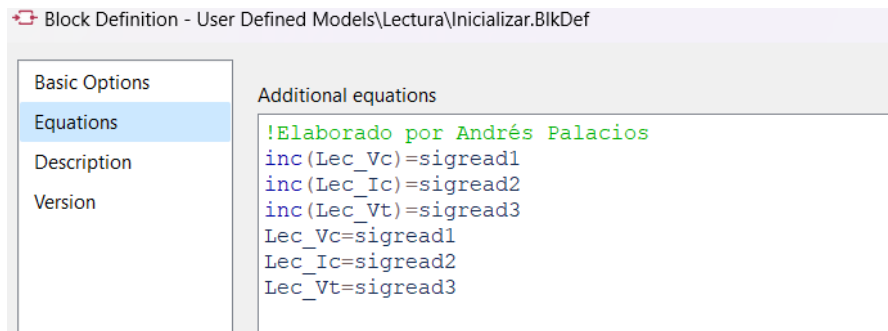
Como siguiente paso, se procede a la creación de los eventos que se realizaron en las pruebas físicas con el regulador de voltaje en la central hidroeléctrica, para poder simular y observar el comportamiento dinámico en el software. Terminada la parte correspondiente a la simulación, se importan los datos recolectados de las pruebas al PowerFactory. Para leer los datos medidos en las pruebas, se crea otro frame (Lectura), en la Figura 11 se observa los componentes del nuevo frame.





**Figura 11** Frame Lectura.

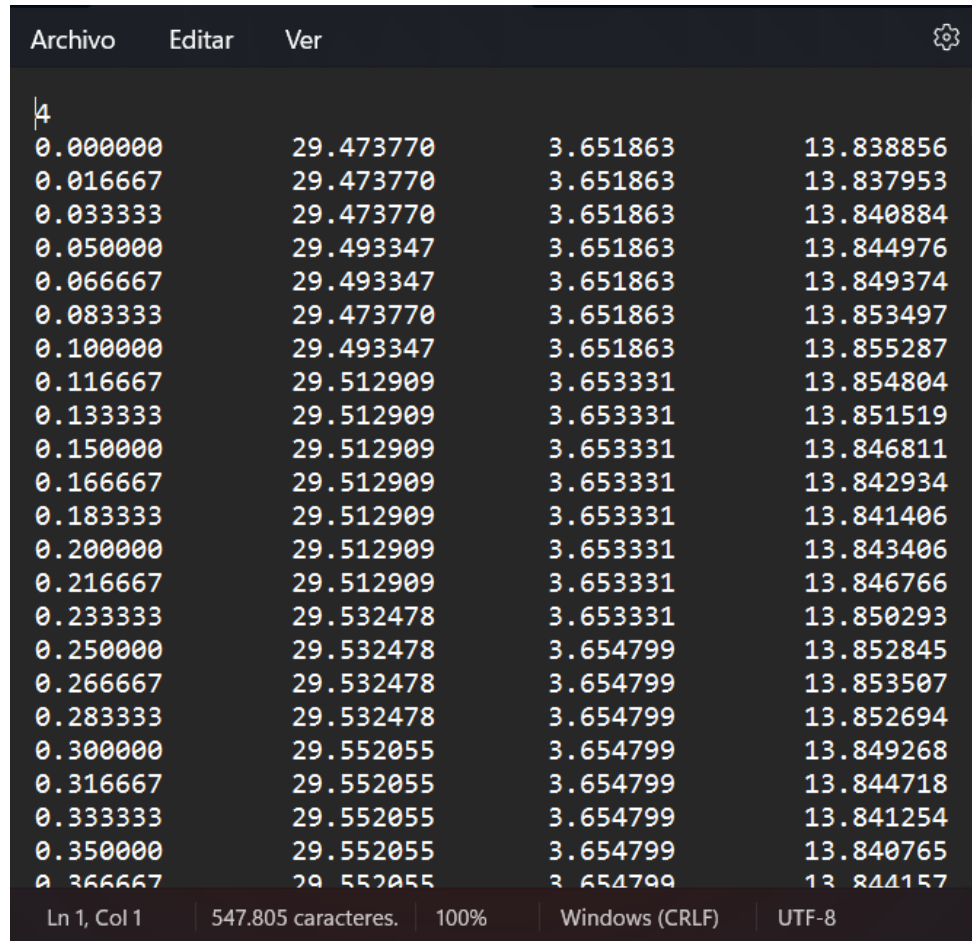
Ahora se procede con la creación de los elementos que irán dentro de los slots “Lectura\_Gráfica” y “Signals\_read”. Para el slot “Lectura\_Gráfica”, se crea una nueva ventana de la misma manera que para un diagrama de bloques y se lo denomina “Inicializar”, pero en esta ocasión no se dibujará ningún diagrama de bloques, la página queda en blanco, la función de esta ventana es darles a variables los valores de los datos leídos en campo, en la Figura 12 se inicializan las variables para esta ventana.



