



Universidad de  
Oviedo



**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

**GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DESARROLLO DE UN SMART METER PARA MEDIDA DE PARÁ-  
METROS ELÉCTRICOS**

**D. HUERTA CUENCO, Daniel**  
**TUTOR: D. BLANCO CHARRO, Cristian**

**FECHA: Junio 2020**

# Índice

1.- Índice de abreviaturas.....	4
2.- Objetivo y alcance del trabajo. ....	5
3.- Estado del arte. ....	7
4.- Marco teórico.....	10
4.1.- EJES DE REFERENCIA. ....	10
4.2.- TRANSFORMACIÓN DE CLARKE.....	11
4.3.- TRANSFORMACIÓN DE PARK. ....	12
4.4.- MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN. ....	13
4.5.- CONTROLADOR PI. ....	15
4.6.- FILTRO PASO BAJO. ....	16
4.7.- FILTRO PASO ALTO. ....	18
4.8.- FILTRO NOTCH.....	18
4.9.- MEDIDA DE POTENCIA. ....	19
4.10.- TRANSFORMACIÓN BILINEAL O MÉTODO DE TUSTIN. ....	20
4.10.1.- Controlador PI:.....	21
4.10.2.- Integrador: ....	22
4.10.3.- Filtro paso bajo: ....	22
4.10.4.- Filtro paso alto: ....	23
4.10.5.- Filtro Notch (rechazabanda): ....	23
4.11.- ARMÓNICOS EN LA RED ....	24
4.12.- SPI.....	27
5.- Análisis de opciones y solución aportada en cuanto al proceso productivo. ....	29
5.1.- SENSORES DE CORRIENTE. ....	29
5.1.1.- ACS712 ....	29
5.1.2.- SCT-013-030 ....	29
5.1.3.- SCT-013-000 ....	30
5.2.- SENSORES DE TENSIÓN. ....	30
5.2.1.- LEM DVC 1000-B ....	30
5.2.2.- ZMPT101B ....	30
5.3.- PROCESADOR. ....	31
6.-Instalación.....	32
6.1.- CONEXIÓN ENTRE SENSORES Y RASPBERRY PI. ....	32

6.1.1.- Sensor de intensidad.....	32
6.1.2.- Sensor de tensión.....	34
6.1.3.- ADC.....	35
6.3.- CONEXIÓN ENTRE RASPBERRY Y MATLAB. ....	38
7.- Código. ....	43
7.1.- MODOS DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO DE DOS SENSORES.....	44
7.2.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSORES.....	46
8.- Análisis de resultados.....	47
8.1.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSORES CON SEÑAL GENERADA DESDE MATLAB.....	47
8.1.1.- Circuito eléctrico. ....	47
8.1.2.- Resultados.....	49
8.2.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA DESDE MATLAB. ...	54
8.2.1.- Circuito eléctrico. ....	55
8.2.2.- Resultados.....	56
8.3.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSORES CON SEÑAL GENERADA A PARTIR DE UN FICHERO DE DATOS. ....	62
8.3.1.- Circuito eléctrico. ....	63
8.3.2.- Resultados.....	64
8.4.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA A PARTIR DE UN FICHERO DE DATOS.....	68
8.4.1.- Circuito eléctrico. ....	69
8.4.2.- Resultados.....	71
8.5.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA POR UN OSCILOSCOPIO .....	76
8.5.1.- Circuito eléctrico. ....	77
8.5.2.- Resultados.....	79
9.- Presupuesto. ....	85
10.- Conclusiones. ....	86
11.- Bibliografía. ....	87

# 1.- Índice de abreviaturas.

Hz – Hercios

V – Voltios

W – Vatios

VAr – Voltamperios reactivos

A – Amperios

ms - Milisegundos

A<sub>RMS</sub> – Valor eficaz del parámetro A (Root Mean Square)

IP – Internet Protocol

CPU – Central Processing Unit

ADC – Analog to Digital Converter

PLL – Phase Locked Loop

SRF-PLL – Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop

SOGI-QSG – Second Order Generalized Integrator - Quadrature Signal Generator

Controlador PI – Controlador Proporcional Integral

$f_n$  – Frecuencia natural de un filtro

$\xi$  – Coeficiente de amortiguamiento de un filtro

USB – Universal Serial Bus

HAT – Hardware Attached on Top

LAN – Local Area Network

RAM – Random Access Memory

SPI – Serial Peripheral Interface

GPIO – General Purpose Input Output

MISO – Master Input Slave Output

MOSI – Master Output Slave Input

CA – Corriente Alterna

CC – Corriente Continua

IVA – Impuesto sobre el Valor Añadido

## 2.- Objetivo y alcance del trabajo.

Actualmente, en el mundo se está viviendo la era de los datos, el internet de las cosas (IoT) y un aumento de la conciencia ecológica. Una era en la que adquiere cada vez más importancia para el usuario disponer de información acerca del consumo energético de su hogar por diversos motivos. Se puede apreciar que un primer motivo por el que los consumidores quieren conocer su consumo energético es simplemente la intención de ser conscientes de él. Con esto el consumidor tiene la capacidad de decidir si considera necesario realizar inversiones que persigan un aumento de la eficiencia energética de su hogar, la cual, hoy en día, se puede aumentar de múltiples formas que se escapan del alcance de este proyecto.

