

# Trabajo Fin de Grado

## Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Hardware in the Loop del sistema de control y comunicaciones de un parque fotovoltaico

Autor: Francisco José Carballo Ortiz

Tutores: Francisco de Paula García López y Andrei Mihai Gross Muresan

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Hardware in the Loop del sistema de control y comunicaciones de un parque fotovoltaico**

Autor:

Francisco José Carballo Ortiz

Tutor:

Francisco de Paula García López

Profesor titular

Andrei Mihai Gross Muresan

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Grado: Hardware in the Loop del sistema de control y comunicaciones de un parque fotovoltaico

Autor: Francisco José Carballo Ortiz

Tutor: Francisco de Paula García López,  
y Andrei Mihai Gross Muresan

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



*A mis padres y mi hermana*

*A mis amigos*

*A mis profesores y compañeros*



# Agradecimientos

---

En estos 4 años de grado, quiero dar gracias por las distintas experiencias vividas que me han hecho crecer personalmente. Sin embargo, todos estos cambios hubieran sido más difíciles sin el apoyo de mis padres y de mi hermana, también de mis amigos y compañeros, con los cuales he celebrado cada pequeña victoria. En otras palabras, quiero agradecerles a ellos, las personas que siempre han estado ahí conmigo a pesar de no haber pedido su ayuda.

Claramente no me olvido de Paco, Manolo y Andrei, a los que quiero agradecer por haberme dado la gran oportunidad de realizar un proyecto innovador en el que no solo he aprendido sobre mi rama de conocimiento, sino que he afrontado los problemas que nunca se ven en clase como comunicar dispositivos y el gran problema de pasar números negativos con decimales. Además, también mencionar con la simpatía que se me ha tratado en el laboratorio tanto por ellos como por las personas que están allí. Por último, gracias por ofrecerme esta oportunidad en la que he descubierto mi gusto por la investigación.

*Francisco José Carballo Ortiz*

*Sevilla, 2024*



# Resumen

---

En el siguiente trabajo se desarrolla el entorno Hardware in the Loop (HIL) del control y las comunicaciones de un parque fotovoltaico, teniendo en cuenta los valores reales de impedancia de todas las líneas, valores asignados de los equipos de electrónica de potencia, transformadores, etc, dicho de otro modo, se han tenido en cuenta para la realización del modelo todos los parámetros eléctricos de los elementos de potencia.

Para realizar el trabajo se ha utilizado la plataforma de control en tiempo real Opal-RT 5600 en la cual, mediante el software Matlab/Simulink se ha emulado la planta fotovoltaica para ser ejecutada en tiempo real, además esta plataforma se comunica con un ordenador externo mediante el protocolo de comunicación Modbus, con el fin de recibir y enviar los datos necesarios para un funcionamiento lo más realista posible, conformando el entorno HIL. Con los datos recibidos por Modbus se realiza un control droop de la tensión en el punto de conexión de la instalación (POI), enviando de vuelta hacia la plataforma la consigna de potencia reactiva necesaria en dicho punto cerrando el bucle del entorno HIL.

El trabajo nace a raíz de la necesidad de ciberseguridad de las plantas de energía renovable debido a que están conectadas a Internet y son susceptibles a ataques a través de la red, al mismo tiempo que se está produciendo una perpetración masiva de plantas de este tipo en el sistema eléctrico, sirviendo este trabajo como inicio de banco de pruebas para el análisis y ensayos de técnicas de ciberseguridad para plantas de energía renovable. Asegurando el correcto funcionamiento de los métodos desarrollados sobre ciberseguridad antes de la prueba real en la misma planta fotovoltaica.

Por otra parte, en este trabajo se halla la descripción de la configuración necesaria para conectar la plataforma Opal-RT con cualquier dispositivo por el protocolo Modbus, así mismo se presenta un maestro de la comunicación programado en Python para validar el idóneo funcionamiento de la comunicación.



# Abstract

---

In this work is developed the Hardware In the Loop (HIL) environment for the control and communications of a photovoltaic park, in the model is used the real values of impedance of all lines, assigned values of power electronic equipment, transformers, etc, in other word, all electrical power elements have been considered for the model.

In order to do the work, the real-time control platform Opal-RT 5600 have been used, in which the photovoltaic plant has been simulated using Matlab/Simulink software to be execute in real time. Additionally, this platform communicates with an external computer with Modbus communication protocol, to send and receive the necessary data for the most realistic operation possible, building the HIL environment. With the receive data, a droop control of the voltage at the Point Of Interconnection (POI) of the installation is performed, sending back the necessary reactive power setpoint to the platform, closing the HIL environment loop.

The work was born from the need for cybersecurity in renewable energy plants due to their connection to the Internet and susceptibility to network attacks, while there is a massive proliferation of such plants in the electrical system. The work serves as a starting point for a testbed for the analysis and testing of cybersecurity techniques for renewable energy plants, ensuring the correct functioning of the developed cybersecurity methods before real-world testing on the photovoltaic plant.

Besides, this document includes a description of the configuration needed to connect the Opal-RT platform with any device using the Modbus protocol, as well a communication master programmed un Python to validate the proper operation of the communication.



# Índice

---

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>                              | <b>ix</b>   |
| <b>Resumen</b>                                      | <b>xi</b>   |
| <b>Abstract</b>                                     | <b>xiii</b> |
| <b>Índice</b>                                       | <b>xv</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>                             | <b>xvii</b> |
| <b>Índice de Figuras</b>                            | <b>xix</b>  |
| <b>Notación</b>                                     | <b>xxi</b>  |
| <b>1 Introducción</b>                               | <b>23</b>   |
| 1.1 <i>Simulación de tiempo real-Simulación HIL</i> | 25          |
| 1.2 <i>Objetivos del trabajo</i>                    | 26          |
| <b>2 Descripción de la planta</b>                   | <b>29</b>   |
| 2.1 <i>Punto de conexión</i>                        | 29          |
| 2.2 <i>Líneas de media tensión</i>                  | 29          |
| 2.3 <i>Transformadores</i>                          | 30          |
| 2.4 <i>Líneas de alterna de baja tensión</i>        | 32          |
| 2.5 <i>Inversores</i>                               | 33          |
| 2.6 <i>Instalación fotovoltaica</i>                 | 34          |
| <b>3 Descripción del entorno de simulación</b>      | <b>35</b>   |
| 3.1 <i>Plataforma de simulación (Opal-RT)</i>       | 35          |
| 3.2 <i>Modelo Simulink de la planta</i>             | 37          |
| 3.3.1 <i>SC_User_Interface-Consola</i>              | 38          |
| 3.3.2 <i>SM_Computation</i>                         | 39          |
| 3.3 <i>Descripción de la comunicación Modbus</i>    | 44          |
| <b>4 Resultados de simulación</b>                   | <b>49</b>   |
| 4.1 <i>Resultados en el POI</i>                     | 49          |
| 4.2 <i>Resultados del CT2</i>                       | 53          |
| <b>5 Conclusiones</b>                               | <b>57</b>   |
| <b>Anexo I: Configuración Modbus</b>                | <b>59</b>   |
| <i>Bloques necesarios en Simulink</i>               | 59          |
| <i>Configuración del esclavo en RT-LAB</i>          | 59          |
| <i>Maestro de la comunicación-Código Python</i>     | 61          |
| <b>Referencias</b>                                  | <b>65</b>   |



# ÍNDICE DE TABLAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2-1. Características del POI                    | 29 |
| Tabla 2-2. Parámetros de las líneas de MT             | 30 |
| Tabla 2-3. Datos para los cálculos                    | 31 |
| Tabla 2-4. Parámetros de los transformadores en p.u.  | 32 |
| Tabla 2-5. Parámetros de las líneas de BT             | 32 |
| Tabla 2-6. Parámetros del inversor SUN 2000-330KTL-H1 | 33 |
| Tabla 2-7. Parámetros del módulo fotovoltaico         | 34 |
| Tabla 2-8. Parámetros cables de corriente continua    | 34 |
| Tabla 3-1. Modificaciones para la carga de ficheros   | 37 |
| Tabla 3-2. Rangos de los INT16 en UINT16              | 46 |



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1. Emisiones contaminantes en España por la generación eléctrica | 23 |
| Figura 1-2. Evolución de la potencia instalada en España                  | 24 |
| Figura 1-3. Crecimiento en general de las energías renovables en España   | 24 |
| Figura 1-4. Diagrama de flujo con los objetivos                           | 27 |
| Figura 2-1. Cable de MT   | 30 |
| Figura 2-2. Esquema unifilar de la instalación de MT                      | 30 |
| Figura 2-3. Transformador de la planta                                    | 31 |
| Figura 2-4. Modelo en T de los transformadores                            | 31 |
| Figura 2-5. Inversor de la instalación                                    | 33 |
| Figura 3-1. Ordenador en tiempo real Opal-RT 5600                         | 35 |
| Figura 3-2. Pantalla del modelo en RT-LAB                                 | 36 |
| Figura 3-3. Pantalla de ficheros en RT-LAB                                | 37 |
| Figura 3-4. Primer nivel del modelo                                       | 38 |
| Figura 3-5. Consola durante la simulación                                 | 38 |
| Figura 3-6. Modelo de los inversores y placas fotovoltaicas               | 39 |
| Figura 3-7. Esquema desde un inversor al cuadro de baja                   | 40 |
| Figura 3-8. Modelo de la instalación lado de baja tensión del CT1         | 40 |
| Figura 3-9. Modelo de MT de la planta fotovoltaica                        | 41 |
| Figura 3-10. Subsistema de tratamiento de medida                          | 42 |
| Figura 3-11. Visualización del selector de medidas                        | 42 |
| Figura 3-12. Bloque encargado de la escritura                             | 43 |
| Figura 3-13. Perfil de generación   | 44 |
| Figura 3-14. Ejemplo de red de Modbus                                     | 45 |
| Figura 3-15. Consigna de reactiva que se recibe por Modbus                | 47 |
| Figura 4-1. Tensión en el POI   | 50 |
| Figura 4-2. Intensidad inyectada en el POI                                | 51 |
| Figura 4-3. Potencia activa inyectada en el POI                           | 51 |
| Figura 4-4. Potencia reactiva inyectada en el POI                         | 52 |
| Figura 4-5. Factor de potencia en el POI                                  | 52 |
| Figura 4-6. Tensiones en el CT2   | 53 |
| Figura 4-7. Intensidades inyectadas por los inversores                    | 54 |
| Figura 4-8. Potencia inyectada por las placas fotovoltaicas               | 54 |
| Figura 4-9. Potencias reactivas inyectadas por los inversores             | 55 |
| Figura 5-1. Menú para buscar el esclavo                                   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5-2. Pantalla de configuración del esclavo                       | 60 |
| Figura 5-3. Pantalla de configuración de las direcciones                | 60 |
| Figura 5-4. Etiquetas del modelo en RT-LAB                              | 61 |
| Figura 5-5. Pantalla de Configuration (Default)                         | 61 |
| Figura 5-6. Librerías importadas  | 62 |
| Figura 5-7. Función principal   | 62 |
| Figura 5-8. Código encargado de la lectura                              | 62 |
| Figura 5-9. Función de conversión de UINT a INT                         | 62 |
| Figura 5-10. Control de tensión en Python                               | 63 |
| Figura 5-11. Cambios para la escritura de consigna de potencia reactiva | 63 |
| Figura 5-12. Escritura en las direcciones                               | 63 |
| Figura 5-13. Incremento de la señal                                     | 64 |

# Notación

---

|      |                          |
|------|--------------------------|
| HIL  | Hardware in the loop     |
| CT   | Centro de transformación |
| CS   | Centro de seccionamiento |
| POI  | Punto de conexión        |
| p.u. | Por unidad               |
| BT   | Baja tensión             |
| MT   | Media tensión            |
| SM   | Subsystem Master         |
| SC   | Subsystem Console        |



# 1 INTRODUCCIÓN

*La ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real.*

- Max Planck -

Ante los efectos adversos de la contaminación que se efectúan en nuestra actividad cotidiana, se plantean y realizan diversos cambios para contrarrestar las futuras consecuencias o reducirlas lo máximo posible. Siendo el sector eléctrico uno de los sectores que más cambios va a afrontar, debido a la descarbonización que se propone en él, al mismo tiempo que se electrifican consumos de energía, tal como en el sector del transporte serían los vehículos eléctricos.

Por su parte, el sector eléctrico se puede catalogar de conservador por motivos más que evidentes, tan solo en España hay más de 29 millones de consumidores que tienen por costumbre querer un servicio de alta calidad y sin interrupciones que debe garantizar el sistema, por lo que antes de introducir nuevos elementos al sistema se debe asegurar su correcto funcionamiento con mucha certeza evitando fallos y averías que perjudiquen a los usuarios.

Con el propósito de descarbonizar el sistema, desde el punto de la generación eléctrica existen otras fuentes de energía no contaminantes, las energías renovables, si bien es cierto que dentro de todas las renovables, la hidráulica en vista al modo que vierte la energía a la red es del mismo modo que las energías térmicas, lo que no implica ninguna novedad significativa, no pasa lo mismo con sus otras compañeras renovables, a causa de que necesitan un convertidor electrónico. Estos convertidores de electrónica de potencia introducen varios problemas en la red, como los armónicos, no aportan corriente de cortocircuito ya que no la soportan los semiconductores que los componen, o la falta de inercia de forma inherente ante aumentos de consumo o pérdida de generación. Lo que supone un nuevo reto para la operación del sistema eléctrico.

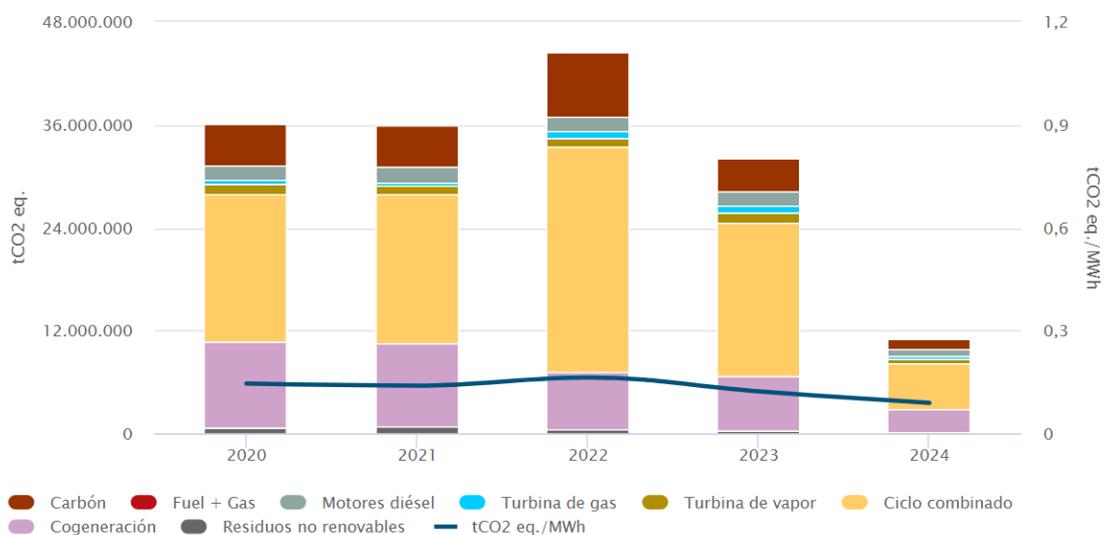


Figura 1-1. Emisiones contaminantes en España por la generación eléctrica

Con el fin de tener un sistema “limpio” estos últimos años se ha producido una transición energética de energía contaminantes a energías limpias a nivel global, observando en la Figura 1-1, en el año 2023 se consigue reducir la cantidad de emisiones un 11% respecto a los años anteriores y sobre 2024 del que solo se llevan 5 meses de año, se ve como estas emisiones no suponen ni la mitad del año anterior, a causa de una implementación masiva de plantas de energía renovable en el sistema eléctrico, como se presenta en la Figura 1-2 en el caso de la energía solar fotovoltaica se ha duplicado su potencia instalada y un ligero crecimiento de la energía eólica en estos últimos cuatro años. Causando la reducción de emisiones a la atmósfera ya que se reduce el uso de centrales térmicas contaminantes para producir la energía eléctrica.

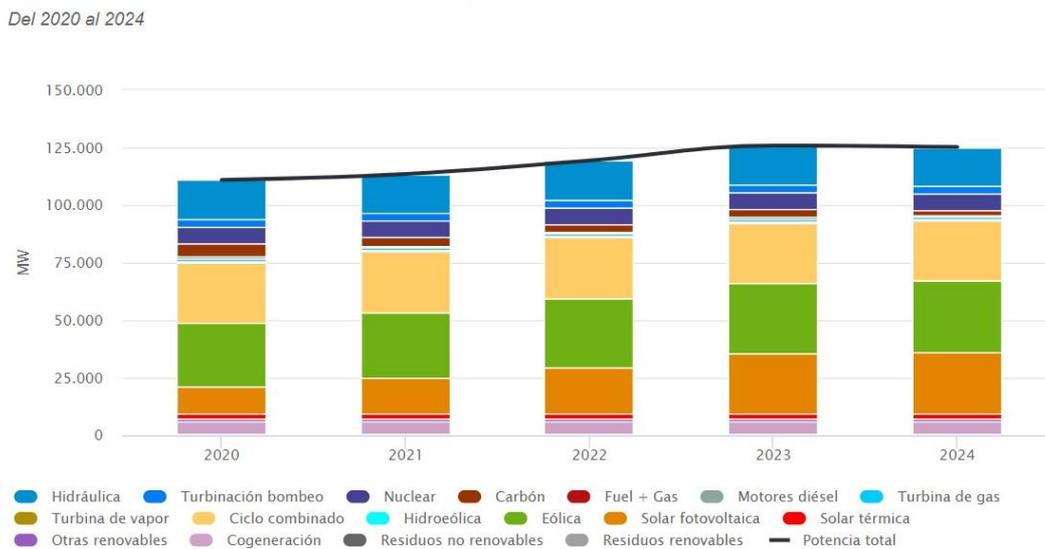


Figura 1-2. Evolución de la potencia instalada en España

Para reafirmar el crecimiento de las renovables en la Figura 1-3 se muestra la tendencia creciente de las energías renovables en general, siendo un crecimiento de casi 20 MW más que en 2020, a pesar de ver un frenado en el crecimiento entre 2023 y 2024 pudiendo deberse a que todavía no ha pasado suficiente tiempo del año para poder tener una tendencia similar, o que no se puede instalar más centrales de energía renovable en la red actual, necesitando reforzar la red si se desea continuar haciendo la generación más “limpia”. De forma opuesta las energías no renovables en estos 4 años han ido reduciendo su potencia instalada. En resumen, se ha producido un crecimiento masivo de la energía renovable y un ligero decrecimiento de la energía no renovable.