**Figura 12** Ecuaciones del diagrama Inicializar.

Hecho esto, lo siguiente es cargar nuevamente dentro de la malla situada en Network Model>Network Data>Grid, un “Composite Model” donde se cargará el diagrama de slots “Lectura” y dentro de este se crea un “Common Model” donde se cargará el diagrama “Inicializar”. Como siguiente paso, se crea un “Measurement File” y se lo carga en “Lectura” en el slot “Signals\_read”. Dentro del “Measurement File” se coloca la dirección del archivo txt (Figura 13) con los datos de campo, los valores de la constante “a” corresponden a la división de 1 entre el primer valor de cada columna del archivo txt, esto con la finalidad de transformar a

valores en por unidad los datos y poderlos apreciar en una escala pequeña al momento de graficar.



Archivo	Editar	Ver	
4			
0.000000	29.473770	3.651863	13.838856
0.016667	29.473770	3.651863	13.837953
0.033333	29.473770	3.651863	13.840884
0.050000	29.493347	3.651863	13.844976
0.066667	29.493347	3.651863	13.849374
0.083333	29.473770	3.651863	13.853497
0.100000	29.493347	3.651863	13.855287
0.116667	29.512909	3.653331	13.854804
0.133333	29.512909	3.653331	13.851519
0.150000	29.512909	3.653331	13.846811
0.166667	29.512909	3.653331	13.842934
0.183333	29.512909	3.653331	13.841406
0.200000	29.512909	3.653331	13.843406
0.216667	29.512909	3.653331	13.846766
0.233333	29.532478	3.653331	13.850293
0.250000	29.532478	3.654799	13.852845
0.266667	29.532478	3.654799	13.853507
0.283333	29.532478	3.654799	13.852694
0.300000	29.552055	3.654799	13.849268
0.316667	29.552055	3.654799	13.844718
0.333333	29.552055	3.654799	13.841254
0.350000	29.552055	3.654799	13.840765
0.366667	29.552055	3.654799	13.844157

Ln 1, Col 1 | 547.805 caracteres. | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8

**Figura 13** Contenido del archivo de texto (.txt).

La configuración interna del archivo de texto de la figura 13 es de 4 columnas, donde la columna 1 pertenece al tiempo de muestreo, la columna 2 es el voltaje de campo, la columna 3 es la corriente de campo y la columna 4 es el voltaje en los terminales del generador.

En la Figura 14 se muestra la configuración del “Measurement File”.

Measurement File - Grid\Lector\Measurement File.ElmFile

**Basic Data**

Description

**Load Flow**

Short-Circuit VDE/IEC

Short-Circuit Complete

Short-Circuit ANSI

Short-Circuit IEC 61363

Short-Circuit DC

Simulation RMS

Simulation EMT

Power Quality/Harmonics

Reliability

Hosting Capacity Analysis

Optimal Power Flow

Name: Measurement File

Import from: Measurement File

Filename: gramas\Notas\Pruebas AVR vacio U9 1P3P5P.txt

☐ Out of Service

Conversion for each Output  $y_i = a \cdot x_j + b$ :

	Column j	Factor a	Factor b
y1	1	0,0339	0,
y2	2	0,2738	0,
y3	3	0,07226	0,
y4	4	1,	0,
y5	5	1,	0,
y6	6	1,	0,
y7	7	1,	0,
y8	8	1,	0,
y9	9	1,	0,
y10	10	1,	0,