Otra situación importante en la que muchos consumidores se pueden ver animados a conocer en detalle su consumo energético, es en el caso de que tengan contratada o estén considerando contratar una tarifa con algún tipo de discriminación horaria. La característica principal de estas tarifas consiste en que no se paga lo mismo por la electricidad en todas las horas del día, siendo su precio más reducido en ciertas horas del día. Las horas a las que el usuario podrá consumir electricidad a un precio menor dependerán de las condiciones de su contrato con la empresa comercializadora. Por lo tanto, para aquellos consumidores que se encuentren en esta situación, resulta interesante contar con una herramienta que les permita conocer en qué momentos del día tiene lugar su consumo eléctrico, para poder decidir si contar con una tarifa con discriminación horaria les supone un ahorro económico o si, por el contrario, les penaliza en la factura.

Finalmente, es importante mencionar que este dispositivo permitirá al usuario conocer la potencia máxima consumida en su instalación. Este dato es muy importante porque le permite conocer cuánta potencia debe tener contratada para evitar pagar un precio demasiado alto por el término de potencia de su factura, al mismo tiempo que evita cortes producidos por consumir una potencia superior a la que tenga contratada. El término de potencia de las facturas tiene un precio variable según el contrato que se tenga con la empresa distribuidora. No obstante, su precio sin IVA suele ser superior a los 0,1 €/kW día [1] [2] [3], lo que supone un alto coste a final de mes.

El objetivo de este trabajo es dar respuesta a todas esas necesidades por medio del diseño y construcción de un equipo que permita al usuario disponer de información en tiempo real sobre el consumo eléctrico en su instalación, teniendo a su disposición información sobre las potencias activa y reactiva consumidas o la calidad de la red a la que está conectado, incluyendo presencia de armónicos, tensión y frecuencia. El objetivo es diseñar un Smart Meter que sirva para tomar medidas tanto en instalaciones monofásicas como trifásicas con un único software que tenga diferentes modos de operación que serán:

- Conexión a instalación trifásica. 1 sensor de tensión y 1 de intensidad en cada fase. Es decir, 6 sensores en total. Se denominará “Modo trifásico de seis sensores”.
- Conexión a instalación trifásica. 1 sensor de tensión y 1 de intensidad conectados a una misma fase. Es decir, 2 sensores en total. Se denominará “Modo trifásico de dos sensores”.
- Conexión a instalación monofásica. 1 sensor de tensión y uno de intensidad en el cable de fase de la instalación. Es decir, 2 sensores en total. Se denominará “Modo monofásico”.

La diferencia entre el modo trifásico de seis sensores y el modo trifásico de dos sensores es que el primero es más preciso y resistente a las perturbaciones, pero al necesitar el triple de sensores tendrá un coste superior. Por el contrario, el segundo ofrece un dispositivo de menor precisión pero menor coste. Además, el modo trifásico de dos sensores requiere que la red sea equilibrada, es decir, que las tensiones de todas sus fases son iguales en módulo y se encuentran desfasadas simétricamente. De lo contrario, las medidas serán erróneas puesto que se estará suponiendo que las tres fases tienen la misma carga que la fase en la que se toman las medidas. El modo trifásico de seis sensores puede trabajar en una red desequilibrada.

De este modo, se tendrá un equipo que puede ser utilizado tanto en entornos domésticos como industriales. El motivo de que se use un único software para el Smart Meter en sus diferentes modos de operación es la consiguiente reducción de costes de desarrollo, lo cual es imprescindible para que este dispositivo sea de bajo coste.

## 3.- Estado del arte.


En un mundo en que cada vez adquiere más importancia la recopilación de datos, se ve cómo poco a poco van apareciendo más dispositivos que ayudan al usuario a cuantificar su consumo doméstico y a disponer de esos datos de forma cada vez más inmediata. Un primer ámbito donde se puede apreciar esta tendencia es en el de los contadores de energía domésticos.

En España, hoy en día existe la obligatoriedad de tenencia de un contador de energía inteligente en los hogares [4]. Estos miden datos tales como la energía activa o reactiva consumidas, permitiendo además tanto a los usuarios como a la compañía eléctrica la lectura de esos datos desde el propio contador o a través de internet. Aunque estos equipos dan mucha de la información que se puede necesitar, no se puede olvidar que, habitualmente, estos equipos son propiedad de la compañía distribuidora. Por el alquiler y mantenimiento de estos equipos cada usuario debe pagar a la distribuidora 0,81 euros al mes [4]. Otra opción es comprar el equipo, con un precio que oscila entre 100 y 200 euros, a lo que habría que añadir ciertos gastos extra que puede haber propios del mantenimiento o reparación del mismo. Estos equipos, al menos a día de hoy, no dan información sobre la calidad de la red en función de la presencia de armónicos, que en según qué casos puede ser importante conocer.

Otro ámbito donde se puede ver la tendencia antes comentada es en la creciente proliferación de dispositivos que miden la energía consumida únicamente para informar al usuario de ello. En ese grupo se encuentran, por ejemplo, los enchufes que cuentan con una pequeña pantalla en la que muestran datos como la potencia que se está consumiendo en ese enchufe en ese momento o la energía que se ha consumido a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Dentro de este grupo hay bastantes diferencias en cuanto a los datos proporcionados y la inteligencia del dispositivo y su precio comienza en torno a los diez euros, y aumenta a medida que aumentan sus prestaciones.