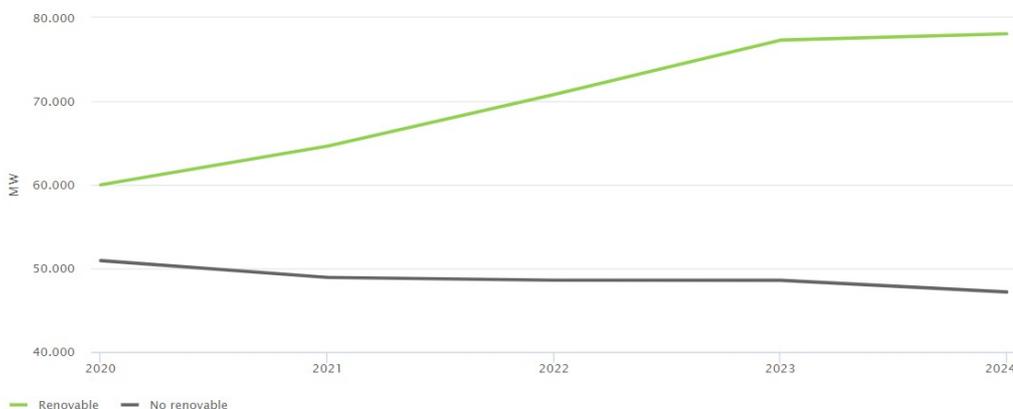


Figura 1-3. Crecimiento en general de las energías renovables en España

No obstante, para garantizar la continuidad y estabilidad del sistema hay que endurecer los códigos de red necesarios de dichas plantas renovables, con el objeto de reducir los problemas que aportan al sistema dado que estas instalaciones utilizan dichos convertidores.

Estos requisitos tan estrictos dificultan la puesta en marcha de las instalaciones, debido a los límites a los que se llevan para su validación, pudiendo dañar o finalmente dejar inservible los elementos que componen la planta, en el caso de que no aguantaran esos ensayos porque no se pensaron que los cumplieran dado que fuera una central ya construida y tenga que cumplir un requisito nuevo. Otro caso sería tener un método para poder probar nuevas técnicas de control o similares en las plantas sin dañar algún dispositivo, pero implementándolas en los PLC's existentes.

Con estos dilemas presentes, una simulación Hardware In the Loop (HIL) permite poder probar dichos ensayos previamente y comprobar la respuesta que podrían tener de cada elemento de la planta, así como probar nuevos algoritmos de control o cualquier innovación sin dañar ningún elemento de potencia, pudiendo asegurar un funcionamiento correcto antes de probarlo en la realidad.

## 1.1 Simulación de tiempo real-Simulación HIL

En primer lugar, una simulación en tiempo real es aquella en la que el modelo del sistema se ejecuta “al mismo ritmo” que el sistema real, es decir, se crean gemelos virtuales de sistemas reales con una gran exactitud de los elementos que los componen. Por esta razón se necesita plataformas de simulación con gran capacidad computacional dado a que se modela un sistema físico de manera muy cercana a la realidad para obtener unos resultados similares a los que da el sistema real.

Por ejemplo, las simulaciones en tiempo real son utilizadas por los ingenieros para el desarrollo de prototipos de algoritmos de control o procesamiento de señales digitales, además estas simulaciones adquieren mayor potencial gracias a las simulaciones HIL.

Por su parte, las simulaciones HIL son simulaciones en tiempo real en las que dispositivos externos se conectan a un entorno de simulación mandando señales durante la ejecución de la simulación para poder probar ambos conjuntos, unos ejemplos de estos dispositivos podrían ser sensores, controladores, sistemas electrónicos, etc. Este entorno de simulación es usado en la práctica en distintos sectores de la ingeniería, como en la aviación para simular y probar sistemas electrónicos antes de implementarlos en un avión real con el objeto de garantizar la seguridad de los vuelos.

Esto tipo de simulación no se podría ejecutar con una simulación offline pues esta se ejecuta con los parámetros que dispone al principio de la simulación no pudiendo modificar consignas durante su ejecución. Por este motivo se precisa de una simulación en tiempo real que permite realizar cambios en las consignas, que harán los dispositivos externos con las medidas que se obtiene de forma continua de la simulación.

Como consecuencia de poder utilizar dispositivos reales de los sistemas físicos con entorno simulados, este tipo de simulación tiene gran atractivo para poder probar condiciones anormales en estos dispositivos externos sin dañar otros elementos en el caso de que estas condiciones los afectaran de forma severa, de la misma forma que poder probar nuevos códigos de control de una planta fotovoltaica asegurando su correcto funcionamiento en el caso de conectar controladores.

A modo de resumen las grandes ventajas que proporciona un entorno HIL son:

- La utilización de dispositivos comerciales con un entorno simulado, pudiendo ver si en realidad funciona correctamente dicho dispositivo.
- Realizar ensayos o pruebas de condiciones anormales que pueden dañar la planta real.
- Reducción de costes en el desarrollo de productos puesto a que se puede evitar el daño de componentes al realizar ensayos, o incluso evitando compras de dispositivos o componentes en el caso de que su funcionamiento no fuera el deseado.

Con el fin de ejecutar la simulación en tiempo real del modelo de la planta, unos de los entornos de simulación en tiempo real es el que ofrece la compañía canadiense OPAL-RT Technologies, con su ordenador Opal-RT 5600. Con este dispositivo se modela nuestra planta al sumo detalle, debido a la gran capacidad de computación que dispone, y comunicarla con distintos protocolos de comunicación como lo sería Modbus a otros sistemas, pudiendo ser desde un ordenador a un PLC o el propio sistema de comunicaciones real de la planta.

El papel de dispositivos externos en este trabajo lo va a realizar un ordenador comunicado vía Modbus. Quedando configurada la comunicación para cualquier otro dispositivo, ya que para las comunicaciones la planta fotovoltaica es una caja negra de que la recibe medidas y manda consignas para alcanzar unas referencias, sin importarle los elementos que la componen. Entonces, se sustituye el interior de la caja negra por el ordenador Opal-RT con un modelo de la planta ejecutándose en tiempo real.

## 1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo principal del presente trabajo es realizar la simulación HIL de una planta fotovoltaica real, utilizando el ordenador de tiempo real Opal-RT 5600 para cargar el modelo de la planta y conectarlo por el protocolo de comunicación Modbus a un ordenador externo, con el fin de ser de utilizado como plataforma de pruebas para ciberseguridad.

Para completar el objetivo final se han ido planteado distintos objetivos para poco a poco ir corrigiendo los errores que aparecieran y tener distintos modelos donde hasta tales objetivos se asegure el correcto funcionamiento, dicho de otra forma, es como tener copias de seguridad.

El primer objetivo ha sido montar toda la planta fotovoltaica en Opal-RT, comprobando que se ejecuta en tiempo real, se guardan las medidas y el perfil de generación de potencia se lee de forma idónea, para posteriormente graficar las tensiones, intensidades y potencias que hay en cada inversor como en los distintos puntos donde se van a tomar medidas, viendo que tienen un sentido eléctricamente correcto, para poder así obtener la respuesta sin control del sistema y luego poder compararla con la respuesta bajo un control externo. En otras palabras, este objetivo es establecer una simulación en tiempo real que refleje fielmente el comportamiento de una planta fotovoltaica.

Como segundo objetivo, siendo el gran reto de este trabajo fin de grado (TFG) debido a la poca información disponible, es entender como conectar la plataforma de simulación Opal-RT con otros dispositivos vía Modbus. Así que se utilizó dos ejemplos de Simulink que ofrece Opal-RT para poder comprenderlo, en los que básicamente se mostraba que la comunicación era posible pero no como se lograba dicha comunicación.

A continuación, el siguiente paso es configurar la comunicación con el modelo de la planta en vez del ejemplo, empezando por leer medidas, y con ellas mediante un control de tensión en el POI mandar consignas de potencia reactiva, pero en primera instancia sin modificar consignas de la planta, con el propósito de ver la respuesta del control y que los datos se transmiten bien, culminando posteriormente con el cambio de consignas durante la simulación. Obteniendo como resultado de este paso la realización del objetivo principal, la simulación HIL de la planta.

En la Figura 1-4 se muestra en un diagrama de flujo como se han planteados dichos objetivos y como se han afrontado los problemas surgidos durante el montaje de la simulación HIL.

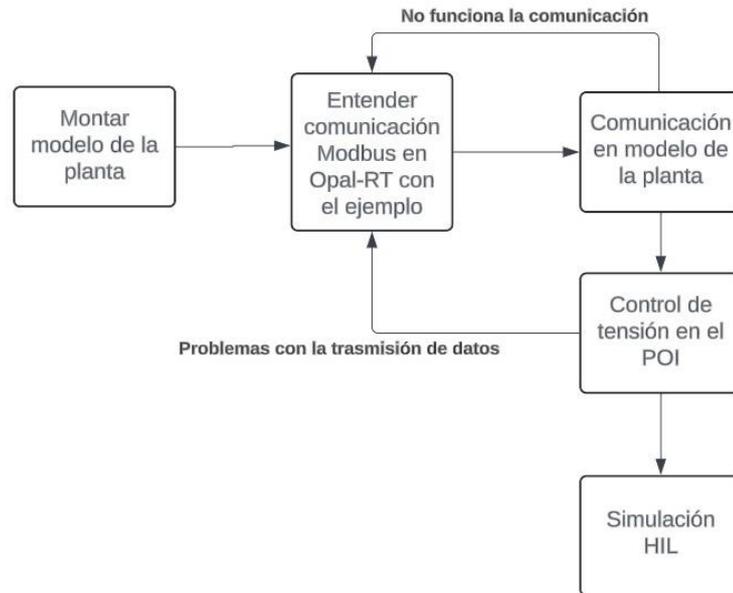


Figura 1-4. Diagrama de flujo con los objetivos

Durante la realización de este trabajo se me propuso documentar como es la configuración de Opal-RT para la comunicación vía Modbus a causa de la falta de información y lo poco intuitivo que resulta poder hacerlo. Toda esta documentación queda recogida en el Anexo I: Configuración Modbus.



## 2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

---

Antes que cualquier otra cosa, la preparación es la llave del éxito.

*Alexander Graham Bell*

En este apartado se procede a explicar cómo es físicamente la instalación de la planta de forma genérica. Antes de comenzar la descripción, en cuanto a características generales de la planta fotovoltaica, es una planta de 5.7 MW, dividida en dos centros de transformación (CT), contando el primero con 10 inversores y el segundo con 9 inversores. Esta planta se conecta a media tensión (MT) a unos 20 kV.

### 2.1. Punto de conexión

Uno de los puntos importantes cuando se desea instalar un parque fotovoltaico es conocer las características del punto de conexión (POI por sus siglas en inglés) al que se va a evacuar la energía generada por las placas fotovoltaicas del parque, siendo importante la localización del POI pues puede que este lejos del parque fotovoltaico y haya que instalar largas líneas de evacuación. El POI queda bien caracterizado en Simulink por los siguientes parámetros de la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Características del POI

| Datos del POI             |             |
|---------------------------|-------------|
| Tensión nominal           | 20 kV       |
| Frecuencia                | 50 Hz       |
| Potencia de cortocircuito | 156,486 MVA |
| Ratio X/R                 | 3,37        |

### 2.2. Líneas de media tensión

La planta cuenta con 2 cables de MT que son X-VOLT AL RHZ1 con aislamiento de XLPE del fabricante Top Cable, el cual es físicamente como se ve en la Figura 2-1, siendo el primero el que parte de CT1 al CT2 continuando con el segundo desde el CT2 hacia el centro de seccionamiento (CS) como se aprecia en la Figura 2-2. Para estos cables se disponen de datos sobre su resistencia, inductancia y capacidad por unidad de longitud como se presenta en la Tabla 2-2, en este caso la capacidad se añade debido a que en MT y la longitud que tienen, su efecto no se puede despreciar.



Figura 2-1. Cable de MT

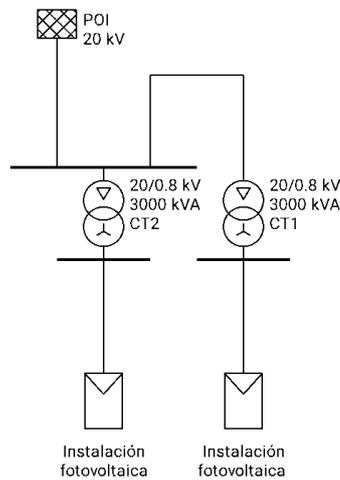


Figura 2-2. Esquema unifilar de la instalación de MT

Tabla 2-2. Parámetros de las líneas de MT

| Parámetros de las líneas                     |       |
|--|-------|
| Calibre conductor (mm <sup>2</sup> )         | 150   |
| Resistencia (Ω/km)                           | 0,206 |
| Reactancia Inductiva (Ω/km)                  | 0,115 |
| Capacidad C (pF/km)                          | 0,235 |
| Resistencia AC (secuencia cero) (Ω/km)       | 0,206 |
| Reactancia Inductiva (secuencia cero) (Ω/km) | 0,115 |
| Capacidad C (secuencia cero) (pF/km)         | 0,235 |
| MT CT2 - CS (km)                             | 0,153 |
| MT CT1 - CT2 (km)                            | 0,613 |

### 2.3. Transformadores

Cada CT posee un transformador Dy11 de 3 MVA, en los que el devanado secundario recibe las líneas de alterna provenientes de los inversores, y el devanado primario conecta con las líneas de MT, además posee las siguientes características: está inmerso en aceite cerrado herméticamente, sus conductores son de aluminio, está diseñado para estar en el exterior, aguanta 2s la intensidad de cortocircuito y físicamente es como se muestra en la Figura 2-3. En la Tabla 2-3 se enseña los datos de la ficha técnica de dichos transformadores con los que se puede calcular los parámetros de los transformadores.



Figura 2-3. Transformador de la planta

Tabla 2-3. Datos para los cálculos

| Datos de la placa de características |           |
|--------------------------------------|-----------|
| Potencia nominal                     | 3000 kVA  |
| Tensión nominal                      | 20/0,4 kV |
| Grupo de conexión                    | Dy11      |
| Tensión de cortocircuito             | 6%        |
| Potencia de cortocircuito            | 21,96 kW  |
| Pérdidas en vacío                    | 1,887 kW  |

Los parámetros que solicita el bloque de Simulink son los del modelo en T del transformador mostrado en la Figura 2-4.

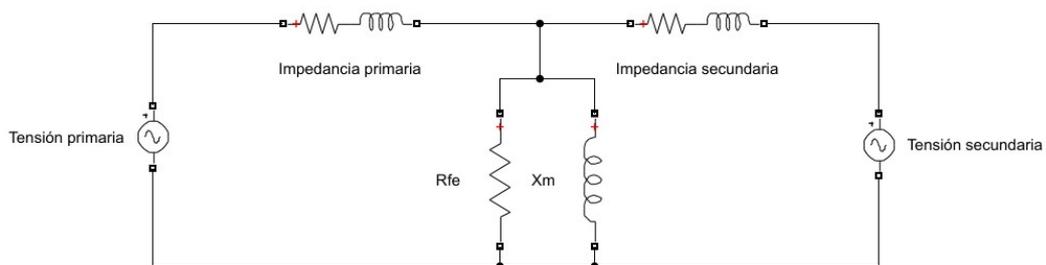


Figura 2-4. Modelo en T de los transformadores

Con los datos facilitados sobre sus ensayos en condiciones nominales, se pueden calcular dichos parámetros:

$$P_o = 1.887 \text{ kW} \approx \frac{3 \cdot U_{n1}^2}{R_{Fe}} \rightarrow R_{Fe} = 635930,0477 \Omega \quad (1)$$

$$I_{cc} = I_{n1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} = 86,6025 \text{ A} \quad (2)$$

$$P_{cc} = 21.96 \text{ kW} = 3 \cdot R_{cc} \cdot I_{cc}^2 \rightarrow R_{cc} = 0.976 \Omega \quad (3)$$

$$Z_{cc} = \varepsilon_{cc} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \rightarrow X_{cc} = 7.94 \Omega \quad (4)$$

Que se pasan a por unidad (p.u.) dividiendo por la impedancia base ( $Z_b$ ), por lo que se consigue los parámetros de la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Parámetros de los transformadores en p.u.