Approximation: linear

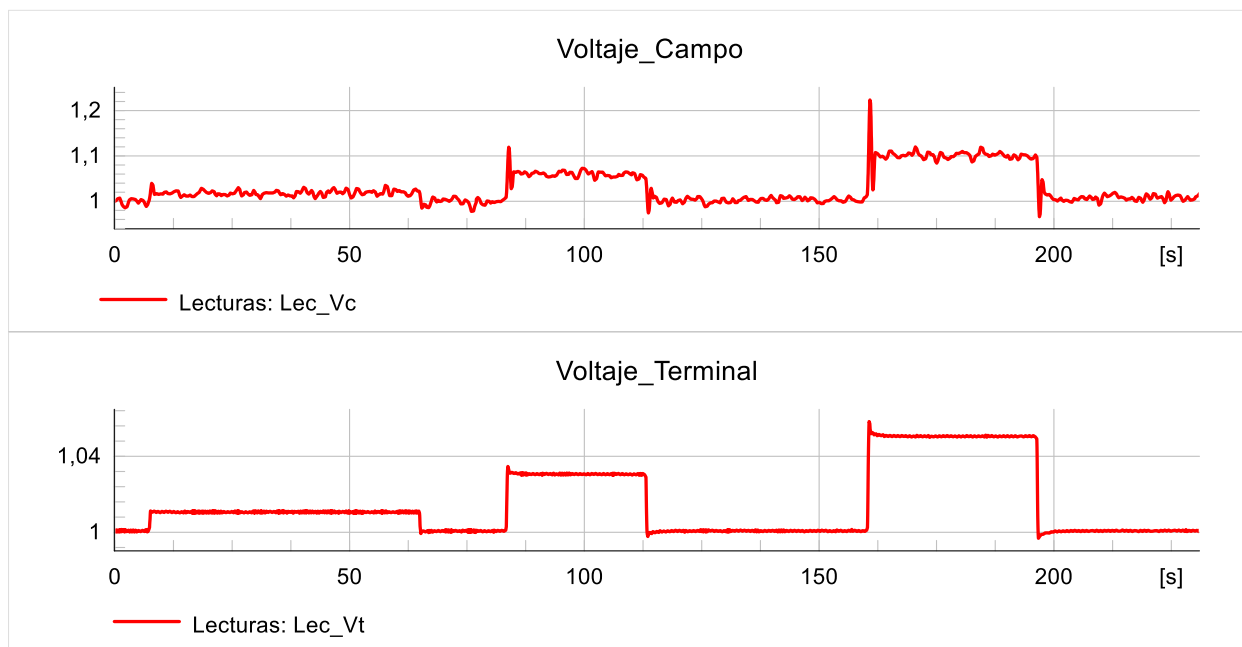
OK

Cancel

Descript.

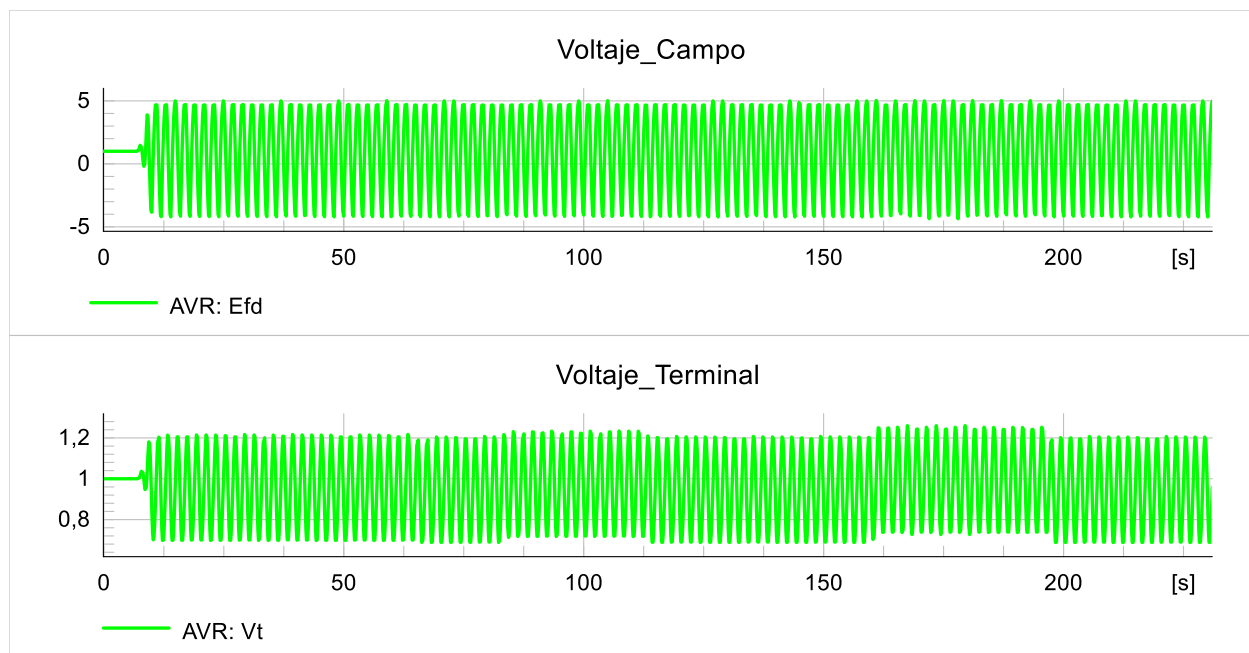
**Figura 14** Measurement File.

Ya en este punto del modelado, en la Figura 15 se puede revisar las gráficas de las señales recolectadas de las pruebas en campo, específicamente del voltaje de campo y el voltaje en los terminales del generador.