Una opción diferente a este tipo de medidores sería por ejemplo el Wibeec [5]. Este dispositivo se instala en el cuadro general de la instalación, tal y como se puede ver en la figura

3.2, y ofrece un amplio rango de valores en tiempo real sobre el consumo eléctrico. Cuenta con una app en la que se pueden leer los datos, previamente enviados vía Wi-Fi a la nube. Se pueden ver algunos de esos datos en la figura 3.3 y en la figura 3.4. Otra opción para la lectura de los datos sería introducir su IP en el navegador y acceder a la lectura de los mismos. Algunas funciones interesantes serían la posibilidad de configurar alarmas cuando el consumo alcanza un valor determinado, o ver la previsión del consumo al final del mes, recibir avisos de sobretensiones o subtensiones, o integrar los datos recibidos en el software PowerStudio SCADA desarrollado por la misma empresa que fabrica el Wibeec y que sirve para la gestión y control de los consumos de una instalación. Existen varios modelos y su precio va desde 256€ hasta 410€, como se puede ver en la figura 3.1, en la que aparecen sus precios sin IVA (a estos les hay que añadir un 21% de IVA). Al igual que este, existen otros equipos similares producidos por otras compañías, que también tienen un amplio rango de precios en función de sus características.



Wibeec , Analizador de consumo

Tipo	Código	A máx.	Sistema	Medida	Comunicaciones	Protocolo	PVP
Wibeec-M-L	[*] M57010.	70	Monofásico	N-L	Wifi	HTTP / ModbusTCP / XML	212,11
Wibeec-M-R	[*] M57011.	70	Monofásico	L-N	Wifi	HTTP / ModbusTCP / XML	212,11
Wibeec-T-L	[*] M57020.	70	Trifásico	N-LIII	Wifi	HTTP / ModbusTCP / XML	339,45
Wibeec-T-R	[*] M57021.	70	Trifásico	LIII-N	Wifi	HTTP / ModbusTCP / XML	339,45
Wibeec-3P	[*] M57022.	70	Trifásico	LIII	Wifi	HTTP / ModbusTCP / XML	339,45

Analizador de consumos

Figura 3.1.- Tabla de precios de los distintos modelos de Wibeec.

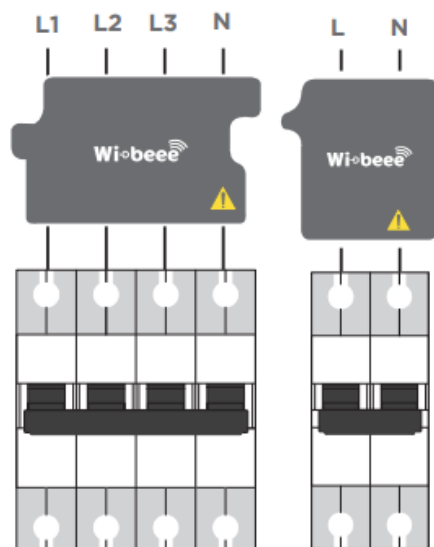


Figura 3.2.- Esquema de conexión Wibeec-T-R y Wibeec L-R.





Figura 3.3.- Gráficas obtenidas de la aplicación de Wibeec.

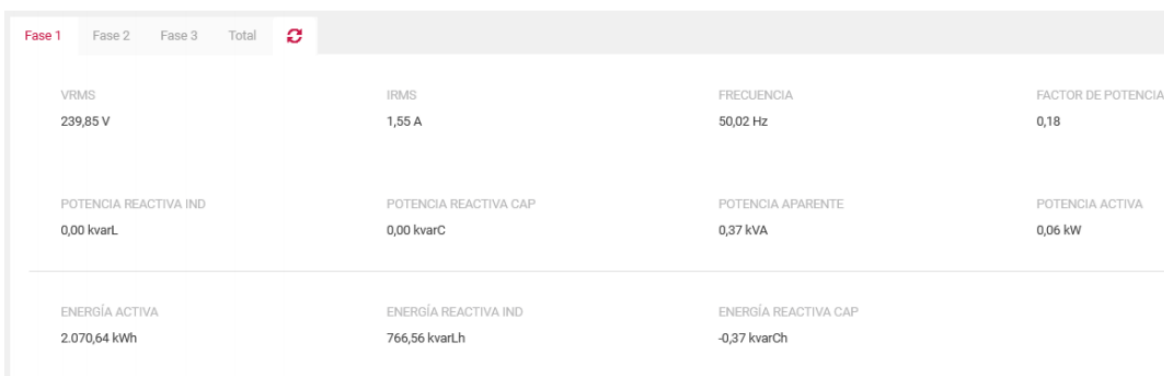


Figura 3.4.- Medidas obtenidas de la aplicación de Wibeec.