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| $Z_b (\Omega)$         | 133,34      |
| $R_{cc} (\text{p.u.})$ | 0,007319634 |
| $X_{cc} (\text{p.u.})$ | 0,059547023 |
| $R_{Fe} (\text{p.u.})$ | 4769,236896 |

Sin embargo, para Simulink se han hecho las siguientes suposiciones dado que sigue faltando parámetros:

- La impedancia de cada devanado es la impedancia de cortocircuito dividida por dos.
- $X_m = R_{Fe}$

## 2.4. Líneas de alterna de baja tensión

Estas líneas son las que conectan el cuadro de baja tensión (BT) de los CT con los respectivos inversores, son cables de aluminio y se encuentran enterrados en zanjas. En total hay 19 líneas con una sección de 300 mm<sup>2</sup> salvo el cable que sale del inversor 2 de CT2 que tiene una sección de 400 mm<sup>2</sup> disminuyendo su resistencia, esto se debe ya que es la línea más larga y seguramente tenga mayor sección para cumplir el criterio técnico de caída de tensión. En la Tabla 2-5 se reúnen todos los parámetros para introducir en Simulink.

Tabla 2-5. Parámetros de las líneas de BT

| Denominación | Longitud (m) | R( $\Omega$ /km) | X( $\Omega$ /km) |
|--------------|--------------|------------------|------------------|
| CT.01-INV.01 | 178,74       | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.02 | 75,96        | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.03 | 43,21        | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.04 | 14,71        | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.05 | 47,51        | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.06 | 205,4        | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.07 | 172,63       | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.08 | 144,18       | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.09 | 176,97       | 0,12             | 0,08             |
| CT.01-INV.10 | 199,44       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.01 | 189,05       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.02 | 269,87       | 0,09             | 0,08             |
| CT.02-INV.03 | 167,1        | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.04 | 168,74       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.05 | 146,64       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.06 | 124,77       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.07 | 149,89       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.08 | 172,17       | 0,12             | 0,08             |
| CT.02-INV.09 | 194,36       | 0,12             | 0,08             |

Se dispone de la reactancia de las líneas, aunque para Simulink se necesita la inductancia, que se obtiene

dividiendo por la frecuencia de la red.

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (5)$$

## 2.5. Inversores

Continuando con los inversores, estos son SUN 2000-330KTL-H1 de Huawei como se ve en la Figura 2-5, estos inversores tienen los parámetros mostrados en la Tabla 2-6.



Figura 2-5. Inversor de la instalación

Tabla 2-6. Parámetros del inversor SUN 2000-330KTL-H1

| Parámetros de entrada                    |                                |
|--|--------------------------------|
| Max. Tensión de entrada                  | 1500 V                         |
| Número de seguidores de MPP              | 6                              |
| Max. Corriente por MPPT                  | 65 A                           |
| Max. Corriente de cortocircuito por MPPT | 115 A                          |
| Rango de operación del MPPT              | 500 V ~ 1500 V                 |
| Tensión nominal de entrada               | 1080 V                         |
| Parámetros de salida                     |                                |
| Potencia activa nominal                  | 300 kW                         |
| Potencia aparente máxima                 | 330 kVA                        |
| Tensión de salida nominal                | 800 V                          |
| Corriente de salida nominal              | 216.6 A                        |
| Corriente máxima de salida               | 238.2 A                        |
| Rango de factor de potencia              | 0.8 capacitivo ~ 0.8 inductivo |
| THD                                      | <1%                            |

Es el elemento de la instalación que transforma la energía eléctrica de corriente continua a alterna, de forma que se posee control sobre la potencia que inyectan las placas fotovoltaicas. Conmutando los semiconductores que lo integran, se consigue una onda senoidal de 50 Hz con armónicos unos de los problemas de estas plantas,

así como que los semiconductores que lo componen no aguantan la corriente de cortocircuito, quemándose si pasará por ellos, por lo que directamente ante cortocircuitos no aportan dicha corriente, sino que aportan la corriente nominal, lo que en un futuro si esta tendencia siguiera dificultará la detección y despeje de los cortocircuitos.

## 2.6. Instalación fotovoltaica

Respecto a los paneles, son los encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica. Se han colocado 26 módulos en serie y por el tipo de inversor que dispone la planta, se conectan 4 string a cada MPPT, como cada inversor dispone de 6 MPPT, se tiene 24 strings por inversor, sin embargo, esto no sucede en todos los inversores, varios de ellos solo cuentan con 23 strings y un inversor tiene 20 strings. Los módulos por su parte presentan los parámetros que se acogen en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7. Parámetros del módulo fotovoltaico

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| Potencia máxima             | 590 W   |
| Tensión a circuito abierto  | 53,3 V  |
| Tensión máxima potencia     | 44,8 V  |
| Intensidad de cortocircuito | 13,93 A |
| Intensidad máxima potencia  | 13,17 A |
| Eficiencia del módulo       | 21,1%   |

En cuanto a los cables que conectan los paneles, dado que en continua las pérdidas solo se basan en las pérdidas Joule, para esta parte de la instalación se ha optó por conductores de cobre con el fin de reducir pérdidas. Estos cables conectan cada string de placas fotovoltaicas con el MPPT del inversor que pertenece dicho string. Cabe decir que la planta cuenta con cables de 4 y 6 mm<sup>2</sup> para este tramo de la instalación, para ver las características mostradas en la Tabla 2-8, se ha buscado unos cables equivalentes en catálogo del fabricante Prysmian.

Tabla 2-8. Parámetros cables de corriente continua

| Nº de conductores x sección (mm) | Diámetro máx del conductor (mm) | Diámetro exterior del cable (mm) | Peso (kg/km) | Resistencia conductor (20 °C) (W/km) | Intensidad admisible al aire (A) | Intensidad admisible al aire. T <sup>a</sup> 60 °C y T <sup>a</sup> conductor 120 °C | Intensidad admisible bajo tubo enterrado (A) | Caída de tensión (V/A km) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|--|---------------------------|
| <b>1x4</b>                       | 3                               | 6,6                              | 61           | 5,09                                 | 46                               | 55   | 42   | 10,18                     |
| <b>1x6</b>                       | 3,9                             | 7,4                              | 80           | 3,39                                 | 59                               | 70   | 53   | 6,78                      |

## 3 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

La ciencia más útil es aquella cuyo fruto es el más comunicable.

*Leonardo Da Vinci*

En este tercer capítulo del presente trabajo se continua describiendo los aspectos esenciales del entorno de simulación necesarios. Se encuentran reunidos en este capítulo los aspectos como la plataforma seleccionada para la ejecución del modelo, el modelo de la planta y el protocolo de comunicación Modbus, así como las señales que se traspasan en la comunicación.

### 3.1. Plataforma de simulación (Opal-RT)

Para simular la planta se va a utilizar el real time digital simulator OP5600 de Opal-RT el cual se presenta en la Figura 3-1, el cual es un ordenador con varias CPU's y FPGA's trabajando en paralelo para poder ejecutar una simulación en tiempo real. A este se le denomina Target y al ordenador que se conecta para montar el modelo se le llama Host.



Figura 3-1. Ordenador en tiempo real Opal-RT 5600

Opal-RT necesita al Host para que cree el modelo, lo compile en C y se lo cargue. Esta conexión se realiza por un cable Ethernet entre ambos mediante una comunicación TCP. También es necesario mantener este cable para la comunicación entre los dos grandes subsistemas del modelo durante la simulación, estos dos grandes subsistemas se verán en la siguiente sección.

A la hora de ejecutar la simulación se disponen de 4 modos de simulación:

- **Simulation:** Es una simulación offline en el Target, dicho de otra forma, es como hacer una simulación en Simulink, pero con la potencia computacional del Opal-RT.
- **Simulation with low priority:** Es igual que Simulation pero permite que los recursos de la CPU del Opal-RT sean utilizados por otras aplicaciones.
- **Software synchronized:** Es un modo para hacer una simulación en tiempo real, funcionando el Target con el tiempo establecido en el modelo y las comunicaciones funcionan al tiempo que se configuren.
- **Hardware synchronized:** Se vuelve a estar simulando en tiempo real, pero a diferencia del modo anterior, todo debe funcionar bajo el mismo reloj. Se debe añadir un bloque específico en el modelo y especificar donde está localizado el reloj externo.

Con el fin de enviar o recibir señales externas el ordenador cuenta con varios puertos de entrada o salida (depende de cómo los configures) tanto analógicos como digitales, como se aprecian en la parte superior de la Figura 3-1. A parte de estos puertos cuenta con dos tarjetas de red, una se utiliza para comunicarlo con el ordenador donde se construye el modelo, y quedando la segunda para comunicarlo vía Modbus, logrando así el entorno HIL.

Por otra parte, el entorno de simulación de Opal-RT es el que ofrece MathLab/Simulink, donde se programa por bloques los distintos elementos de la planta gracias a las librerías que dispone, particularmente para los elementos eléctricos se dispone de la librería *Simscape Electrical* y para los bloques necesarios para la ejecución en Opal-RT, existe su respectiva librería *Opal-RT*.

A pesar de utilizar Simulink, para crear o modificar el modelo, hay que abrirlo desde el programa de RT-LAB, no desde el programa de Matlab. A causa de que se tiene una carpeta dentro del programa que se le llama proyecto, donde dentro de él se encuentran varios modelos de Simulink y toda la configuración pertinente al proyecto completo, por ejemplo, la comunicación Modbus. En cada modelo se puede configurar su modo de ejecución o archivos para leer durante la simulación, que en este caso va a ser un perfil de generación.

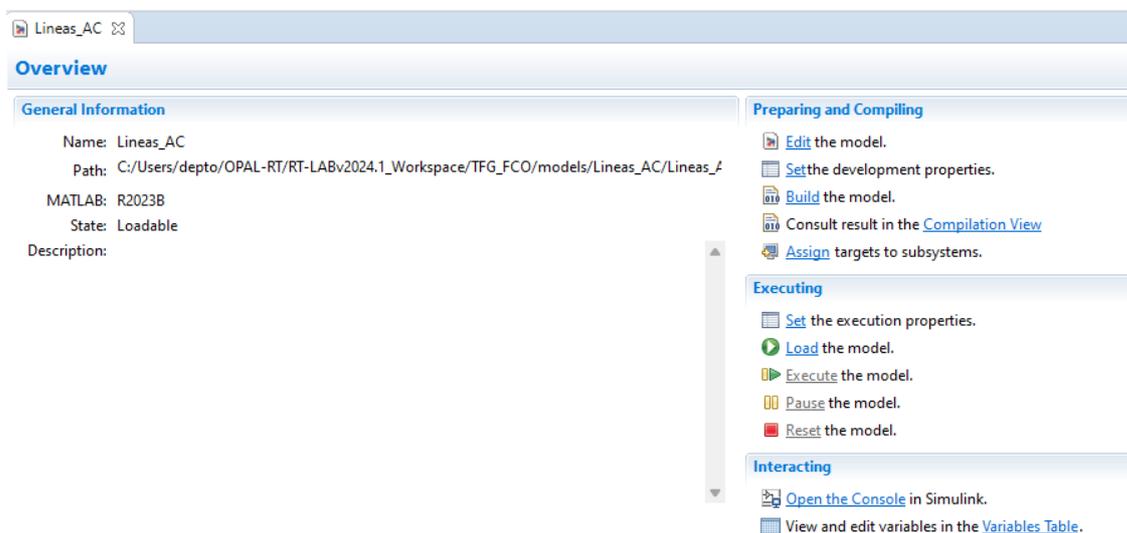


Figura 3-2. Pantalla del modelo en RT-LAB

La Figura 3-2 muestra la pantalla del modelo en el que, si se quiere editar el modelo se le da a *Edit the model*, después una vez terminado se compila en código C, dándole a *Build the model*, si hasta ahora no hubiera errores, solo faltaría darle a *Load* y *Execute* para que el sistema se ejecute de acuerdo con el modo que se le ha asignado. Unas buenas prácticas son darle a *Run* en Simulink para asegurar que no haya errores antes de ir a RT-LAB y esperar unos 5 segundos antes de darle a *Execute*.

Hecho todo esto, al darle a *Load* el programa abrirá otro archivo de Simulink que sería la Consola, donde se visualizan las magnitudes y poder mandar señales hacia el modelo.

A la hora de querer leer ficheros, como en este caso va a ser un perfil de generación, durante la simulación se debe introducirlos previamente en la pestaña *Files* del archivo del modelo, pestaña mostrada en la Figura 3-3.

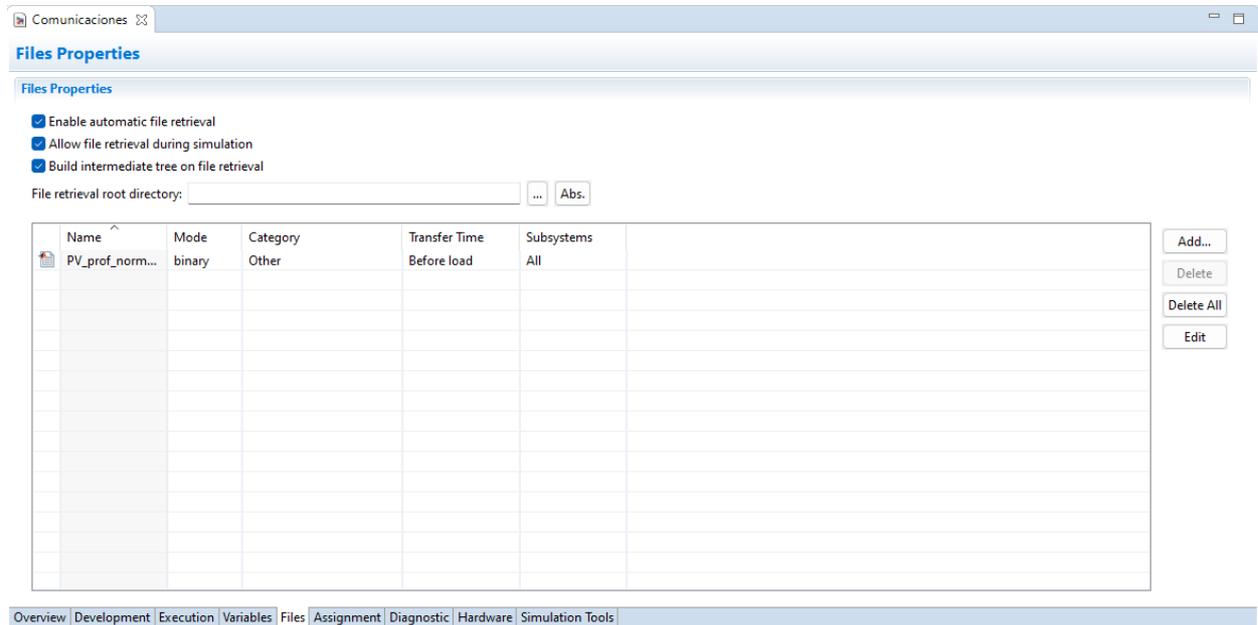


Figura 3-3. Pantalla de ficheros en RT-LAB

Estos deben seguir la siguiente configuración de la Tabla 3-1 que aparecerá cuando se añada algún fichero al darle a *Add*.

Tabla 3-1. Modificaciones para la carga de ficheros

| Apartados a modificar |             |
|-----------------------|-------------|
| Mode                  | Binary      |
| Category              | Other       |
| Transfer Time         | Before load |

### 3.2. Modelo Simulink de la planta

Se procede a continuación, explicar los distintos elementos que se encuentran en el modelo de Simulink, explicando también su relación con los elementos físicos de la planta.

La principal diferencia ante lo que sería un modelo común en Simulink, es la separación en dos subsistemas, como se visualiza en la Figura 3-4, SM\_Computation y SC\_User\_Interface. El comienzo de estos nombres no es aleatorio, sino que es la forma que tiene Opal de diferenciar la parte de cálculo (SM\_Computation) y la interfaz que se va a diseñar para la interacción con el modelo durante su ejecución (SC\_User\_Interface).

Concretamente, SM son las siglas de Master Subsystem y SC son las de Console Subsystem, pudiendo haber varias consolas, pero solo un maestro.

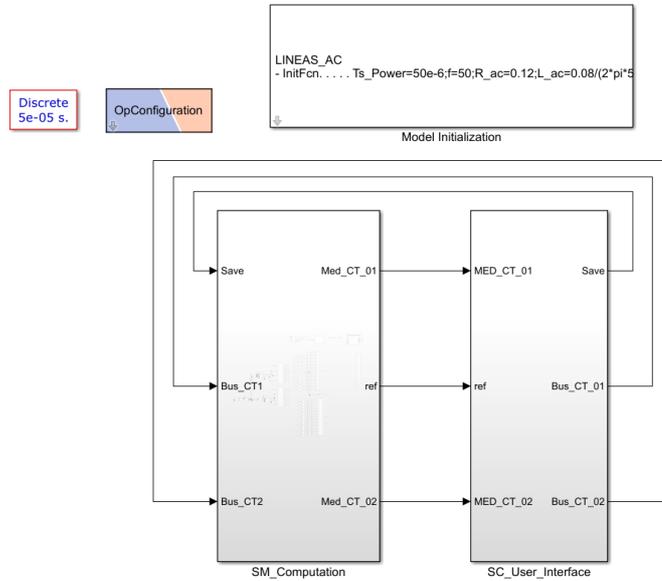


Figura 3-4. Primer nivel del modelo

Se ve en la Figura 3-4 como ambos subsistemas están interconectados mediante señales, esto es posible gracias al bloque *OpComm* que viene siendo el nexo entre Opal y el usuario durante la ejecución de la simulación. Estas señales serán las medidas que vienen del bloque de cálculo y las señales que se le mandan para cambiar que medidas se muestran en consola.