**Figura 15** Señales recolectadas de las pruebas en campo.

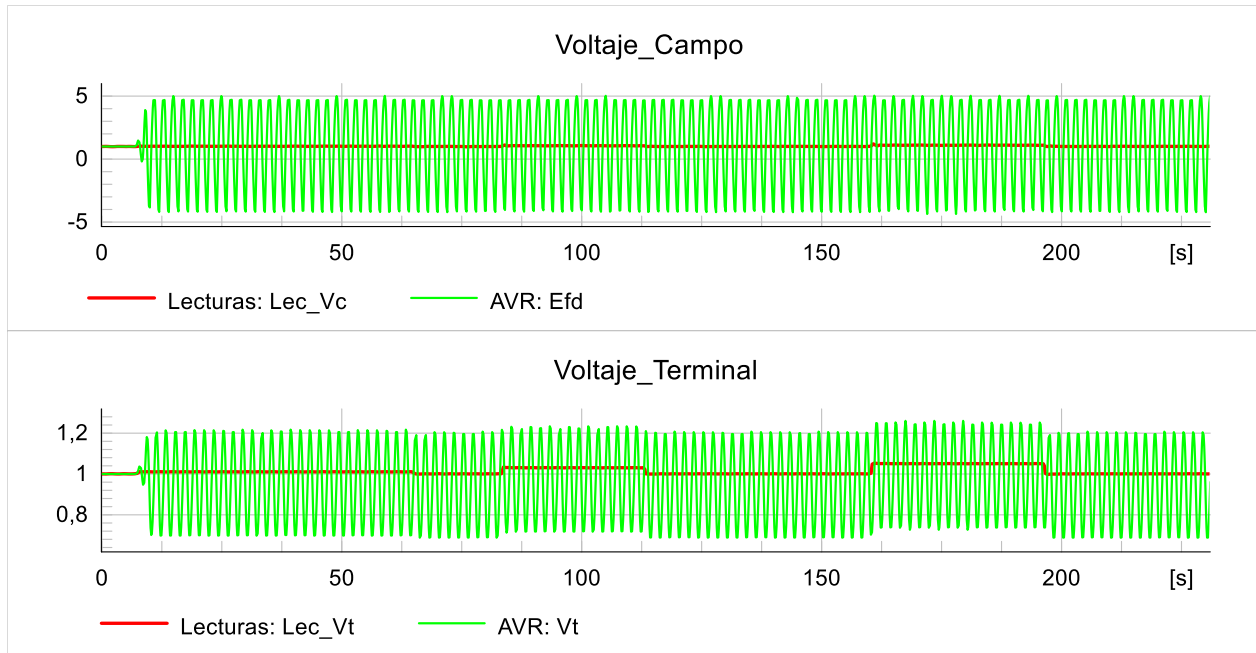
Y en la Figura 16 se puede revisar las gráficas de la simulación de las señales del AVR con sus parámetros iniciales.



**Figura 16** Señales simuladas en PowerFactory.

### 3.4. Optimización de los parámetros del AVR

Se puede notar en la Figura 17 la diferencia que existe entre la señal simulada de color verde y la real de color rojo, para esto es necesario encontrar los parámetros adecuados para el AVR en PowerFactory que simulen un comportamiento similar al de las señales reales leídas en las pruebas de campo.



**Figura 17** Señales leídas y simuladas.

Con este fin se plantea un problema de optimización en el que se buscará minimizar el error existente entre las señales leídas o de referencia con las simuladas como se presenta en la fórmula 7. La función objetivo se define con más detalle de la siguiente manera:

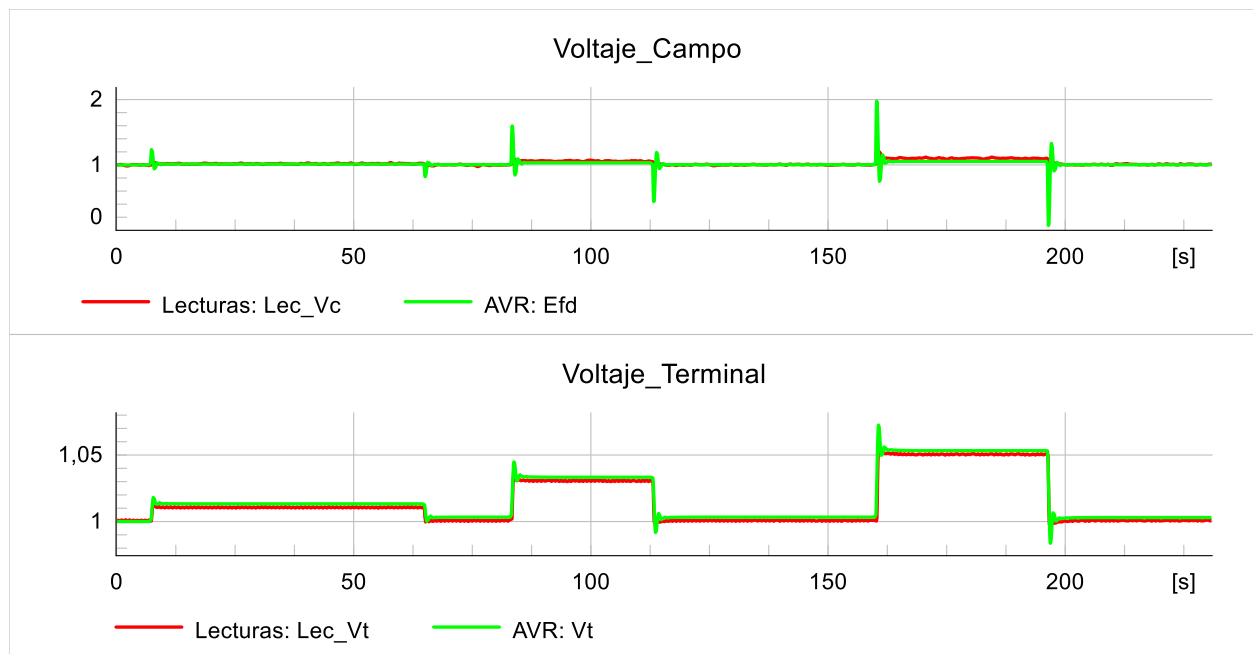
$$OF = w_1[y_{1ref}(t) - y_{1simu}(t)]^2 + \dots + w_n[y_{nref}(t) - y_{nsimu}(t)]^2 \quad (10)$$

donde  $y_{nsimu}(t)$  indica las “n-ésimas” señales simuladas en PowerFactory,  $y_{nref}(t)$  indica las “n-ésimas” señales de referencias eléctricas registradas en las pruebas de campo y  $w_n$  figura el “n-ésimo” elemento de peso para cada señal.