Por tanto, se puede constatar la necesidad de que aparezcan en el mercado equipos de medida que proporcionen información sobre potencia activa y reactiva consumidas, así como información sobre la presencia de armónicos que sea precisa, en tiempo real, con posibilidad de lectura en remoto y a un precio tan reducido como el que se consigue en este TFG. Además, este será de código abierto para facilitar las aportaciones que en un futuro alguien pueda querer hacerle para que se ajuste mejor a sus necesidades o para mejorar el funcionamiento del mismo.

## 4.- Marco teórico.

### 4.1.- EJES DE REFERENCIA.

Existen tres sistemas de ejes de referencia a los que referir las tensiones e intensidades trifásicas con las que se trabaje.

El primero de los sistemas, es el sistema formado por tres ejes estacionarios  $a$ ,  $b$  y  $c$  con un ángulo de  $120^\circ$  entre ellos. En un sistema trifásico equilibrado, las componentes referidas a cada uno de los ejes serán iguales en módulo y tendrán un desfase de  $120^\circ$  entre ellas.

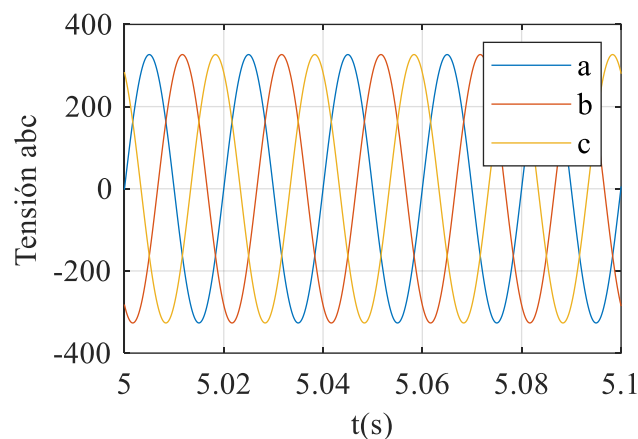


Figura 4.1.- Tensiones de un sistema trifásico referidas a los ejes  $abc$ .

El segundo de los sistemas de referencia está formado por dos ejes estacionarios denominados  $\alpha$  y  $\beta$  que se encuentran desfasados  $90^\circ$ , situándose el eje alfa superpuesto al eje  $a$  del sistema anterior (figura 4.1). Se tiene una tercera componente, que es la componente en eje 0. Esta se corresponde con la componente homopolar del sistema por lo que, en un sistema equilibrado, el valor de esta es nulo.

La ventaja de este sistema de referencia, es que se reduce el número de variables a tener en cuenta, pasando de 3 a 2.

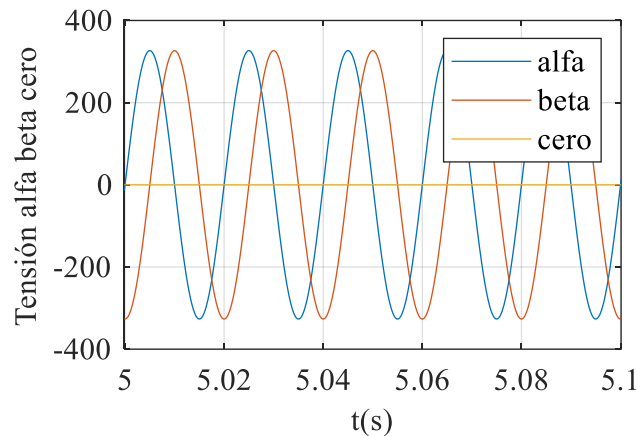


Figura 4.2.- Tensiones de un sistema trifásico referidas a los ejes  $\alpha\beta 0$ .

Finalmente, se tiene un tercer sistema de ejes de referencia, que es el sistema de ejes  $d$  y  $q$ , que se encuentran desfasados  $90^\circ$  al igual que los ejes  $\alpha$  y  $\beta$ , con la diferencia de que estos no son estacionarios. Estos ejes giran con una velocidad angular igual a la velocidad de giro de los fasores del sistema. Por tanto, en un sistema trifásico equilibrado e invariable en el tiempo como los que se estaban viendo hasta ahora, las componentes en ejes  $d$  y  $q$  serán constantes. La ventaja de este sistema es que se puede controlar una red por medio de dos parámetros constantes en el tiempo [6].

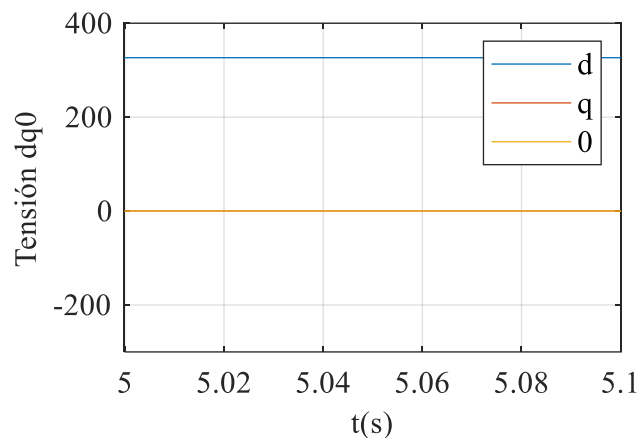


Figura 4.3.- Tensiones de un sistema trifásico referidas a los ejes

## 4.2.- TRANSFORMACIÓN DE CLARKE.

Esta transformación permite convertir unas señales referidas al sistema de referencia  $abc$  en señales referidas al sistema  $\alpha\beta 0$ . Las fórmulas para convertir las componentes  $abc$  (en este caso son las componentes de las tensiones) en componentes  $\alpha\beta 0$  son las siguientes:

$$V_{\alpha} = \frac{-2}{3} \times \left( -V_a \times \sin(\omega t) - V_b \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - V_c \times \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (4.1)$$

$$V_{\beta} = \frac{2}{3} \times \left( V_a \times \cos(\omega t) + V_b \times \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \times \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (4.2)$$

$$V_0 = \frac{2}{3} \times \left( \frac{V_a}{2} - \frac{V_b}{2} - \frac{V_c}{2} \right) \quad (4.3)$$