Además, en este primer nivel también está el bloque *Powergui* necesario para los elementos eléctricos, en modo discreto, donde su tiempo de ejecución al igual que los distintos parámetros necesarios en el modelo están definidos en el bloque de inicialización presente en este primer nivel. Respecto a otro bloque de Opal necesario, se encuentra el bloque *OpConfiguration* en el que se indica las características del Target.

### 3.1.1 SC\_User\_Interface-Consola

En primer lugar, este subsistema es el que se va a ver en el Host tal y como se muestra en la Figura 3-5, desde él se puede visualizar las medidas del sistema durante la simulación que van a venir del *SM\_Computation*, en los *displays* puestos para ello. De todas las medidas se puede seleccionar cual ver con las salidas *Bus\_CT*, mandándolas a un selector que hay en el tratamiento de medidas. Estas medidas se pasan a tensión de línea y a kW, kvar para poder interpretarlas mejor cuando la planta esté en funcionamiento.

Además, se puede visualizar el tiempo al que se está ejecutando la simulación pudiéndose ser distinto al que se ejecuta la consola poniendo un display, siendo el display llamado *RTimeSimulation*. Con la señal *Save* cuando esté a 1 se procederá al guardado de todas las medidas, y no se guarda cuando valga 0, por defecto siempre se deja a 1, pudiéndose configurar para que guardará datos ante un evento.

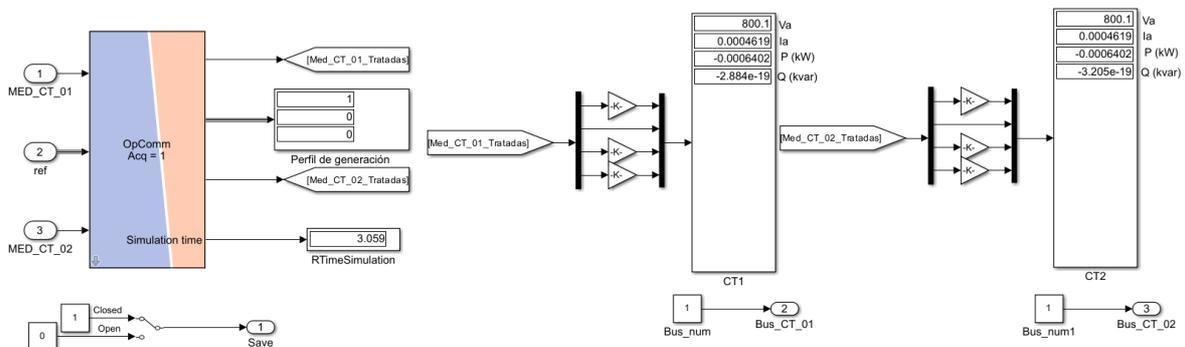


Figura 3-5. Consola durante la simulación

### 3.1.2 SM\_Computation

En segundo lugar, este subsistema es el que se va a cargar en la plataforma en tiempo real OP5600 y se va a ejecutar dentro de él. Hay que incluir todos los elementos que vayan a modelarse y precisen de cálculo. En el subsistema se encuentran las siguientes partes:

#### 3.1.2.1 Planta fotovoltaica

Para describir como se ha procedido a el desarrollo de la construcción del modelo, se separa por nivel de tensión comenzando por la baja tensión, explicando los elementos que reúne el CT1 dado que el segundo es exactamente igual salvo que posee un inversor menos.

##### 3.1.2.1.1 CT1, lado de baja tensión

Se da comienzo por los elementos que inyectan la potencia en la planta, las placas fotovoltaicas juntos con sus inversores. Estos se han modelado como una carga en la que se puede consumir o generar, indicándole por dos señales de entrada que dispone que debe hacer, como particularidad este bloque sigue el criterio carga, es decir si la señal de entrada es positiva consume y si es negativa procede a generar.

Los bloques utilizados son:

- *Three-Phase Dinamic Load*: Es una fuente de corriente controlable, se le indica a la tensión de línea que va a estar y la frecuencia del sistema, así como las condiciones iniciales de potencia activa y reactiva, también siendo lo más importante marcar que el control de PQ viene de señales externas al bloque. Este bloque tiene también como salida medidas de tensión y potencia tanto activa como reactiva, pero no se va a utilizar. En el primer paso del TFG que es probar el correcto funcionamiento del modelo, la potencia activa vendrá dada de un perfil de generación, mientras que la reactiva se mantendrá a cero.
- *Three-Phase Series RLC Branch*: Este bloque se añade porque es necesario para poder poner una fuente de corriente en serie con una de tensión. Para que su efecto sea mínimo se ha configurado que solo sea una resistencia con un valor enorme.

En la Figura 3-6 se muestra como es la conexión de los bloques presentados anteriormente.

Se ha decidido utilizar estos bloques en la emulación de las placas e inversores, debido a que no hay interés en como los inversores juntos con las placas inyectan esa potencia, a pesar de que se podría realizar dado la gran potencia de calculo que dispone OP5600, solo se necesita ver como varía esa potencia debido al ciberataque por las consignas que le llegan por las comunicaciones.

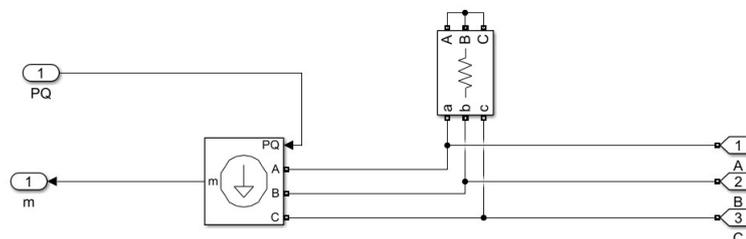


Figura 3-6. Modelo de los inversores y placas fotovoltaicas

Se continua con la descripción de la Figura 3-7 teniendo a la salida del subsistema de generación un subsistema en el que se mide tensión e intensidad a la salida de los inversores, con los medidores que dispone la librería de Simulink para ello. Continuando con las líneas hacia el cuadro de baja del CT.

Para la introducción de las líneas en el modelo, se ha puesto una resistencia (R) y una inductancia (L) en serie, la capacidad no se ha añadido, ya que su efecto en BT no es muy representativo. Así que se utiliza otra vez el bloque *Three-Phase Series RLC Branch*, en modo RL. Los valores de R y L se encuentran en el bloque de inicialización, pero su valor depende de la longitud del cable, por ello para cada línea se ha definido también

su longitud para ahora dentro del bloque de la línea multiplicar la R y L por la longitud correspondiente del cable.

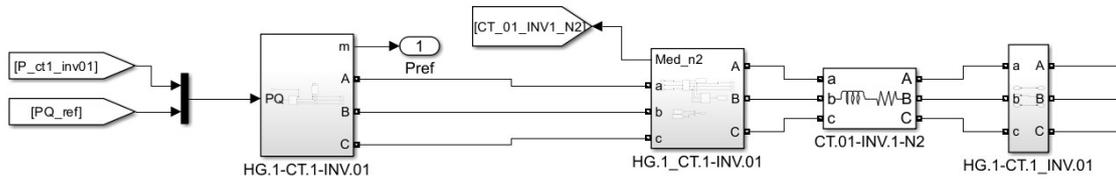


Figura 3-7. Esquema desde un inversor al cuadro de baja

A parte de lo ya comentado, se ve que cada bloque está nombrado como corresponde en el plano de la instalación real, como también las medidas de tensión e intensidad de las 3 fases se agrupan en una sola etiqueta con el nombre de la rama.

Por último, se ve en la Figura 3-7 que a la salida de la línea hay otro subsistema, este no contiene nada es una representación de un nudo inexistente antes de la conexión del cuadro de baja tensión. Este esquema es igual para los 9 inversores restantes, variando tanto en el nombre como en las longitudes de las líneas.

Entonces se llega al lado de BT donde también se toman medidas para conocer la inyección de los 10 inversores antes de pasar por el transformador. Quedando el CT1 como se muestra en la Figura 3-8.

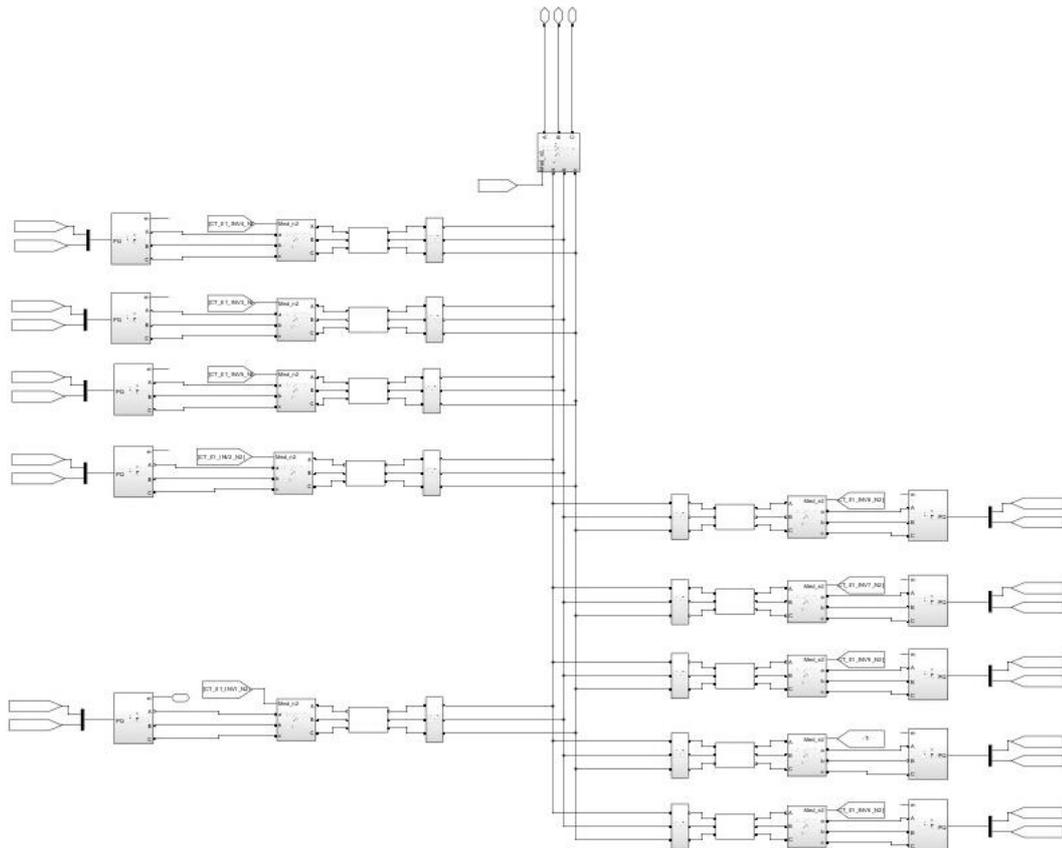


Figura 3-8. Modelo de la instalación lado de baja tensión del CT1

Como se observa los inversores están unos más cerca que otros a la salida hacia el transformador, se ha realizado así para saber que inversores están más lejos del cuadro y cuales más cerca para interpretar de manera más sencilla las caídas de tensiones.

### 3.1.2.1.2 Salida a MT

Visualizando la Figura 3-9 lo primero que se encuentra es el transformador elevador modelado con el bloque que dispone Simulink en el que se le introducen los parámetros de él calculado con los datos facilitados sobre la ficha técnica del transformador. Sin embargo, se ha puesto a tierra el lado secundario pues es necesario para que el bloque de medidas de tensión funcione. En adicción, se mide a la salida de él para poder conocer las pérdidas que aportan los transformadores, llamando estas medidas como *POI 1* y *POI 2* refiriéndose a la conexión a media tensión.

De este transformador sale una línea de media tensión hacia el CT2. Las líneas de media tensión se ha seguido un modelo en  $\pi$ , dado que en media tensión y con la longitud que ya tienen estos cables la capacidad de la línea no se puede despreciar.

Del CT2, sale otra línea de media tensión hacia el POI, donde se va a tomar también medidas y gracias a los datos aportados se puede caracterizar dicho punto. Para el POI se ha modelado como una fuente trifásica con una impedancia interna.

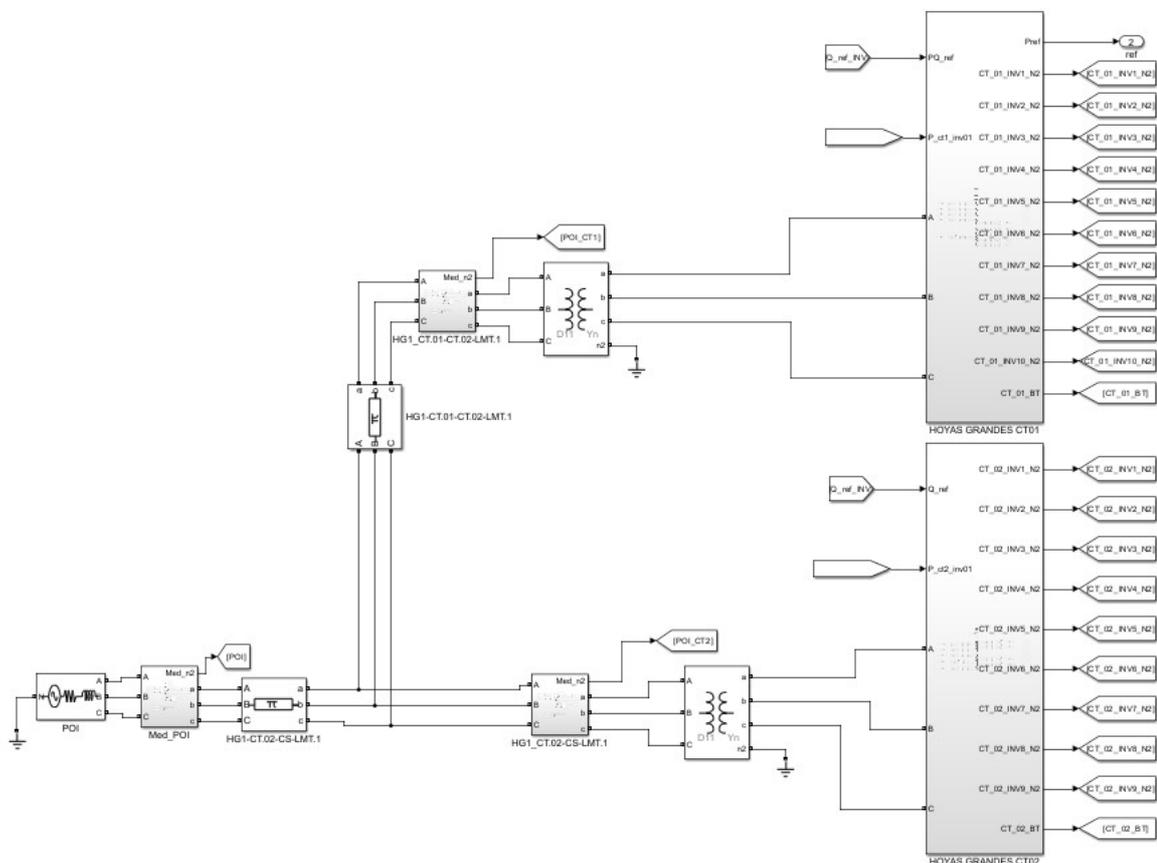


Figura 3-9. Modelo de MT de la planta fotovoltaica

### 3.1.2.2 Tratamiento de medidas

Como se ha visto en el punto anterior, durante toda la instalación se han tomados muchas medidas, pero Simulink mide la onda senoidal de tensión e intensidad, así que para ver durante la simulación o graficar las tensiones e intensidades se deben obtener los valores RMS de dichas ondas, es decir, tratar esas medidas, con miras a poder ver claramente dichas medidas, adicionalmente en las gráficas también se pasan a magnitudes de línea para poder interpretarlas mejor.

Estas medidas se han agrupado en etiquetas con nombres característicos para su identificación, se pasan por el subsistema de la Figura 3-10 donde se van a tratar y calcular la potencia activa y reactiva.

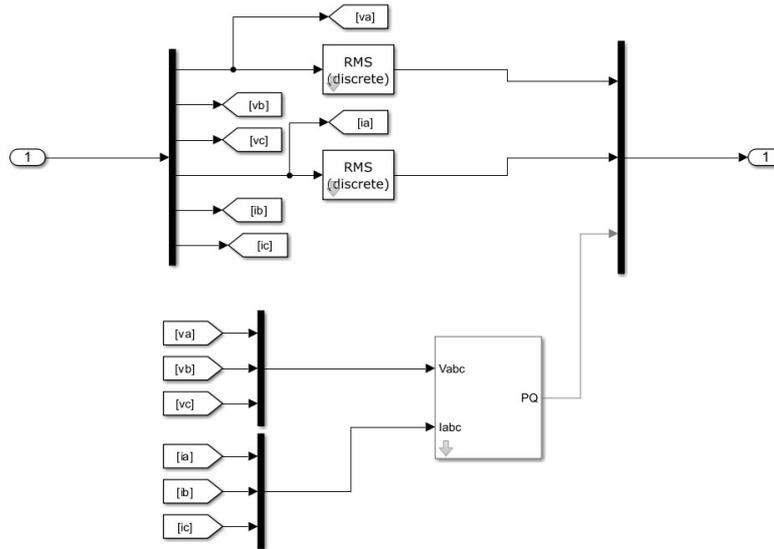


Figura 3-10. Subsistema de tratamiento de medida

Dentro de cada etiqueta hay 6 señales representando las 3 tensiones e intensidades de fase, pero al ser un sistema trifásico equilibrado, viendo solo una magnitud de fases se conoce cómo son las otras 2 fases, por lo tanto, solo se calcula el valor RMS de una fase, ahorrando coste computacional. En cuanto a las potencias existe un bloque que con los valores temporales calcula potencia activa y reactiva, el bloque es *3-phase Instantaneous Active & Reactive Power*. Por este subsistema de tratamiento, pasaran cada una de las etiquetas de medidas, guardándose después al archivo de guardado y enviándose al selector.