El lenguaje de programación para implementar el algoritmo de optimización MVMO será Python, en la Figura 6 se aprecia la manera en la cual se encontrará constantemente interactuando con PowerFactory para hallar los parámetros adecuados del AVR que reflejen el comportamiento del regulador de voltaje real instalado en la central hidroeléctrica El Ambi.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizada la optimización en Python con el algoritmo MVMO y adquiridos los nuevos parámetros del regulador automático de voltaje en PowerFactory, en la figura 18 se procede a comparar nuevamente la señal simulada con la señal obtenida de las pruebas de campo.



**Figura 18** Señales optimizadas con MVMO.

Podemos notar también en la figura 19 que los parámetros del AVR son distintos a los parámetros de la figura 10, demostrando que el algoritmo de optimización realizado en Python trabaja a la par con el PowerFactory, mientras más iteraciones el error o diferencia entre las señales simuladas y las leídas disminuye. Esta sección de la investigación evidencia de manera concluyente la eficacia operativa del algoritmo "Mean-Variance Mapping Optimization".

Common Model - Grid\Frame\AVR.ElmDsl

Basic Data

Description

General Advanced 1 Advanced 2 Advanced 3

Name: AVR

Model Definition: ...Controlador\AVR Basler DECS-200

Configuration Script: →

☐ Out of Service ☐ A-stable integration algorithm

Parameter	
Kg	Constante de tiempo de filtro [-]
Kp	Ganancia proporcional [-]
Ta	Constante de tiempo del regulador de voltaje [s]
Te	Constante de tiempo del excitador [s]
Ki	Ganancia integral [-]
Kd	Ganancia derivativa [-]
Td	Constante de tiempo derivativo [s]
Ke	Ganancia del excitador [-]
E1	Factor de Saturación 1 [p.u.]
Se1	Factor de Saturación 2 [p.u.]
E2	Factor de Saturación 3 [p.u.]
Se2	Factor de Saturación 4 [p.u.]
Vrmin	Controlador Voltaje mínimo [p.u.]
y_min	
Vrmax	Controlador Voltaje máximo [p.u.]
y_max	

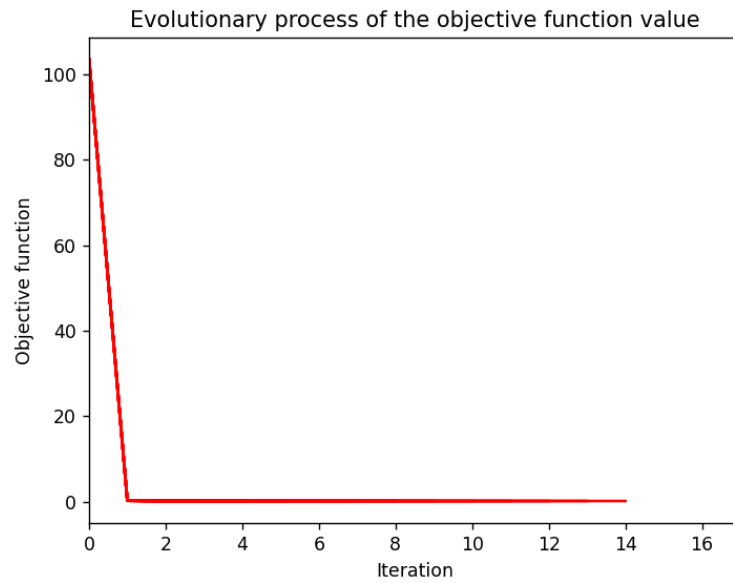
Export to Clipboard Set to default Show Graphic