Siendo  $\omega t$  la fase en la que se encuentra el fasor de la tensión y que será calculada por medio de otra función [7].

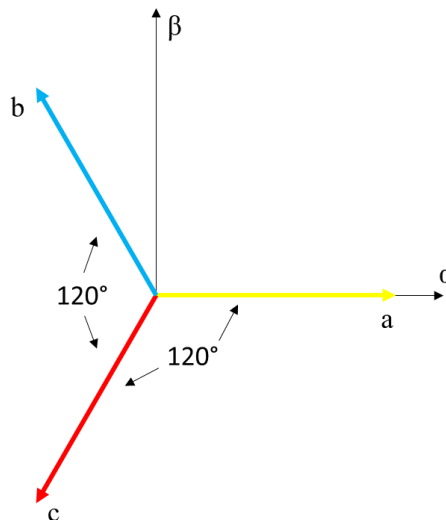


Figura 4.4.- Relación entre los ejes de referencia  $abc$  y  $\alpha\beta 0$ .

### 4.3.- TRANSFORMACIÓN DE PARK.

Esta es la otra transformación entre ejes de referencia que se usará en este proyecto. Con ella, se pueden convertir las componentes referidas a los ejes  $\alpha\beta 0$  en componentes referidas

a los ejes  $dq0$ , facilitando el control del sistema. Las fórmulas necesarias para realizar esta transformación (en este caso se estaría trabajando con las tensiones) son las siguientes:

$$V_d = V_\alpha \times \cos(\omega t) + V_\beta \times \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

$$V_q = V_\alpha \times (-\sin(\omega t)) + V_\beta \times \cos(\omega t) \quad (4.5)$$

$$V_0 = V_0 \quad (4.6)$$

Siendo  $\omega t$  la fase en la que se encuentra la señal con la que se trabaja y que será calculada por medio de otra función [7].

#### 4.4.- MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN.

Es necesaria la implementación de un sistema de sincronización en el sistema con el fin de obtener la frecuencia de la red, rechazando los posibles efectos de los armónicos en la estima de la misma y, al mismo tiempo, obtener la fase que se usará para las transformaciones al sistema de referencia  $dq0$ .

Se tienen dos modos diferentes de sincronización que dependerá del modo de funcionamiento del Smart Meter. En el modo de funcionamiento trifásico de seis sensores, habrá un sensor de tensión y un sensor de intensidad conectado a cada fase de la red, la cual será trifásica. En los modos de funcionamiento trifásico de dos sensores y monofásico, se tendrá un único sensor de tensión y un único sensor de intensidad conectados a la misma fase de la red, la cual podrá ser monofásica o trifásica.

El método de sincronización usado en el modo trifásico de seis sensores será el SRF-PLL [8]. Este método, también conocido como dq-PLL, puede ser utilizado tanto con las componentes  $\alpha\beta$  como con las componentes  $dq$ . En la figura 4.5 se muestra un diagrama de bloques en el que se describe su funcionamiento (trabajando con la medida de tensión) incluyendo los dos filtros Notch que se añaden para eliminar el 5º y 7º armónico de la medida de tensión.

No se tienen en cuenta los armónicos de diferentes órdenes. En el apartado 4.11 se explica esto de forma más detallada.



Figura 4.5.- Diagrama de bloques del SRF-PLL.

En el caso de los modos de funcionamiento monofásico y trifásico de dos sensores, se usará en primer lugar el SOGI-QSG. Este método es capaz de obtener una medida de la componente en eje  $\alpha$  y una medida de la componente en eje  $\beta$  a partir de una única señal referida al sistema de ejes  $abc$  y un valor de referencia de la velocidad angular. Estas variables  $\alpha$  y  $\beta$  serán las de la red real, en el caso de que se trabaje con una red eléctrica trifásica. Si se trabaja con una red monofásica, se debe tener en cuenta que esas variables corresponden a una red ficticia. Tras la obtención de las variables referidas a los ejes  $\alpha$  y  $\beta$ , se lleva a cabo el mismo procedimiento que en el modo monofásico de seis sensores, es decir, se lleva a cabo el SRF-PLL. Generar una red ficticia y trabajar sobre ella ofrece la ventaja de que permite usar las mismas herramientas software que para el caso de la implementación trifásica, con la consiguiente reducción de costes mencionada en el capítulo 2. En la figura 4.6 se puede ver un diagrama de bloques describiendo el funcionamiento del SOGI-QSG (trabajando con la medida de tensión en la fase  $a$ ). [9]