Las medidas en el tratamiento se han separado en dos bloques, las del CT1 y las CT2 más el POI, estos dos bloques pasan a un selector como se muestra en la Figura 3-11 para seleccionar desde la consola que medida se quiera ver, con la señal *Bus\_CT*. Siendo en el primer selector las medidas de los 10 inversores del CT1 más ambos lados de su transformador, quedando en el segundo selector las medidas de los 9 inversores del CT2 más ambos lados de su transformador y el POI, de forma que cada selector tiene 12 señales.

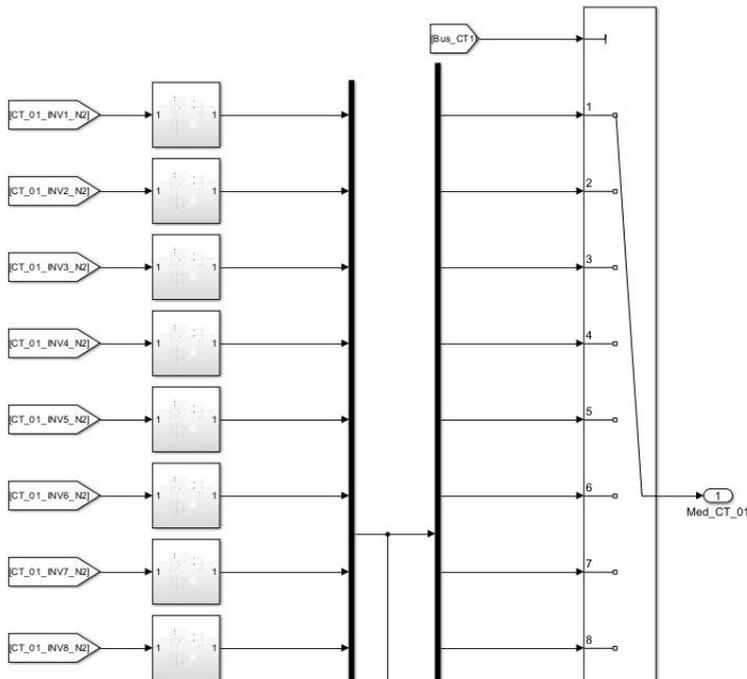


Figura 3-11. Visualización del selector de medidas

### 3.1.2.3 Guardado de señales

El guardado de señales se produce cuando desde consola se manda un 1, activando por un *Trigger* el grupo de adquisición del guardado, entonces las señales se guardan en un archivo con extensión *.mat* con el que se puede graficar después todas las medidas de la instalación.

El bloque que se encarga de escribir en el archivo es *OpWriteFile* expuesto en la Figura 3-12, cuya configuración permite poner el nombre del archivo, la variable que contiene todos los datos, el factor de decimación, el tamaño máximo de bytes por archivo, etc. Cabe destacar que este bloque guarda por paquetes, entonces podría darse el caso de no guardar nada porque no se llena el paquete.

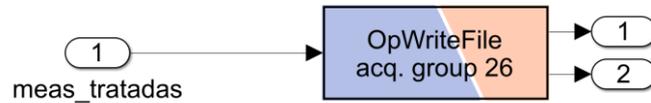


Figura 3-12. Bloque encargado de la escritura

### 3.1.2.4 Lectura de perfiles

Con Opal-RT también se tiene la función de lectura de perfiles con el uso del bloque *OpFromFile*, en este caso ha sido aprovechado para leer un perfil de generación de potencia activa con el fin de enviárselo a los inversores. Los ficheros de perfiles deben ser archivos de extensión *.mat* pero de una versión en concreto, la versión *-v4*.

El perfil de generación disponible de la Figura 3-13 es de un día completo comprimido en 450 s, dado que la simulación es en tiempo real, para ver un día completo, habría que esperar un día para ver los resultados. Además, este perfil se le cambia el signo a la hora de introducirlo en los inversores dado que el modelo de los inversores sigue el criterio carga, se multiplica por la potencia nominal de los inversores para pasárselo al bloque que modela dichos inversores. El perfil está en por unidad para poder utilizarlo en distintas plantas y así evitar tener que hacer conversiones entre unas plantas y otras.

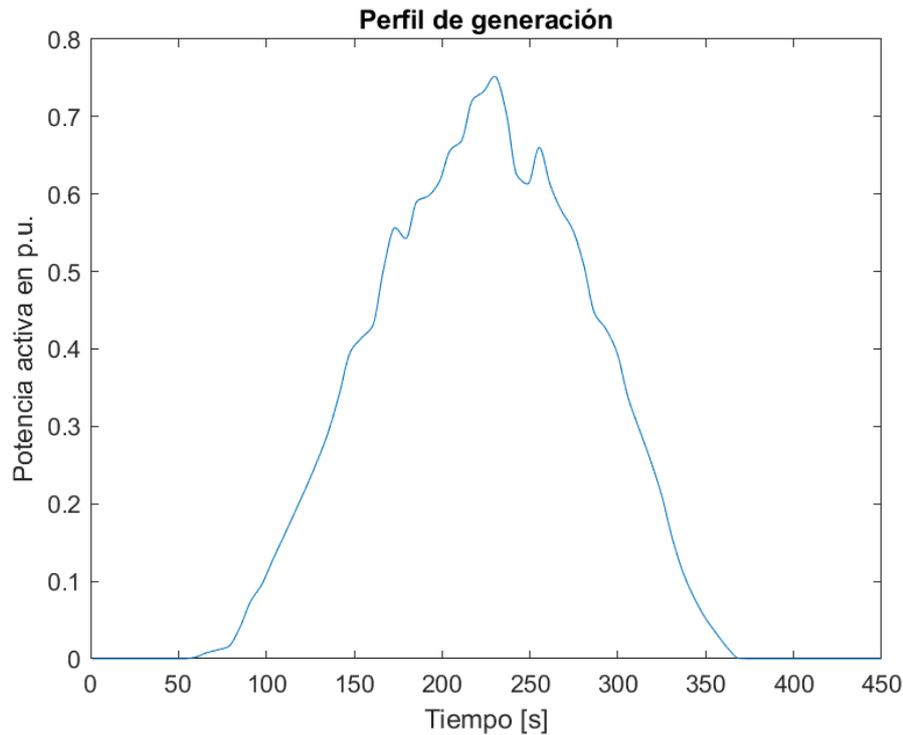


Figura 3-13. Perfil de generación

### 3.3. Descripción de la comunicación Modbus

Modbus es el protocolo de comunicación que se utiliza en este trabajo porque es el que comúnmente se encuentra entre los PLC's y los inversores. Es un protocolo creado en 1979 por Modicon (actual Schneider), el cual se basa en una estructura maestro/esclavo, el maestro controla la comunicación mandando acciones que los esclavos siguen, siendo en este caso, el maestro un código de Python en el Host y el esclavo Opal-RT, aunque son los mismos dispositivos la comunicación hace por otra tarjeta de red del Host, teniendo como resultado conectado el Opal-RT con el ordenador con dos cables Ethernet.

El uso de este protocolo es bastante común y utilizado en la industria, a causa de que es un protocolo sencillo de utilizar, por ejemplo, se utiliza para los sistemas de recolección de datos (SCADA). De hecho, se desarrolló con el fin de poder utilizarlo en la industria concretamente, para la comunicación con los PLC's de la época. Un ejemplo de esta comunicación es el que se representa en la Figura 3-14.

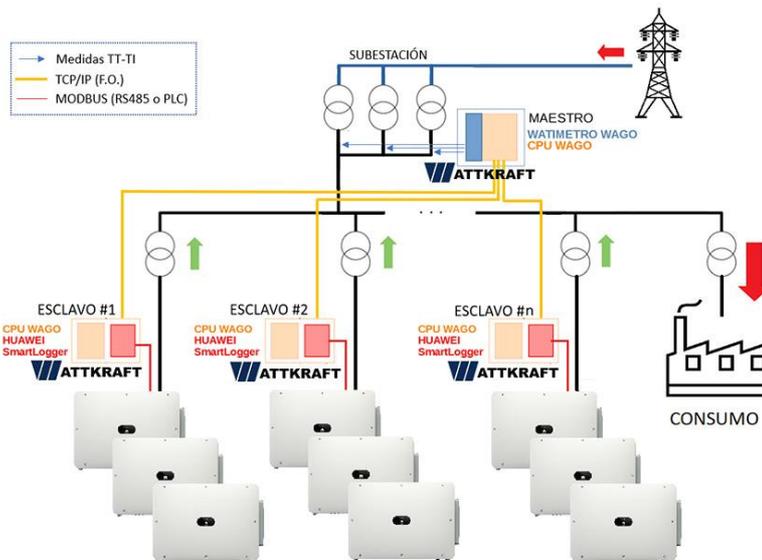


Figura 3-14. Ejemplo de red de Modbus

En la comunicación Modbus hay 4 tipos de registros de distintos tamaños de bytes:

- Coils: Registros que disponen de 1 bit.
- Holding Register: Registros que disponen de 16 bits.
- Input Register: Registros de 16 bits
- Discrete input: Registros de 1 bit.

A todos estos registros se les puede asignar cualquier dirección de memoria y tipo de dato (INT, UINT, FLOAT...) en RT-LAB, aunque en el caso de float hay que utilizar dos direcciones de memoria. También para este protocolo se debe configurar el orden de los bytes (Little endian o Big endian).

En cuanto a lectura o escritura, tanto los Coils como los Holding Register permiten escribir como leer, en cambio, los Inputs Registers y los Discrete Inputs solo permiten lectura. Para el modelo solo se va a utilizar Holding Registers porque es necesario 16 bits de tamaño y tener la libertad de decidir en cualquier momento si leer o escribir.

De esta manera se leen por la comunicación tensión, intensidad, potencia activa y reactiva en el POI, con el fin de controlar la tensión en el POI, mandando de vuelta una consigna de reactiva en dicho punto que se repartirá a partes iguales entre los 19 inversores de la planta.

La lectura de señales mediante Python se logra gracias a la función *read\_holding\_registers*, cuyas entradas son la dirección por donde debe empezar a leer y cuantas direcciones hacia abajo lee contando por la que empieza. Estas direcciones donde se van a leer magnitudes, en RT-LAB se han configurado para que solo puedan ser modificadas por el modelo evitando cualquier tipo de fallo del maestro cuando escriba.

Para las señales de lectura se han reservado las direcciones de la 0 a la 4 con tipo INT16. Con el orden de tensión, intensidad, potencia activa y potencia reactiva. Debido a la limitación de tamaño al ser enteros de 16 bits, las potencias se mandan en kilos, la intensidad y potencia reactiva para obtener al menos 2 decimales se comunican multiplicadas por 100, cambio que se deshace en el código, debido a que solo se ha logrado pasar números enteros y en la medida de la intensidad y reactiva resulta interesante pasar por comunicación los decimales.

Respecto a la escritura en Python se tiene la función *write\_registers*, a la cual se le tiene que pasar la dirección por la que va a empezar a escribir, esto es, si se le pasa un vector de dos elementos el primer elemento lo va a escribir en la dirección que se le indica por entrada, y el segundo elemento en la dirección siguiente. Estas direcciones son donde se van a escribir consignas, así mismo se han configurado para que solo puedan ser modificadas por el maestro, evitando que el esclavo pueda modificar sus valores.

Para las señales de escritura se han reservado las direcciones de la 5 a la 7, siendo utilizadas solamente la 5 y 6, pues se ha guardado una dirección para poder mandar potencia activa por si fuera necesario. Al igual que las magnitudes de lectura son de tipo INT16. Por la dirección 5 se manda la consigna de reactiva y por la 6 una señal para comprobar la actualización de la comunicación.

En ambas funciones a pesar de ser las direcciones de tipo INT16 cuyo rango es de -32768 a 32768, para transmitir datos se sigue el rango de los UINT16, es decir de 0 a 65536 ( $0$  a  $2^{16}$ ). En la Tabla 3-2 se muestra cómo se distribuyen los números positivos y negativos en el rango de los UINT, como se observa en dicha tabla para transmitir el número negativo hay que restarlo a  $2^{16}$ , esto es los números negativos se encuentran entre  $2^{15}+1$  y  $2^{16}$ , es decir, habría que hacer una conversión de UINT a INT en la lectura y de INT a UINT en la escritura.

Tabla 3-2. Rangos de los INT16 en UINT16

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Rango habitual de los positivos  | $0 \dots 32768 / 0 \dots 2^{15}$                     |
| Rango de los positivos en Modbus | $0 \dots 32768 / 0 \dots 2^{15}$                     |
| Rango habitual de los negativos  | $-32768 \dots 0 / -2^{15} \dots 0$                   |
| Rango de los negativos en Modbus | $-1 \dots -32767 / 2^{16}-1 \dots 2^{16}-(2^{15}-1)$ |

Por otra parte, el control de tensión es un control droop puesto que es común encontrar controladores proporcionales a la hora de controlar la tensión en los puntos de conexión. Este control se encuentra programado en Python con el fin de mantener la tensión en un nivel cercano al valor nominal del POI (20 kV). Para ello, el control manda la consigna de potencia reactiva en el POI con el fin de obtener dicha tensión, y sigue la siguiente ecuación:

$$Q_{ref} = K \cdot (V_{ref} - V_{POI,RMS}) \quad (6)$$

Para hacerlo más sencillo de computar, se trabaja en por unidad, entonces la lectura de tensión se divide por la tensión base que se toma como 20 kV. En cuanto a la constante K se ha definido como:

$$K = \frac{1}{R}; R = 0.04 \quad (7)$$

Este valor de R se obtenido experimentalmente viendo que es el límite antes de que se vuelva inestable el sistema.

El resultado es una potencia reactiva en por unidad que se desea tener en el POI, la cual para comunicarla aparece el problema de la transmisión de datos, problema que se volvió a aparecer al realizar la escritura pues se deseaba mandar números negativos, el asunto sobre los decimales ya fue tratado con la lectura. Como solución, esta potencia reactiva se multiplica por 10000 para pasar 4 decimales a números enteros, truncando los demás números, a continuación, se realiza la conversión y finalmente se introduce a la función de escritura.

Otro problema que presenta la escritura son los escalones de potencia reactiva que manda el control durante la simulación como se observa en la Figura 3-15 además del ruido que posee, provocando unos picos en las tensiones de los inversores, debido a que con el perfil empleado los cambios de potencia activa son muy acusados ya que en 450s se produce un día completo, provocando grandes diferencias cada vez que se establece la comunicación. La solución ha sido añadir en Simulink el bloque *Rate Limiter* que transforma dichos escalones en rampas más suaves, este bloque hay que ajustarlo pues se requiere seguir los escalones de forma rápida, en otras palabras, hay que ajustar la pendiente de las rampas de forma que se alcancen los escalones a tiempo sin que el sistema tenga fallos numéricos.

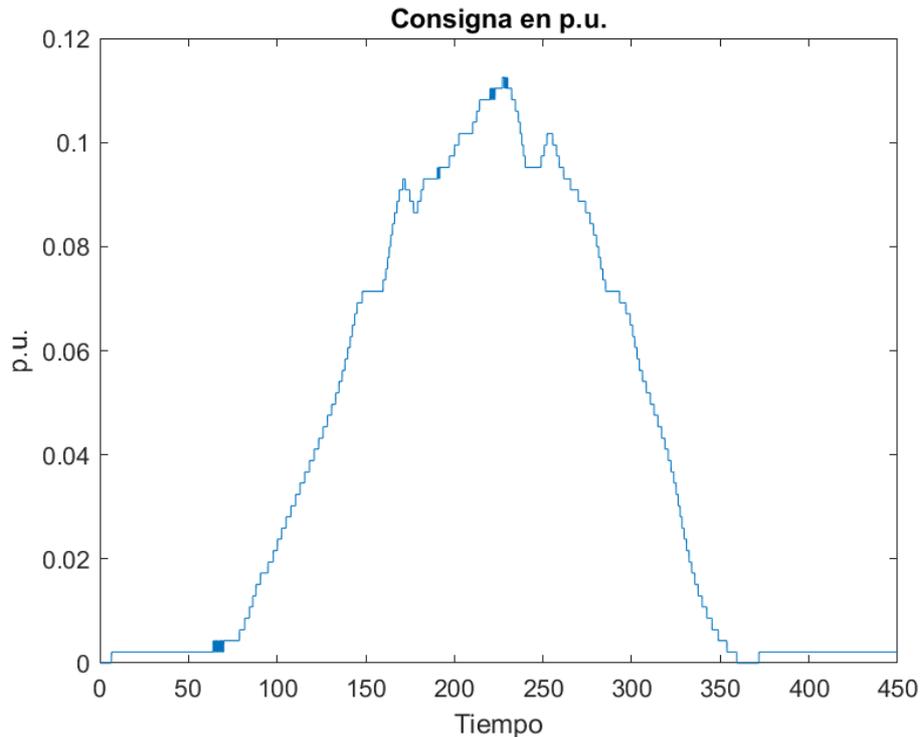


Figura 3-15. Consigna de reactiva que se recibe por Modbus

Todo el control se realiza en un código de Python que se incluye al final del TFG, gracias a la librería *pymodbus* que aparte de las funciones para Holding Registers, también incluye para Coils, Input Registers y Discrete Inputs, sus respectivas funciones siguen el mismo funcionamiento que las de los Holding Registers, por lo que su implementación no supondría un problema en caso de ser necesario en un futuro.