OK Cancel Events Arrays/Matrices

**Figura 19** Parámetros del AVR optimizados por MVMO.

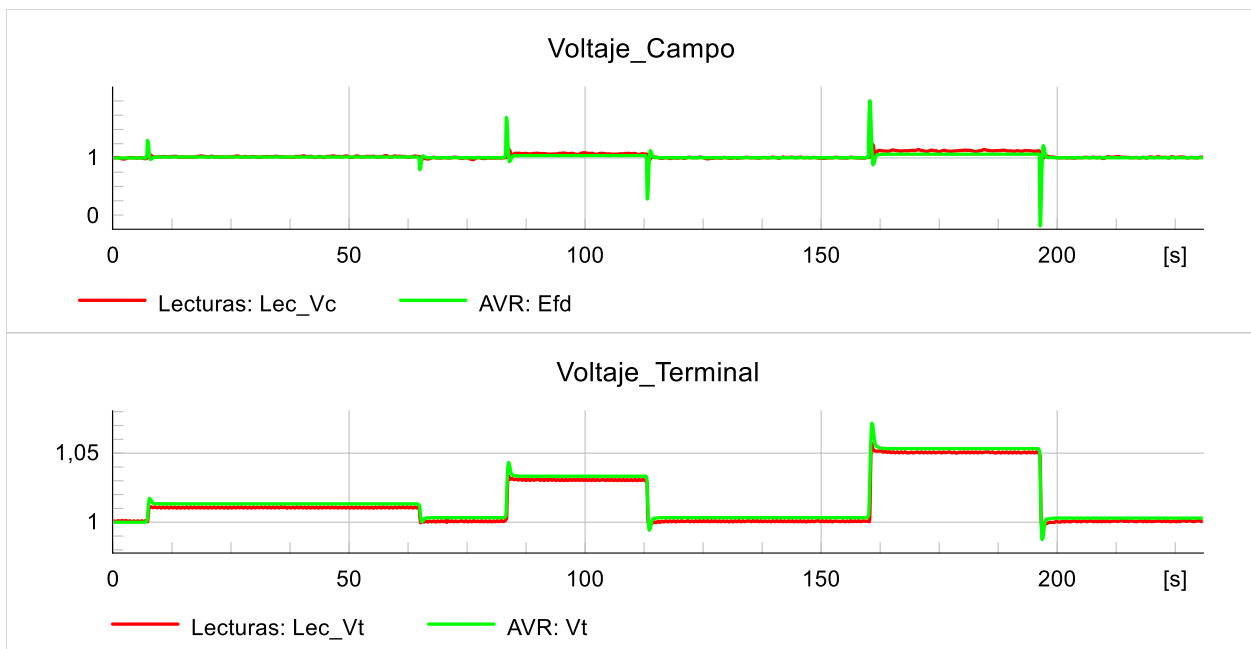
Para verificar aún más la eficacia del algoritmo en la reducción del error entre la señal real y la simulada, se llevó a cabo la misma simulación utilizando el método de optimización por enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés, Particle Swarm Optimization). Si resulta que los nuevos parámetros obtenidos del algoritmo PSO, reflejen el mismo comportamiento en la gráfica que los parámetros del MVMO, se asegura que el comportamiento del AVR real ubicado en la central hidroeléctrica está siendo correctamente simulado en el software. En la figura 20 se aprecia como el error entre señal real y simulada disminuye con cada iteración usando este método.





**Figura 20** Gráfica de convergencia por PSO.

Al terminar la simulación del algoritmo del PSO, para el cual se definió un total de 14 iteraciones, en la figura 21 se observa la nueva señal optimizada.



**Figura 21** Señales optimizadas con PSO.

Por consiguiente, en la figura 22 se observan los nuevos parámetros del AVR.

Common Model - Grid\Frame\AVR.ElmDsl

Basic Data

Description

General Advanced 1 Advanced 2 Advanced 3

Name AVR

Model Definition ▼ → ...\\Controlador\\AVR Basler DECS-200

Configuration Script →

☐ Out of Service ☐ A-stable integration algorithm

	Parameter	
Kg	Constante de tiempo de filtro [-]	0,5
Kp	Ganancia proporcional [-]	60,
Ta	Constante de tiempo del regulador de voltaje [s]	0,0375
Te	Constante de tiempo del excitador [s]	0,175
Ki	Ganancia integral [-]	75,
Kd	Ganancia derivativa [-]	4,
Td	Constante de tiempo derivativo [s]	0,05343874
Ke	Ganancia del excitador [-]	1,
E1	Factor de Saturación 1 [p.u.]	7,8
Se1	Factor de Saturación 2 [p.u.]	0,2
E2	Factor de Saturación 3 [p.u.]	2,6
Se2	Factor de Saturación 4 [p.u.]	0,25
Vrmin	Controlador Voltaje mínimo [p.u.]	-2,5
y_min		-2,5
Vrmax	Controlador Voltaje máximo [p.u.]	2,5
y_max		2,5

Export to Clipboard Set to default Show Graphic

OK Cancel Events Arrays/Matrices

**Figura 22** Parámetros del AVR optimizados por PSO.

Ahora si se comparan las figuras 18 (Señal optimizada con MVMO) y 21 (Señal optimizada con PSO) se observa que son muy similares, casi idénticas, sin embargo, se sabe que son ligeramente distintas por sus parámetros del AVR después de la optimización, como se aprecia en la tabla 2 al comparar las figuras 19 (Parámetros del AVR optimizados por MVMO) y 22 (Parámetros del AVR optimizados por PSO).