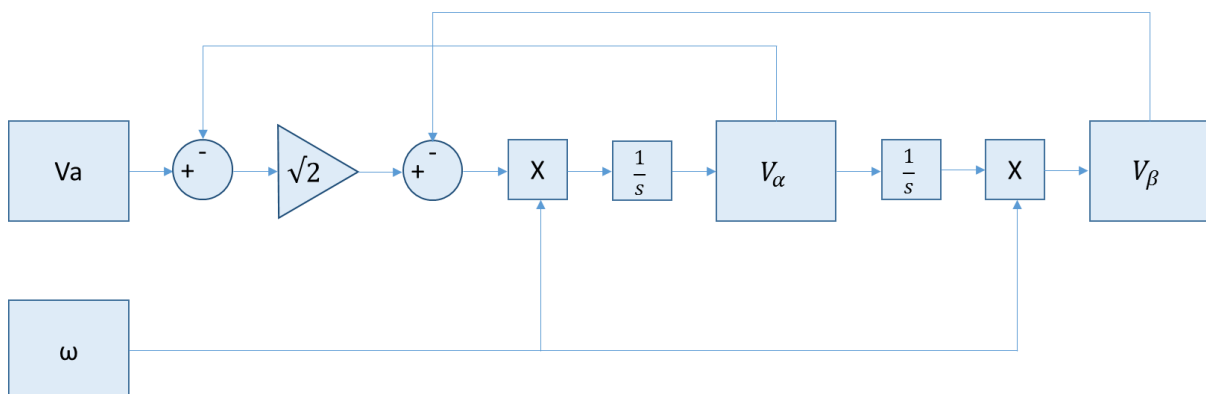


Figura 4.6.- Diagrama de bloques del SOGI-QSG para tensión.

#### 4.5.- CONTROLADOR PI.

Un controlador PI es un mecanismo de control en lazo cerrado que cuenta con dos parámetros a definir: la ganancia proporcional  $K_p$  y la ganancia integral  $K_i$ . En la figura 4.7 se puede ver un diagrama de bloques que describe el funcionamiento de este controlador.

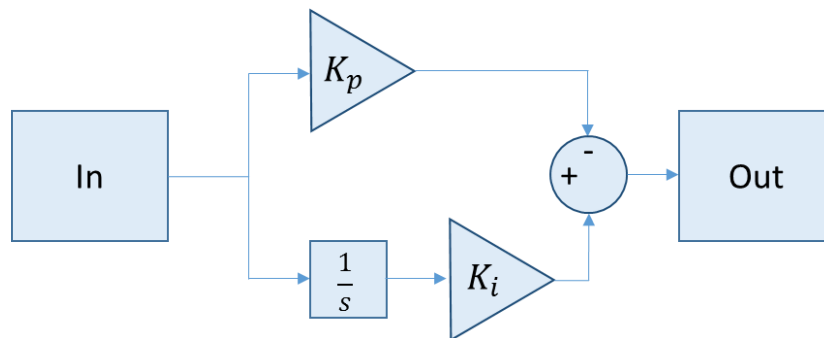


Figura 4.7.- Diagrama de bloques de un controlador PI.

Para este Smart Meter se escogieron los siguientes valores de  $K_p$  y  $K_i$ :  $K_p = 251,3274$  y  $K_i = 62,8319$ . A continuación se explicará brevemente cómo se eligieron estos valores.

Se parte de la función de transferencia en bucle abierto de la PLL, cuyo diagrama aparece en la figura 4.8:

$$FdTba = PI(s) \times \frac{1}{s} = K_p \times \left( \frac{s+K_i}{s^2} \right) \quad (4.7)$$

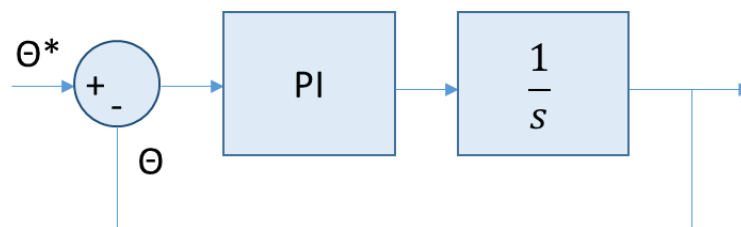


Figura 4.8.- Diagrama en lazo cerrado de la PLL.

En lazo cerrado la función sería:

$$\frac{FdTba}{1+FdTba} = \frac{K_p \times s + K_p \times K_i}{s^2 + K_p \times s + K_p \times K_i} \quad (4.8)$$

Tomando como referencia la función de transferencia genérica de segundo orden:

$$FdT = \frac{2 \times \xi \times \omega_n \times s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \times \xi \times \omega_n \times s + \omega_n^2} \quad (4.9)$$

Donde:

$\xi$  es el factor de amortiguamiento.

$\omega_n$  es la frecuencia natural no amortiguada.