Para lograr todo lo expuesto anteriormente se han utilizados 2 ejemplos que ofrece Opal-RT. El primero de ellos, su modelo de Simulink era muy simple y no mostraba que era necesario para asignar que señales se leen desde fuera y que señales se escribe desde afuera, incluso no se aseguraba que la comunicación se realizaba por otro puerto distinto al necesario entre el Host y el Target, sin embargo este ejemplo traía consigo el código de Python con las diversas funciones para lectura y escritura de los 4 tipos de registros, el cual se modificó para ser utilizado en el segundo ejemplo, es decir se borraron todas las funciones que no fueran sobre Holding Registers. El modelo del segundo ejemplo si estaba un poco más claro, pues estaba todo mejor dividido en Simulink y resultó más intuitivo ver cómo era la estructura en Simulink para la comunicación, puesto que mostraba como se mandaban las señales para ser leídas o escritas. A pesar de lo bueno que resultaba el segundo modelo, no se explicaba toda la configuración que se precisa en RT-LAB, aun así, aparecía en su menú el apartado de esclavo en *I/O Interfaces*, entonces se descubrió que era necesario crear un esclavo, la configuración que tenía y crear los tipos de registros a utilizar, así como la personalización de ellos, pero no mostraba como se relacionaba las etiquetas del modelo de Simulink con las direcciones configuradas en RT-LAB. Tras esta duda, se consiguió averiguar cómo establecer la relación tras leer como configurar señales analógicas en RT-LAB e interpretando un poco, dejando ya como problemas que solo se podía comunicar números enteros.

En el Anexo I: Configuración Modbus se explica cómo se realiza la configuración de la plataforma Opal-RT, tanto en RT-LAB como en el Simulink, y como es el código de Python que funciona de maestro en la comunicación con objeto de validar la comunicación.



# 4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

---

*Con números se puede demostrar cualquier cosa.*

*Thomas Carlyle*

EL siguiente capítulo muestra los resultados obtenidos en el entorno HIL desarrollado para proporcionar un banco de trabajo adecuado para las pruebas de ciberseguridad en plantas fotovoltaicas. Para validar este modelo y que sea posible utilizarlo para su cometido final, se van a mostrar y comparar los resultados obtenidos con el control de la planta y sin control.

## 4.1. Resultados en el POI

En primera instancia, se muestra en la Figura 4-1 la magnitud que se desea controlar, la tensión del POI, para el control de esta medida se ha empleado un control droop o control proporcional con la constante mostrada en el capítulo anterior en la sección tercera. Este tipo de control implica un error en la señal a controlar, es decir, no se alcanza nunca la referencia de 20 kV. Sin embargo, se ve en la Figura 4-1 como se logra reducir la tensión en el POI, pasando de tener un 0,674 % de sobretensión en la operación natural de la planta con el perfil de generación implementado, a tener un 0,4505% de sobretensión con el controlador en funcionamiento. Estas sobretensiones son apenas apreciables en sí, pero aun así se ve que el control funciona mediante la comunicación Modbus y además en la Figura 4-1 se ve que el cambio entre ambas simulaciones es apreciable principalmente en el pico de generación, en el que se reduce la tensión 44,7 V.

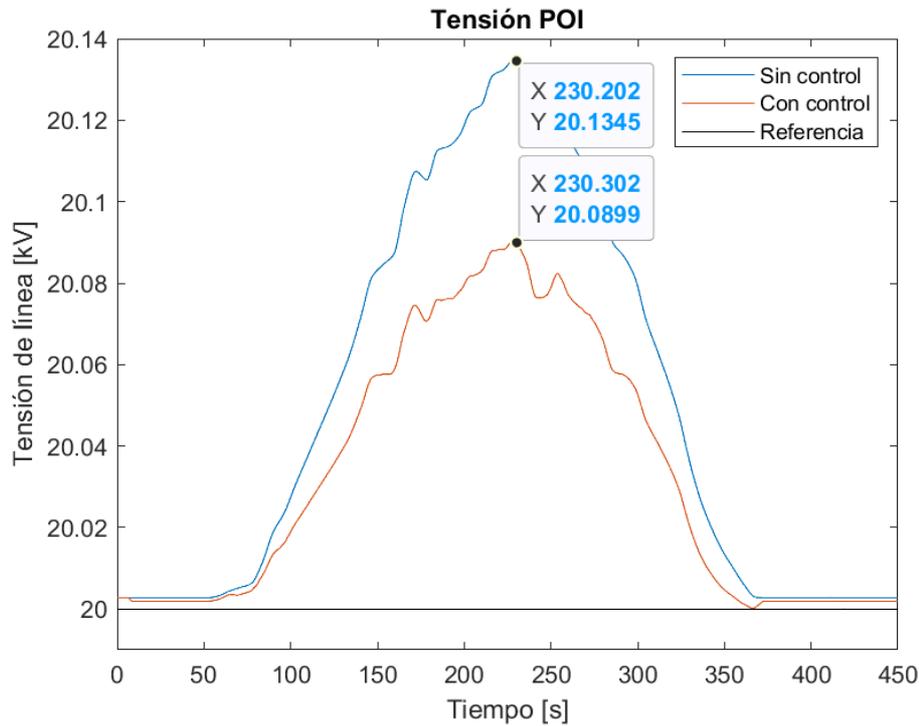


Figura 4-1. Tensión en el POI

En la Figura 4-2 se muestra la intensidad inyectada en el POI, el cambio de la operación sin control a con el control, es un poco más de intensidad ya que baja la tensión, consecuencia de dar la misma potencia activa con menos tensión. Esencialmente esta intensidad es debida a la inyección de potencia activa por parte de los 19 inversores, en otras palabras, esta intensidad es muy activa y poco reactiva como se demuestra en la Figura 4-5 con un factor de potencia igual a uno prácticamente en todo el tiempo que la planta produce energía eléctrica. Como el cambio de tensión no es tan significativo apenas afecta a la intensidad, por lo que se tiene un control que ciertamente solo modifica dos magnitudes, la controlada y la que modifica la controlada, es decir se tiene un buen acople entre la potencia reactiva y tensión, efecto que en las redes de transporte es más notable.

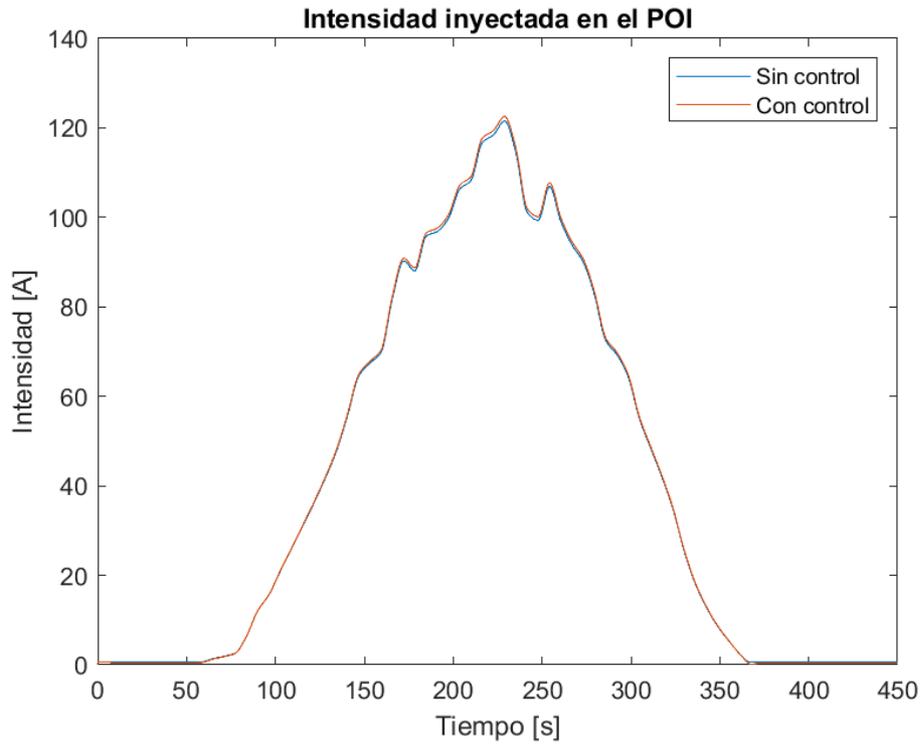


Figura 4-2. Intensidad inyectada en el POI

El siguiente resultado a comparar y analizar es el mostrado en la Figura 4-3 sobre la potencia activa. Se ha empleado un control que actúa sobre la potencia reactiva para mantener la tensión lo más baja posible, no afectando por su parte a la potencia activa, por lo que se comprueba como en ambos casos la potencia es igual. Esta potencia es resultado de la potencia inyectada por los 19 inversores menos las pérdidas en el sistema, la única limitación que puede darse que afecte a la potencia activa al modificar la potencia reactiva, es alcanzar el máximo de potencia aparente de los inversores, por lo que habría una limitación en la reactiva que la planta puede dar. En este caso como se ve que el perfil de generación mostrado en la Figura 3-13 se queda a 0.75 p.u. esta limitación no se llegaría a dar como se va a ver en la siguiente sección.

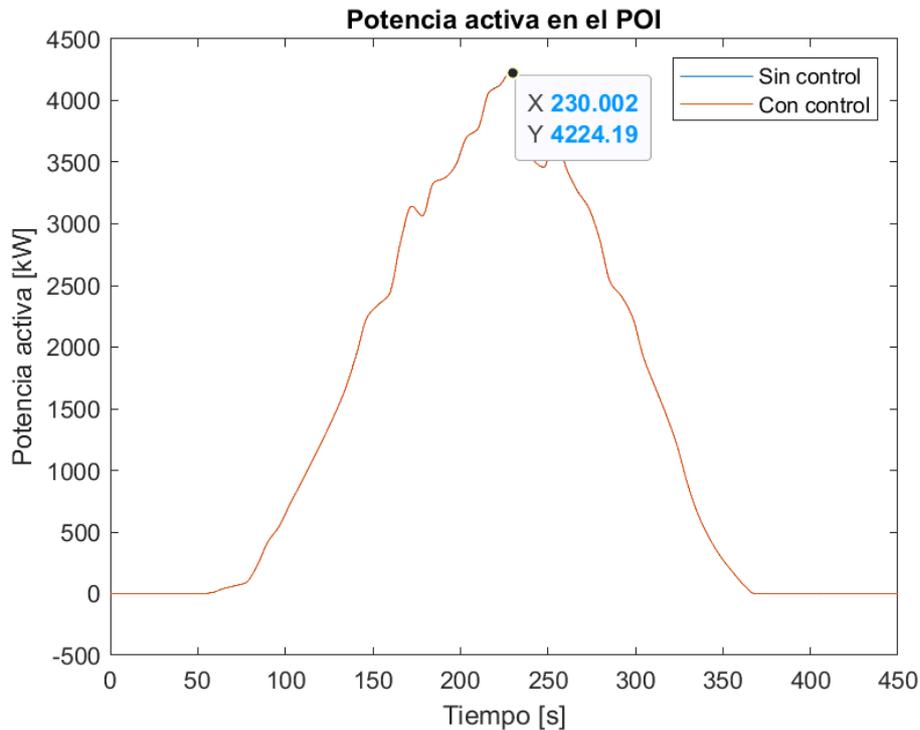


Figura 4-3. Potencia activa inyectada en el POI

A continuación, en la Figura 4-4 se enseña la potencia reactiva en ambos casos. En el caso sin control ya se aprecia un consumo de reactiva proveniente de las líneas y de los transformadores, después si se observa la curva con control, este consumo casi triplica lo previamente consumido, esto es a causa de que para bajar la tensión se debe consumir reactiva en dicho punto, esto es llevado a cabo en la realidad por los inversores reduciendo la amplitud de la onda de tensión a su salida, a causa de las consignas de reactiva que reciben. En el modelo simplemente es cambiar la potencia reactiva que debe consumir la fuente de corriente.

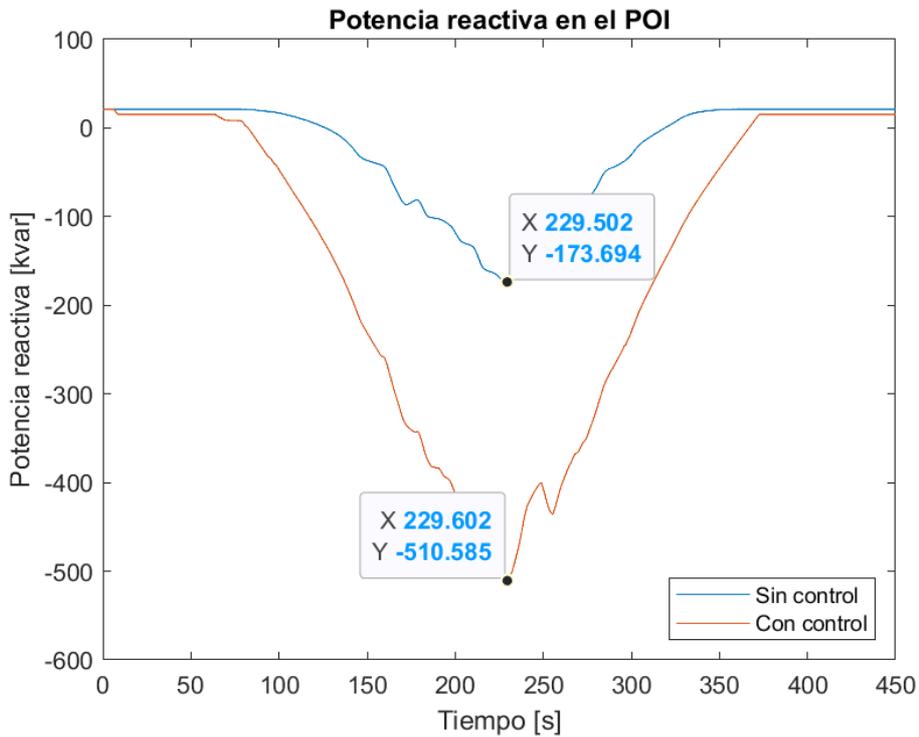


Figura 4-4. Potencia reactiva inyectada en el POI

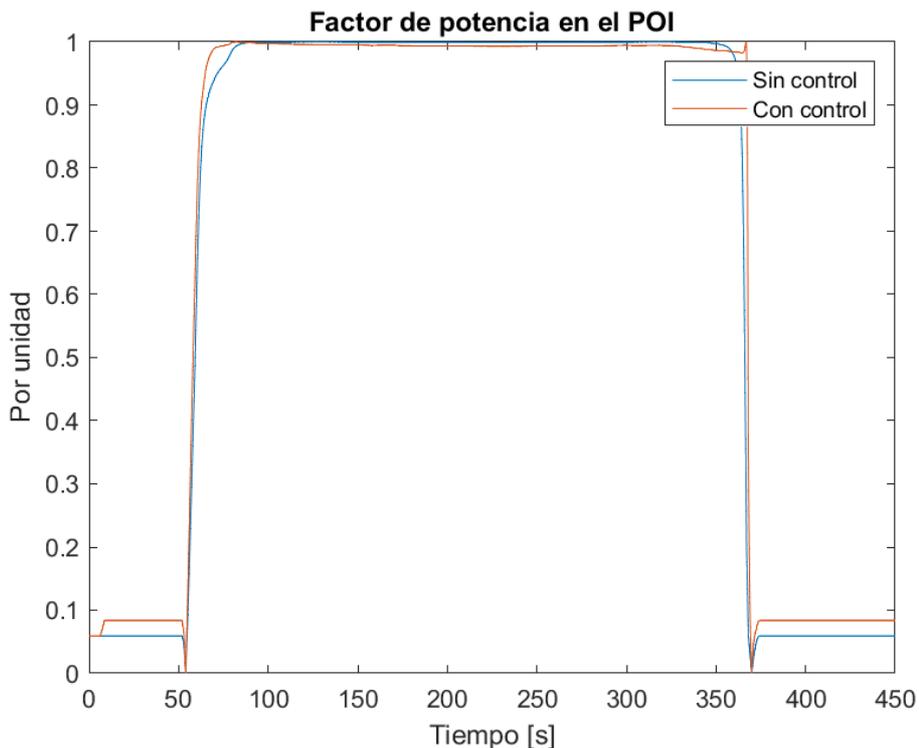


Figura 4-5. Factor de potencia en el POI

Para terminar la sección, en la Figura 4-5 se observa como el factor de potencia en el POI durante el funcionamiento de la planta se mantiene muy cerca de la unidad, aunque se aprecia ligeramente como en el caso que el control actúa en la planta, este factor se aleja un poco más del uno. Este factor tan cercano a uno se ve que comparando la potencia activa y la potencia reactiva, la activa es mucho mayor que la reactiva, la reactiva solo supone un 12,08% de la potencia activa en el pico de generación en el caso con control y un 4,11% en el caso sin control.