**Tabla 2** Comparativa de valores numéricos de los parámetros del AVR.

Parámetro	MVMO	PSO	Real
Kg - Constante de tiempo de filtro	0.5	0.5	1
Kp - Ganancia proporcional	60	60	30
Ta - Constante de tiempo del regulador de voltaje	0.0638	0.0375	0.075
Te - Constante de tiempo del excitador	0.175	0.175	0.35
Ki - Ganancia integral	28.23	75	150
Kd - Ganancia derivativa	1.9146	4	2
Td - Constante de tiempo derivativo	0.0681	0.0534	0.08
Ke - Ganancia del excitador	1	1	0.5
E1 - Factor de saturación 1	3.3222	7.8	3.9
Se1 - Factor de saturación 2	0.0738	0.2	0.1
E2 - Factor de saturación 3	4.4297	2.6	5.2
Se2 - Factor de saturación 4	0.25	0.25	0.5
Vrmin - Controlador de voltaje mínimo	-4.2593	-2.5	-5
Y_min - Límite mínimo del Ki	-4.2593	-2.5	-5
Vrmax - Controlador de voltaje máximo	9.9717	2.5	5
Y_max - Límite máximo del Ki	4.2593	2.5	5

## 5. CONCLUSIONES

Después de llevar a cabo y analizar el presente proyecto técnico, se han alcanzado las siguientes conclusiones.

Aunque los valores numéricos de los parámetros del AVR después de aplicar los algoritmos MVMO y PSO no coinciden exactamente, se evidencia que ambos métodos son altamente eficaces en la reducción del error entre las señales reales y simuladas, la disparidad observada en los valores de los parámetros entre las optimizaciones MVMO y PSO puede atribuirse a las características inherentes de cada algoritmo de optimización y a la complejidad del sistema real. Aunque cada algoritmo tiene su propia peculiaridad, la similitud en los valores resultantes y en las gráficas demuestra la robustez y aplicabilidad de ambos en la modelación del regulador de voltaje. Esta variabilidad, respaldada por la consistencia en los resultados, resalta la capacidad de estos algoritmos genéricos para optimizar el comportamiento del AVR, brindando una visión integral y confiable de su desempeño.

El proceso de recopilación de información del generador sincrónico y regulador de voltaje ha sido fundamental para la modelación precisa de estos componentes en el lenguaje DSL del software PowerFactory. La meticulosa investigación y documentación permiten ahora una representación fiel de estos elementos en el entorno virtual, allanando el camino para análisis y simulaciones detalladas que contribuirán significativamente al entendimiento y optimización del sistema eléctrico en estudio.

El modelado exitoso del regulador de voltaje de la central El Ambi en PowerFactory ha allanado el camino para pruebas de desempeño esenciales. La aplicación de funciones escaladas ha proporcionado información valiosa sobre la respuesta dinámica del regulador, permitiendo ajustes y mejoras según sea necesario. Estas pruebas no solo validan el modelo, sino que también sientan las bases para la optimización del sistema de control, contribuyendo así a la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico.

Las pruebas de campo realizadas en el regulador de voltaje de la central El Ambi, junto con la generación de registros de medida tomadas de la PMU, han sido cruciales para obtener los parámetros esenciales del sistema de control. Los registros proporcionan una visión detallada del comportamiento del regulador en condiciones reales, permitiendo la identificación de posibles desviaciones entre la simulación y el funcionamiento práctico. Estos resultados no solo mejoran la precisión del modelo, sino que también informan sobre ajustes y mejoras necesarias para garantizar un rendimiento óptimo del sistema de control en situaciones de operación real.

## **6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda continuar con pruebas de campo regulares y la recopilación de registros de medida para lograr mantener actualizado y mejorar de forma continua el modelo del regulador de voltaje. Esto posibilitará el ajuste y optimización en el sistema de control en respuesta a cambios en condiciones operativas reales favoreciendo de manera significativa a la optimización del sistema eléctrico ecuatoriano.

Teniendo en cuenta la utilidad y los beneficios de los algoritmos MVMO y PSO en la optimización del regulador automático de voltaje se aconseja validar un regulador de velocidad. La aplicación conjunta de estas técnicas en el regulador de velocidad podría brindar y a la vez facilitar y proporcionar una solución más robusta y eficaz, contribuyendo así distintas mejoras en la estabilidad y el rendimiento del sistema.