Por semejanza se obtiene que:

$$K_p = 2 \times \xi \times \omega_n \quad (4.10)$$

$$K_p \times K_i = \omega_n^2 \quad (4.11)$$

Considerando un ancho de banda de 20 Hz y un coeficiente de amortiguamiento de 1:

$$\omega_n = 2 \times \pi \times 20 \quad (4.12)$$

$$\xi = 1 \quad (4.13)$$

Y despejando en (4.10) y (4.11) se obtiene:

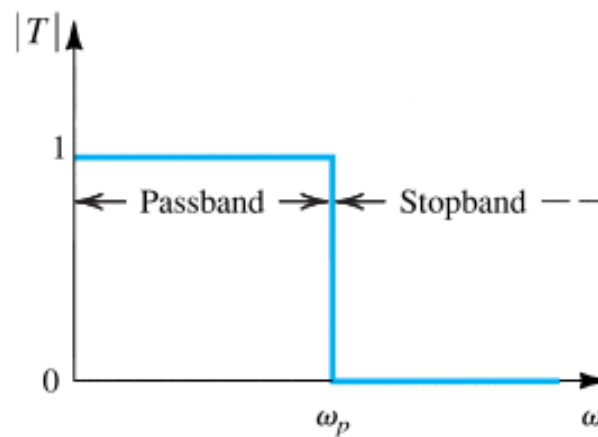
$$K_p = 251,3274 \quad (4.14)$$

$$K_i = 62,8319 \quad (4.15)$$

#### 4.6.- FILTRO PASO BAJO.



Un filtro paso bajo es un circuito que, en su funcionamiento ideal, realiza una selección, dejando pasar únicamente las ondas cuya frecuencia es menor que la frecuencia de corte del filtro. Cuenta con dos zonas: La conocida en inglés como *passband* y la conocida como *stopband*. La primera es la zona en la cual las señales idealmente tendrán una ganancia de 1. La segunda se corresponde con la zona en la cual las señales tendrán una ganancia ideal de 0. Esto se ve representado en la figura 4.9. En la realidad, un filtro suele atenuar incluso las frecuencias que están incluidas en la banda de frecuencias que deberían estar permitidas. Del mismo modo, no elimina completamente las frecuencias superiores a la frecuencia de corte del filtro. Este comportamiento real es el que aparece representado en la figura 4.10. [10]



(a) Low-pass (LP)

Figura 4.9.- Comportamiento ideal de un filtro paso bajo. Figura extraída de [10].

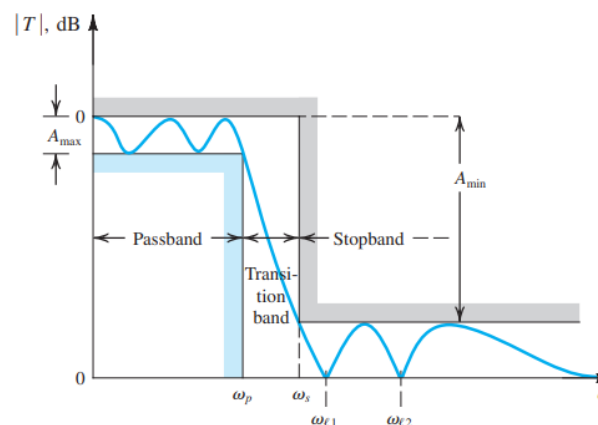


Figura 4.10.- Comportamiento real de un filtro paso bajo. Figura extraída de [10].



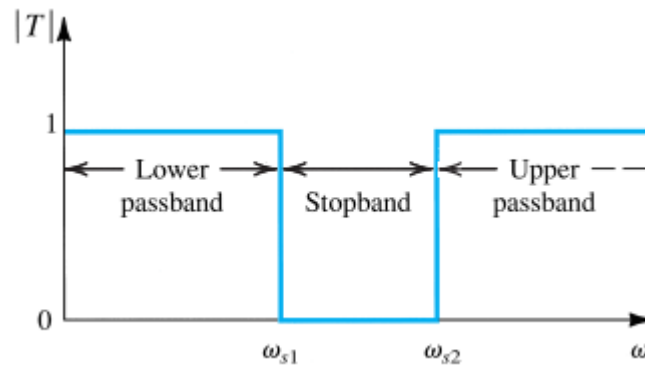


Figura 4.12.- Comportamiento ideal de un filtro Notch. Figura extraída de [10].

#### 4.9.- MEDIDA DE POTENCIA.

En todos los modos de funcionamiento se realiza la medida de potencia activa y reactiva instantáneas. Esta se realiza de dos formas diferentes, una para los modelos con medida en una fase, y otra para los modelos con medida en las tres fases.

En el modo de funcionamiento trifásico de seis sensores, se cuenta con la medida en las tres fases. Se cuenta con la tensión  $V_{abc}$  y con la intensidad  $I_{abc}$ . Por ello, la fórmula utilizada es la que parte de estas dos variables:

$$P + jQ = \frac{1}{2}(V_a \times I_a^* + V_b \times I_b^* + V_c \times I_c^*) \quad (4.16)$$

Donde:

P es la potencia activa instantánea.

Q es la potencia reactiva instantánea.

$V_n$  es la diferencia de potencial medida entre la fase n y la puesta a tierra.

$I_n^*$  es el conjugado de la intensidad que circula por la fase n.