## 4.2. Resultados del CT2

Debido a que en el capítulo 3 se ha presentado el modelo en Simulink con el CT1, en esta sección se presentan los resultados del CT2 con el fin de mostrar su correcto funcionamiento, así como representar el efecto individual del control en los inversores. No obstante, como son 9 inversores al poner las curvas de sin control y con control de sus 4 magnitudes se tendría 18 curvas por gráfica, por simplicidad y mayor claridad visual solo se enseñan el inversor más cercano, el inversor 6 y el inversor más lejano, el inversor 2, estando los 7 restantes en el intervalo que dejan estos dos entre ellos.

En primer lugar, en la Figura 4-6 se ve como el control efectivamente reduce la tensión, en este caso unos 6 V aproximadamente por inversor. Después se aprecia que tanto la tensión entre los inversores no es la misma siendo mayor en el inversor más lejano, este fenómeno se debe a la caída de tensión de las líneas siendo mayor cuanto más lejos se encuentra el inversor del cuadro de baja del CT, se ve que en el caso del CT2 entre su inversor más lejano y cercano hay una diferencia de 2 V aproximadamente.

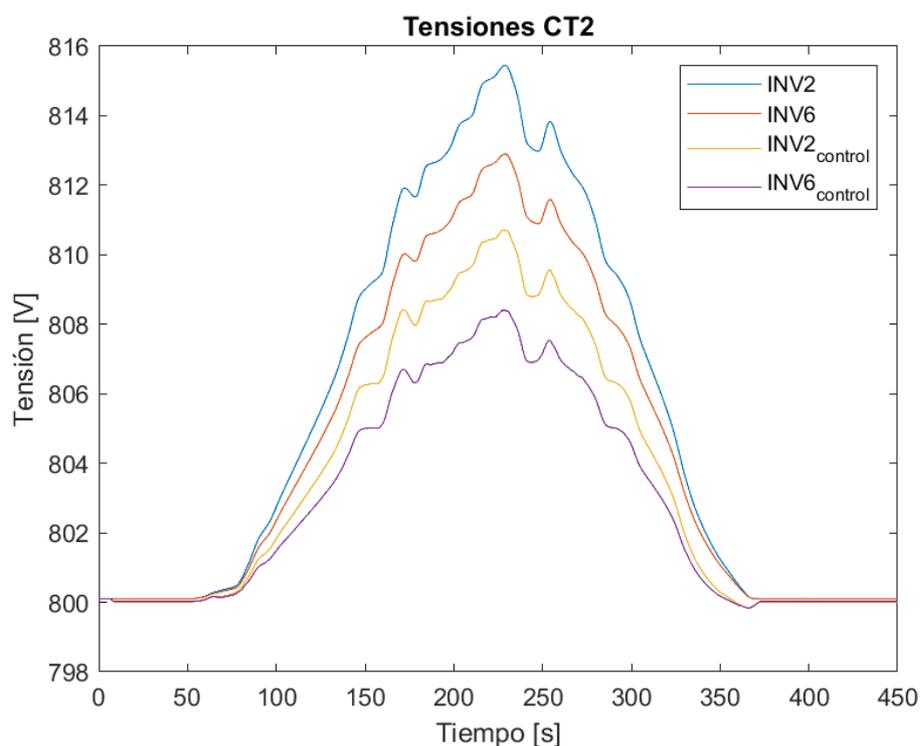


Figura 4-6. Tensiones en el CT2

A continuación, en la Figura 4-7 se expone una ampliación de las intensidades de los inversores en el pico máximo del perfil para apreciar de mejor forma la pequeña diferencia entre ellas. Al igual que en el POI estas suben debido a la bajada de la tensión por el control proporcional. Se puede señalar que el caso base como las intensidades de cada inversor es diferente, esto es a las diferentes tensiones que se dan en cada uno como se ve en la Figura 4-6 la tensión del inversor 2 es mayor por lo tanto tiene menos intensidad.

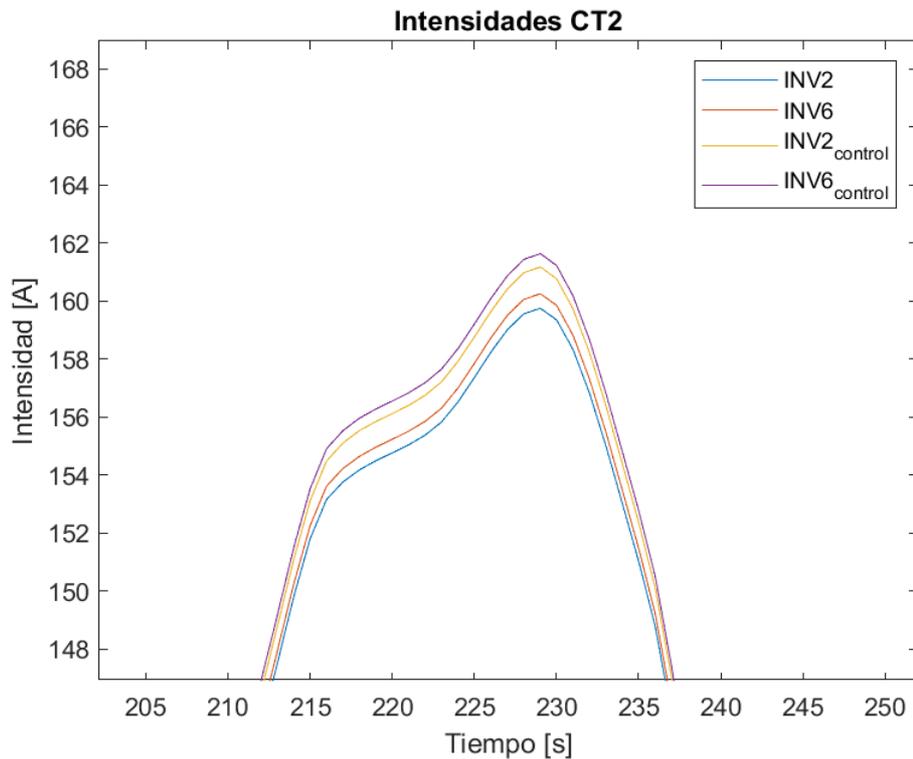


Figura 4-7. Intensidades inyectadas por los inversores

En la Figura 4-8 se ve el perfil de generación en unidades de potencia, además de que de la misma manera que en el POI estas gráficas son iguales con control que sin control pues solo se modifica la reactiva. Junto con la Figura 4-9 se puede ver en el pico máximo, la potencia aparente que manejan los inversores es de aproximadamente 225 kVA, por lo que se queda muy por debajo del límite que aguantan dichos inversores de 330 kVA como se puede observar en la Tabla 2-6.

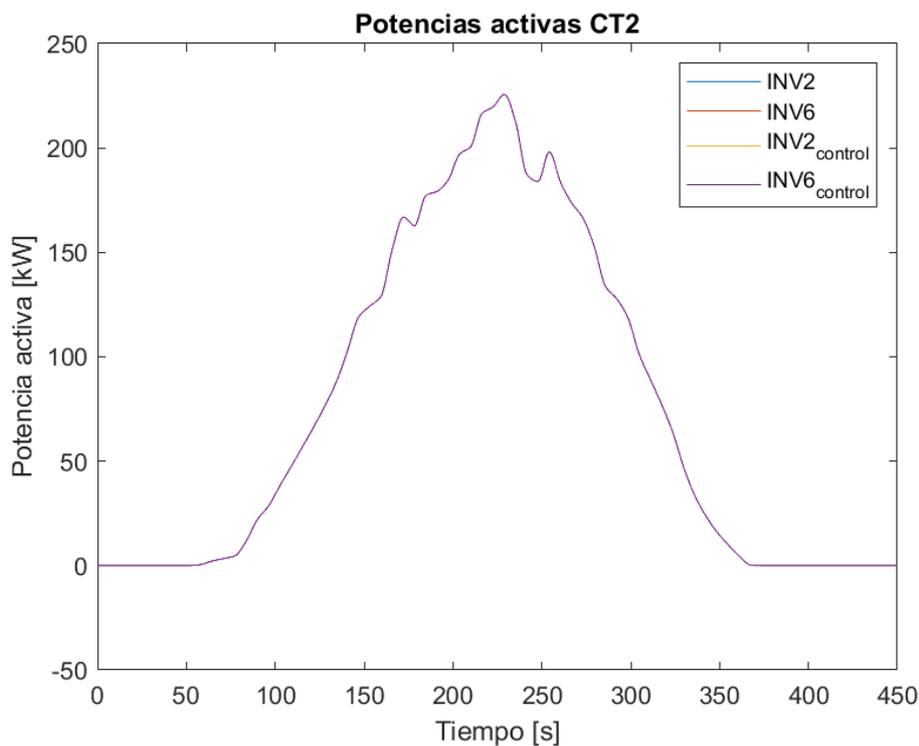


Figura 4-8. Potencia inyectada por las placas fotovoltaicas

Lo primero a comentar sobre la Figura 4-9 es que los cambios en las consignas de reactiva se ven más acusados en los inversores a diferencia que en el POI dado que las líneas y el transformador amortiguan estos cambios, es decir actúan como filtros suavizando dichos cambios, pudiendo verse escalones de potencia reactiva recibido por la comunicación. Con respecto al cambio por el control, inicialmente no se inyectaba ni consumía potencia reactiva por parte de los inversores validando lo dicho anteriormente sobre los consumos de reactiva en la Figura 4-4, con el control en funcionamiento se observa como si empiezan a consumir potencia reactiva para poder bajar las tensiones en el POI.

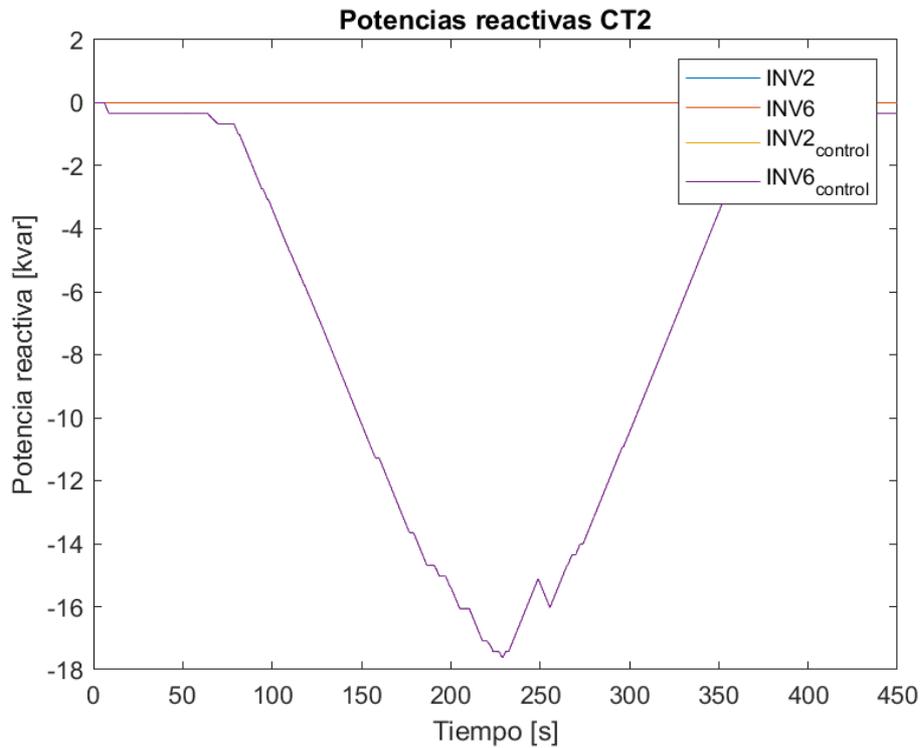


Figura 4-9. Potencias reactivas inyectadas por los inversores



# 5 CONCLUSIONES

---

En esta sección se van a presentar las conclusiones más importantes extraídas del trabajo realizado en este documento:

- 1) Se ha demostrado que es posible observar y analizar el comportamiento de sistemas reales como sería el caso de una planta fotovoltaica mediante un entorno HIL el cual, logra combinar un entorno de simulación con elementos reales externos obteniendo la verdadera respuesta de estos elementos en la simulación.
- 2) La plataforma en tiempo real Opal-RT 5600 es una herramienta muy potente y sencilla de utilizar para simulaciones de sistemas eléctricos como es el objeto de este trabajo, brindando además la oportunidad de construir un entorno HIL. Esta plataforma utiliza el entorno de diagramas de bloque para programación de Matlab/Simulink que dispone de una gran cantidad de bloques configurables para poder programar los sistemas reales.
- 3) En cuanto al protocolo Modbus, es un protocolo utilizado muy frecuentemente para la comunicación entre inversores y PLC's puede que se deba a la sencillez que presenta este. Respecto a su implementación en Opal-RT, a pesar de que tiene sus complejidades como el ver que estructura se debe seguir o como se realiza la transmisión de datos, no resulta demasiado difícil de configurar para iniciar la comunicación, además las funciones utilizadas en Python tampoco resultan difíciles de utilizar dado que con dos entradas realizan la acción deseada.
- 4) Con el entorno HIL realizado, se dispone de una plataforma cercana a la realidad debido a que se utilizan los parámetros reales de la planta que junto a poder conectar el sistema de comunicaciones de la propia planta se tiene un sistema donde poder ejecutar ciberataques sin perturbar el correcto funcionamiento de elementos eléctricos de potencia y en adicción de un entorno en el que se puede probar técnicas de protección ante estos ciberataques.

En conclusión, este trabajo resalta la eficacia del uso de simulaciones en tiempo real y entornos HIL para el análisis y desarrollo de avances tecnológicos en plantas fotovoltaicas, con el uso de plataformas en tiempo real como Opal-RT que dispone de protocolos utilizados comúnmente en dichas instalaciones como lo es Modbus.



# ANEXO I: CONFIGURACIÓN MODBUS

En el siguiente anexo se pretende explicar detalladamente como comunicar por el protocolo Modbus el ordenador de tiempo real Opal-RT en los dos sentidos de comunicación, lectura y escritura. Se encuentra explicado los cambios necesarios en el modelo de Simulink como toda la configuración pertinente en el programa RT-LAB dado que para establecer dicha comunicación hay que relacionar lo interno del modelo con los puertos externos del Opal-RT.

## Bloques necesarios en Simulink

En primer lugar, en el modelo de Simulink se añaden los bloques de *OpOutput* y *OpInput*, que serán los encargados de mandar las señales desde la simulación a las direcciones en el caso de lectura desde el maestro y leer las señales de las direcciones que provienen del maestro.

## Configuración del esclavo en RT-LAB

Lo primero que se debe hacer en el menú de la izquierda mostrado en la Figura 5-1, de la pantalla de RT-LAB en el apartado de *I/O Interfaces* es darle clic derecho y darle a *New I/O Interface*, al seguir estos pasos se abrirá un menú donde hay que buscar Modbus Slave. Tras lo cual, se creará el apartado para configurar los parámetros de la configuración.

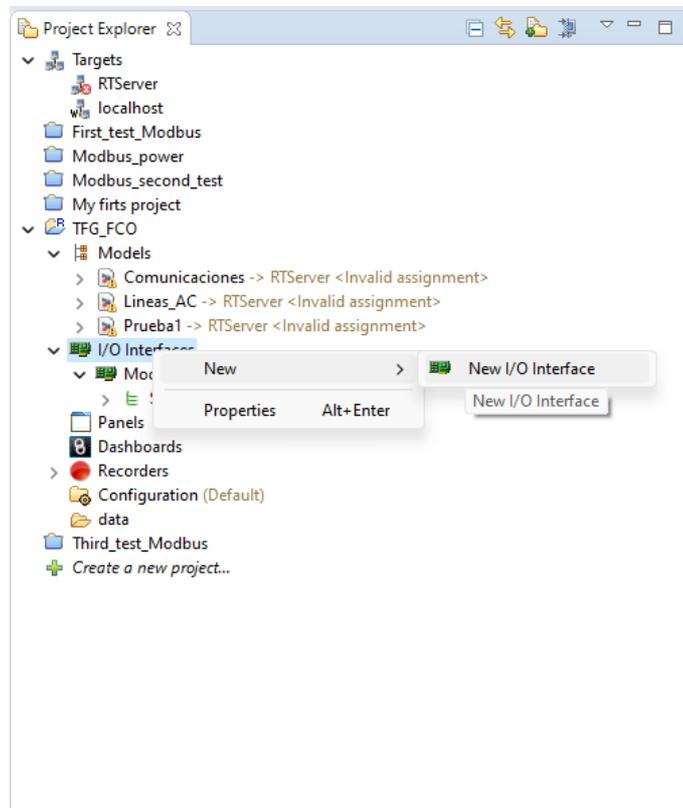


Figura 5-1. Menú para buscar el esclavo

La Figura 5-2 muestra donde se debe configurar toda la información del esclavo como sobre el nombre que va a tener, el puerto IP de salida, así como el puerto TCP que en Modbus es el 502, cada cuanto tiempo se va a

realizar la comunicación y por último el orden de los bytes. Además de estas configuraciones que se ven a simple vista, se necesita otra que puede pasar desapercibida, es indicarle que modelo y que subsistema es el que va a poseer comunicación Modbus, para ello arriba a la izquierda en *Associated subsystem* se le indica. En el subsistema que se le indica debe estar todo lo relacionado con Modbus y tiene que estar en el SM del modelo.