Se aconseja explorar otros algoritmos genéticos o algoritmos basados en evolución diferencial para modelar un AVR. La diversificación de enfoques algorítmicos podría brindar una perspectiva más completa sobre las posibles soluciones óptimas y permitir la identificación de enfoques que se adapten y adecuen especialmente bien a las características de forma particular y específica del SEP.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Zhu, W. K. Lee, and P. W. T. Pong, “Non-Contact Voltage Monitoring of HVDC Transmission Lines Based on Electromagnetic Fields,” *IEEE Sens J*, vol. 19, no. 8, pp. 3121–3129, Apr. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2892498.
- [2] M. Fathi and H. Bevrani, *Optimization in Electrical Engineering*. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-05309-3.
- [3] M. Agustoni, P. Castello, and G. Frigo, “Phasor Measurement Unit with Digital Inputs: Synchronization and Interoperability Issues,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 71, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3175052.
- [4] J. X. Verdugo, “Automatic Voltage Regulator Model Validation Based on Mean-Variance Mapping Optimization and Field Tests”. *Revista Técnica "energía,"* no. 14, pp. 165–173, 2018.
- [5] C. Qin, Z. Nie, P. Banerjee, and A. K. Srivastava, “End-to-End Remote Field Testing of Phasor Measurement Units Using Phasor Measurement Unit Performance Analyzer Test Suite,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 6, pp. 7067–7076, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3019994.
- [6] *C37.242-2021 - IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control*. IEEE, 2021.
- [7] P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas, and A. Von Meier, “Line Impedance Estimation Based on Synchrophasor Measurements for Power Distribution Systems,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 68, no. 4, pp. 1002–1013, Apr. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2861058.
- [8] N. M. Manousakis and G. N. Korres, “Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 69, no. 6, pp. 3403–3411, Jun. 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2932208.
- [9] P. M. Anderson, S. Diego, and C. A. A. Fouad, “Power System Control and Stability Second Edition,” 2003.
- [10] T. Publisher, “POWER SYSTEM SOLUTIONS MADE IN GERMANY PowerFactory 2021 Technical Reference Synchronous Machine,” 2021. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de>
- [11] F. W. Rodrigues, Y. P. M. Rodriguez, and C. S. Araújo, “Simultaneous\_Tuning\_of\_AVR\_and\_PSS\_Using\_Particle\_Swarm\_Optimization\_with\_Two\_Stages,” *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, , vol. 18, no. 9, pp. 1623–1630, Sep. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9381805.
- [12] E. Kose, “Optimal Control of AVR System with Tree Seed Algorithm-Based PID Controller,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89457–89467, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993628.
- [13] M. Furat and G. G. Cucu, “Design, Implementation, and Optimization of Sliding Mode Controller for Automatic Voltage Regulator System,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55650–55674, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3177621.
- [14] GCZ INGENIEROS SAC, “DATA GENERADOR CH RUNATULLO II-III,” Oct. 2012.

- [15] Y. Y. Hong and M. J. Liu, "Optimized Interval Type-II Fuzzy Controller-Based STATCOM for Voltage Regulation in Power Systems with Photovoltaic Farm," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78731–78739, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885198.
- [16] Y. Zhang, A. M. Shotorbani, L. Wang, and W. Li, "Distributed voltage regulation and automatic power sharing in multi-Terminal hvdc grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3739–3752, Sep. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2986168.
- [17] N. Shouman, Y. G. Hegazy, and W. A. Omran, "Hybrid Mean Variance Mapping Optimization Algorithm for Solving Stochastic Based Dynamic Economic Dispatch Incorporating Wind Power Uncertainty," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 16–17, pp. 1786–1797, 2021, doi: 10.1080/15325008.2021.1908449.
- [18] D. Wang, J. L. Rueda Torres, E. Rakhshani, and M. van der Meijden, "MVMO-Based Identification of Key Input Variables and Design of Decision Trees for Transient Stability Assessment in Power Systems With High Penetration Levels of Wind Power," *Front Energy Res*, vol. 8, Mar. 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.00041.
- [19] T. Saenphon, S. Phimoltares, and C. Lursinsap, "Enhancing Mean-Variance Mapping Optimization Using Opposite Gradient Method and Interior Point Method for Real Parameter Optimization Problems," *Processes*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020465.
- [20] F. S. Rahman, Israjuddin, N. Hariyanto, and C. W. Liu, "Swarm-based mean-variance mapping optimization for optimal placement of energy storage with synthetic inertia control on a low inertia power grid," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 15, no. 17, pp. 2527–2537, Sep. 2021, doi: 10.1049/gtd2.12196.
- [21] DigSILENT I, "POWER SYSTEM SOLUTIONS," 2023.
- [22] F. Gonzalez-Longatt, J. Luis, and R. Torres, "Green Energy and Technology Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory," 2018.
- [23] DigSILENT I, "POWER SYSTEM PRODUCT SPECIFICATION," 2023.
- [24] DigSILENT I, "INTEGRATED POWER SYSTEM ANALYSIS SOFTWARE PowerFactory 2023," 2023.
- [25] M. A. Salam, *Fundamentals of electrical power systems analysis*. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-3212-2.
- [26] H. Zhou *et al.*, "Modeling and synchronization stability of low-voltage active distribution networks with large-scale distributed generations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70989–71002, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2881142.
- [27] Z. Li, Q. Guo, H. Sun, J. Wang, Y. Xu, and M. Fan, "A Distributed Transmission-Distribution-Coupled Static Voltage Stability Assessment Method Considering Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 2621–2632, May 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2762473.
- [28] T. Hathiyaaleniye, U. D. Annakkage, N. Pahalawaththa, and C. Karawita, "A Comparison of Inverter Control Modes for Maintaining Voltage Stability During System Contingencies," *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 9, pp. 55–65, 2022, doi: 10.1109/OAJPE.2022.3140658.
- [29] K. Alzaareer *et al.*, "Sensitivity Analysis for Voltage Stability Considering Voltage Dependent Characteristics of Loads and DGs," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156437–156450, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129135.