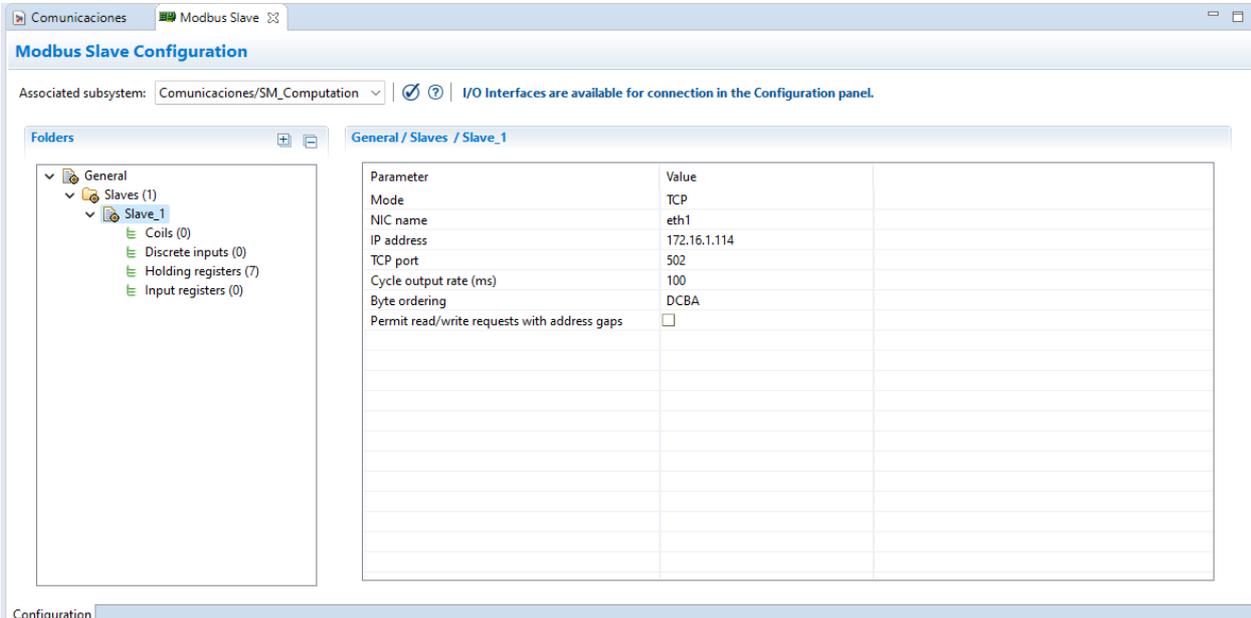


Figura 5-2. Pantalla de configuración del esclavo

A continuación, en la Figura 5-3 se presenta la pantalla donde se crean las direcciones donde se van a guardar las señales a comunicar, así que en el apartado de Holding Registers y se crean tantas direcciones como sean necesarias, pudiendo configurar el número de su dirección, quien lo va a modificar y el tipo de dato.

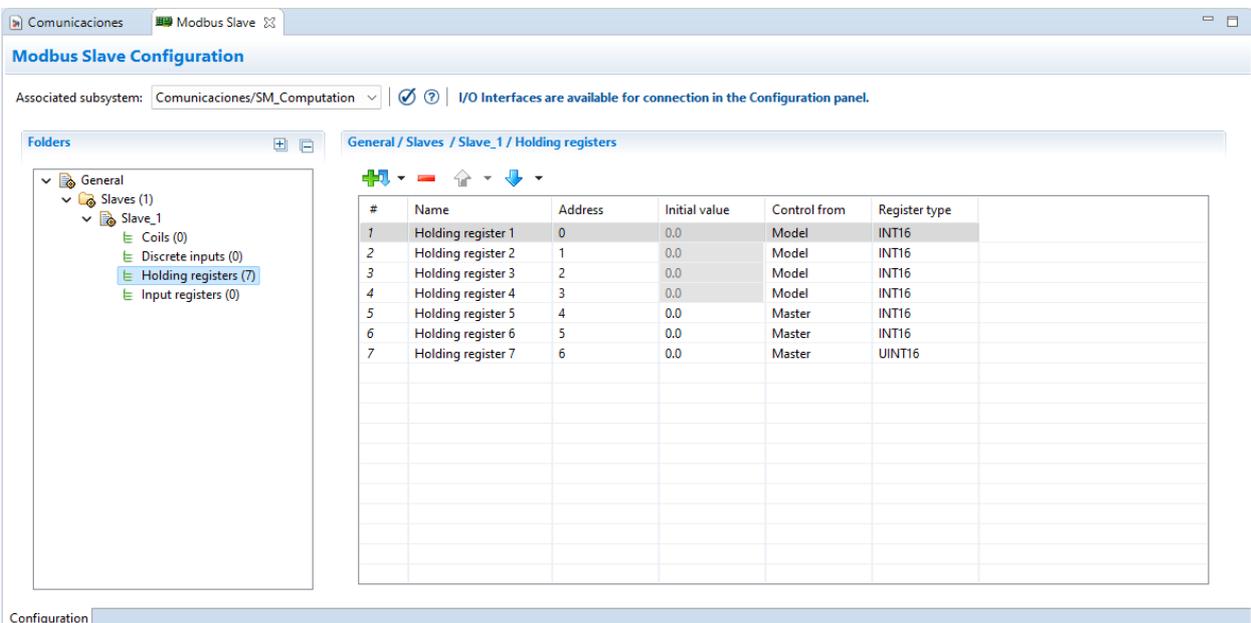


Figura 5-3. Pantalla de configuración de las direcciones

Por ahora, se tienen las direcciones y las etiquetas creadas, pero no están relacionadas entre ellas, por lo tanto, el siguiente paso es compilar el modelo para que en el apartado de *OpInputs & OpOutputs* de RT-LAB aparezcan las etiquetas tal y como se muestra en Figura 5-4.



Figura 5-4. Etiquetas del modelo en RT-LAB

Con el fin de ir al apartado *Configuration (Default)* para poder establecer la relación entre etiquetas de Simulink con las direcciones, para ello, se arrastra la etiqueta desde *OpInputs & OpOutputs* al recuadro que aparece en la Figura 5-5 .

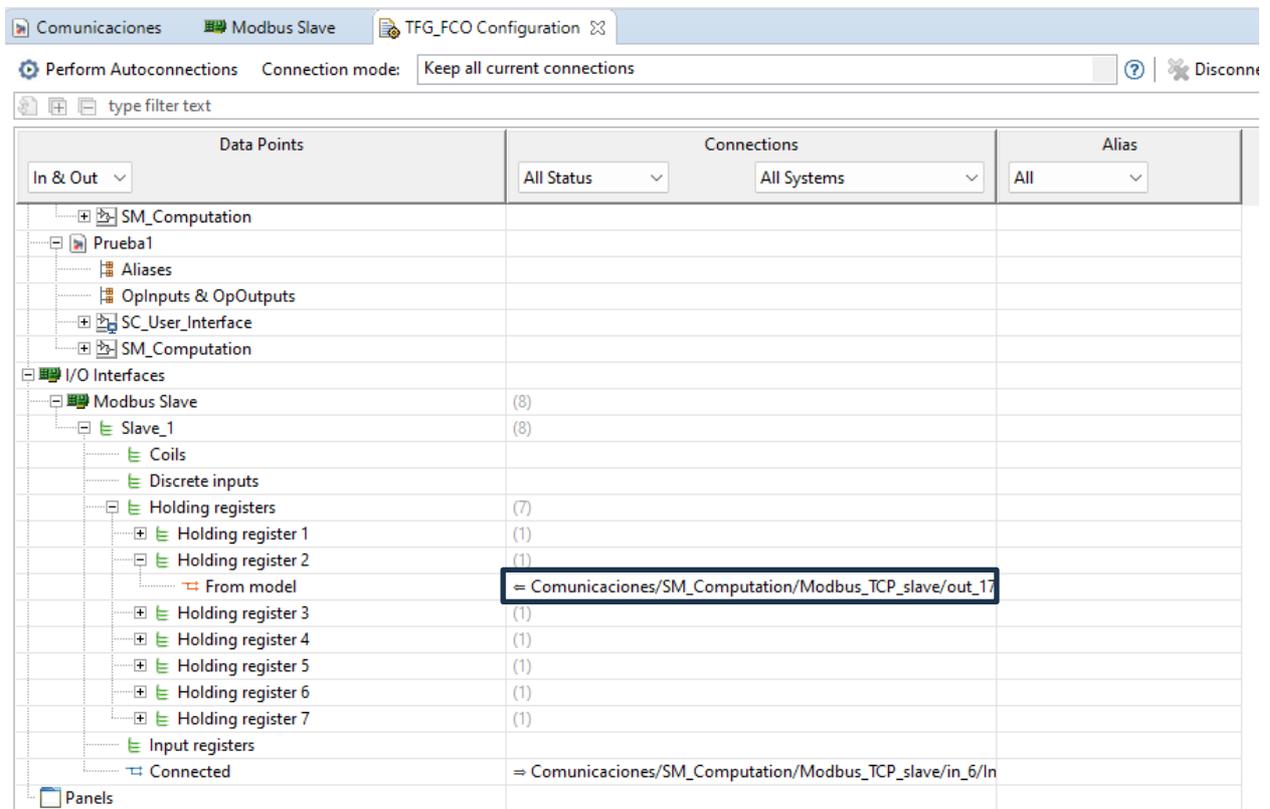


Figura 5-5. Pantalla de Configuration (Default)

Quedando establecida la configuración para poder comunicarse Opal-RT vía Modbus con cualquier dispositivo externo. No obstante, por defecto se tiene la señal *Connected* que es muy útil añadirla al Simulink pues desde la consola se puede ver si el maestro está conectado o no, cada vez que se conecte el maestro esta señal se incrementara por 1.

## Maestro de la comunicación-Código Python

Para completar la comunicación se precisa de un maestro para el esclavo, gracias a la librería pymodbus se puede con Python crear un maestro para poder probar la comunicación y realizar un control externo con el fin de validar el buen funcionamiento de dicha comunicación.

El código se basa en una única función en la que se leen las direcciones donde están guardadas las medidas del POI convirtiéndolas a números enteros con signo, luego se procede a ejecutar el control de tensión y calculada

la potencia reactiva del POI se convierte a número entero sin signo para mandarla por Modbus. Este código se ejecuta constantemente con un retraso que se verá más adelante.

Para el código serán necesario importa las librerías mostradas en la Figura 5-6, la primera de ellas es para tener las funciones necesarias para la lectura y escritura de los Holding Registers, de la librería *time* se utiliza *sleep* para añadir el tiempo en que se comunica el maestro con el esclavo, de la librería *math* se cogen las operaciones matemáticas. Por último, se declara como variable global la IP del esclavo para en la función principal de la Figura 5-7 indicársela a la función creada para el funcionamiento del maestro.

```
from pymodbus.client import ModbusTcpClient
import time
from time import sleep
import math

IP = "172.16.1.114"
```

Figura 5-6. Librerías importadas

```
if __name__ == '__main__':
    global IP
    test_write_read_elec(IP)
```

Figura 5-7. Función principal

En la Figura 5-8 se muestra la parte de la función encargada de la lectura, donde primeramente se lee de las direcciones con la función *read\_holding\_registers* para luego convertir los datos en enteros con signos gracias al llamamiento de la función *toSigned16* mostrada en la Figura 5-9. Para terminar este apartado se vuelve a pasar a los dos números decimales de la intensidad y de la potencia reactiva, mediante *print* se muestran por pantalla durante la simulación dichas medidas, pasando estas medidas a magnitudes de línea y a kilos.

```
def test_write_read_elec(IP):
    client = ModbusTcpClient(IP)
    t=0
    while(1):
        Holding_Registers_result = client.read_holding_registers(0,4) #Reading Holding registers
        for i in range(0,4):
            Holding_Registers_result.registers[i]=toSigned16(Holding_Registers_result.registers[i], 16)
        Holding_Registers_result.registers[1]= Holding_Registers_result.registers[1]/100
        Holding_Registers_result.registers[3]= Holding_Registers_result.registers[3]/100
        print ("\nTension fase a: ")
        print (Holding_Registers_result.registers[0]*3**0.5)
        print ("\nIntensidad fase a: ")
        print (Holding_Registers_result.registers[1])
        print ("\nPotencia activa: ")
        print (Holding_Registers_result.registers[2])
        print ("\nPotencia reactiva: ")
        print (Holding_Registers_result.registers[3])
```

Figura 5-8. Código encargado de la lectura

```
# Convertidor de uint16 a int16
def toSigned16(n,bit):
    mask = (2**bit) - 1
    if n & (1 << (bit - 1)):
        return n | ~mask
    else:
        return n & mask
```

Figura 5-9. Función de conversión de UINT a INT

En la Figura 5-10 se presenta el control implementado en Python, el cual se realiza en p.u. para mayor simplicidad en la comunicación. Esta ecuación da por resultado la potencia reactiva necesaria en el POI para poder bajar la tensión. Como se intuye esta siempre va a ser un consumo de reactiva.

Una vez realizado el cálculo queda por hacer la preparación de dicha reactiva para escribirla en la dirección, en la Figura 5-11 se ven todos los cambios hechos con este fin, se multiplica por 10000 para pasar números decimales a enteros, luego se truncan los demás decimales y se entra en un condicional que principalmente cataloga si el número es positivo y está en el rango o si es negativo para pasarlo entre  $2^{15}+1$  y  $2^{16}$ , finalmente si dichos números están fuera del rango de los INT16 se establecen como el número más grande.

```
#Control de tensión
k=1/0.04
Vbase=20000
Vref=20000/Vbase

Q=(Vref-Holding_Registers_result.registers[0]*(3**0.5)/Vbase)*k
```

Figura 5-10. Control de tensión en Python

```
#Cambios para comunicarlo
Q=Q*10000
Q=math.trunc(Q)
#Conversión a UINT
if (Q>=0 and Q<(2**15)):
    Q_conv=Q
elif (Q<0 and Q>-2**15):
    Q_conv=Q+2**16
elif (Q>(2**15)):
    Q_conv = (2**15)-1
elif (Q<-(2**15)):
    Q_conv = (2**15)
```

Figura 5-11. Cambios para la escritura de consigna de potencia reactiva

Para terminar esta función solo queda la escritura, para ello se dispone de la función *write\_registers* que se ejecuta al entrar en el condicional que dirá si se produce un error durante la escritura. Para la escritura se le manda la potencia reactiva ya convertida a UINT y otra variable (*t*) que representa el tiempo de la comunicación. Además, ya al final se añade el retraso de 100 ms para emular cada cuanto tiempo se realiza el intercambio de información. Todo ello se representa en la Figura 5-12.

```
t=t+1
if client.write_registers(5,[Q_conv,t]) == False:
    print ("Error writing multiple registers")
time.sleep(.1)
```

Figura 5-12. Escritura en las direcciones

Como fin del anexo para demostrar el correcto funcionamiento de esta comunicación se ha creado una variable que se va incrementando cada vez que se produce la comunicación, esta variable es *t*, como se observa en la Figura 5-13 cada 100 ms se incrementa por uno en Simulink tal y como debe ser por lo programado en Python como se ve en la Figura 5-12 antes del condicional.

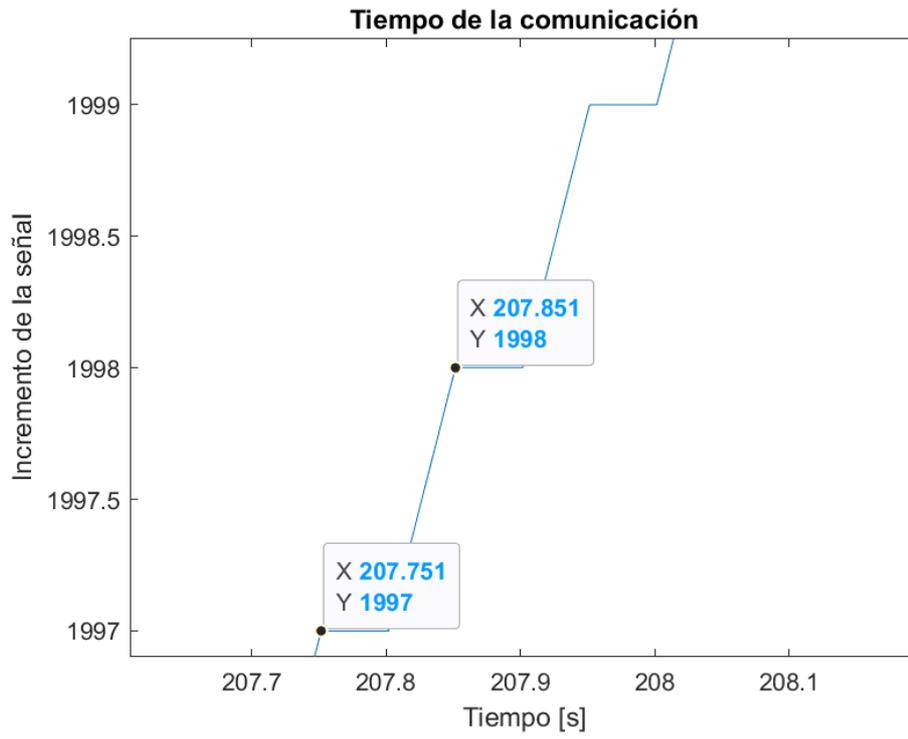


Figura 5-13. Incremento de la señal

# REFERENCIAS

---

[1] <https://skylife-eng.com/servicios/digitalizaci%C3%B3n/posibilidades-ilimitadas/hardware-in-the-loop>

[2] <https://www.ree.es/es>

[3] <https://www.loxone.com/eses/kb/loxone-config-comunicacion-con-modbus/>

[4] Casellas, F., Esteban, J.A., Guinjoan, F.S., Pique, R., Martinez, H., Velasco, G., & Universitària, E. (2014). Simulación Mediante "Hardware In the Loop" de un Convertidor Buck.