Por otro lado, en los modos de funcionamiento monofásico y trifásico de dos sensores, se debe recordar que el método de sincronización usado dará como resultado  $V_\alpha$  y  $V_\beta$  (lo mismo es aplicable a las intensidades). Si además se tiene en cuenta que ya estaba definida una función que convertía las variables referidas a los ejes  $\alpha\beta$  en variables referidas a los ejes  $dq$ ,

se puede deducir que será más cómodo usar una fórmula diferente que calcule potencia activa y reactiva instantáneas a partir de las  $V_{dq}$  y  $I_{dq}$ :

$$P = \frac{3}{2} \times (V_d \times I_d + V_q \times I_q + 2 \times V_0 \times I_0) \quad (4.17)$$

$$Q = \frac{3}{2} \times (V_q \times I_d - V_d \times I_q) \quad (4.18)$$

Donde:

P es la potencia activa instantánea.

Q es la potencia reactiva instantánea.

$V_n$  es la diferencia de potencial medida entre la fase  $n$  y la puesta a tierra.

$I_n$  es la intensidad que circula por la fase  $n$ .

#### 4.10.- TRANSFORMACIÓN BILINEAL O MÉTODO DE TUSTIN.

Como se ha comentado con anterioridad, los datos captados por los sensores serán procesados por la Raspberry Pi Zero W. Este modelo de Raspberry cuenta con una CPU que presenta una frecuencia máxima de trabajo de 1 GHz. Este dato indica que, como máximo, podrá procesar 1.000.000.000 de datos por segundo. A partir de esta información se puede afirmar que la Raspberry no trabaja con señales continuas (en cuyo caso el número de entradas por segundo sería infinito), sino discretas. Y de esta afirmación surgen varias necesidades: por un lado, se debe muestrear la salida de los sensores antes de enviársela a la Raspberry Pi. Esto se hará por medio de un conversor ADC, concretamente el MCP3008 del que se hablará en el apartado 6.1.3. Por otro lado, el hecho de que se vaya a trabajar con señales discretas obliga a usar funciones que trabajen en el dominio discreto. Para transformar las funciones continuas en discretas se usará la transformación bilineal, conocida también como Método de Tustin.

En un primer momento, se había definido el conjunto de funciones que necesita el software. Estas funciones estaban definidas en el dominio continuo. Estaban, concretamente, definidas

en el dominio de Laplace, al que se denominará  $s$ . A través de esta transformación se podrán convertir las funciones al dominio discreto, al que se denominará  $z$ .

Para aplicar la transformación bilineal, únicamente se tendrá que realizar la siguiente sustitución:

$$s = \frac{2 \times (z-1)}{T \times (z+1)} \quad (4.19)$$

Donde:

$s$  es la variable de Laplace.

$z$  es la variable discreta.

$T$  es el tiempo de muestreo.

Como se ha mencionado anteriormente, se habían definido previamente las funciones que debía realizar el software. Dentro de este conjunto se encontraba una cierta variedad de funciones que incluía filtros paso banda, filtros paso bajo, integradores, controladores PI... A continuación se irán viendo las ecuaciones que quedan finalmente después de la aplicación de la transformación bilineal a cada una de estas funciones.

#### 4.10.1.- Controlador PI:

$$y(z_0) = y(z_{-1}) + K_p \times \left( x(z_0) \times \left( 1 + \frac{T}{2} \times K_i \right) + x(z_{-1}) \times \left( \left( \frac{T}{2} \times K_i \right) - 1 \right) \right) \quad (4.20)$$

Donde:

$x(z_0)$  es la última entrada a la función.

$x(z_{-1})$  es la penúltima entrada a la función.

$y(z_0)$  es la salida actual de la función.

$y(z_{-1})$  es la salida anterior de la función.

$K_p$  es la constante proporcional del controlador.

$K_i$  es la constante integral del controlador.

$T$  es el tiempo de muestreo.

#### 4.10.2.- Integrador:

$$y(z_0) = \frac{T}{2} \times (x(z_0) + x(z_{-1})) + y(z_{-1}) \quad (4.21)$$

Donde:

$x(z_0)$  es la última entrada a la función.

$x(z_{-1})$  es la penúltima entrada a la función.

$y(z_0)$  es la salida actual de la función.

$y(z_{-1})$  es la salida anterior de la función.

$T$  es el tiempo de muestreo.

#### 4.10.3.- Filtro paso bajo:

$$y(z_0) = \frac{a \times x(z_0) + b \times x(z_{-1}) + c \times x(z_{-2}) - d \times y(z_{-1}) - e \times y(z_{-2})}{4 + 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2} \quad (4.22)$$

Donde:

$$a = \omega_n^2 \times T^2$$

$$b = 2 \times \omega_n^2 \times T^2$$

$$c = \omega_n^2 \times T^2$$

$$d = -8 + 2 \times \omega_n^2 \times T^2$$

$$e = 4 - 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2$$

$x(z_0)$  es la última entrada a la función

$x(z_{-1})$  es la penúltima entrada a la función

$y(z_0)$  es la salida actual de la función

$y(z_{-1})$  es la salida anterior de la función

$T$  es el tiempo de muestreo

$\omega_n$  es la frecuencia natural del filtro

$\xi$  es el factor de amortiguamiento del filtro

#### 4.10.4.- Filtro paso alto:

$$y(z_0) = \frac{a \times x(z_0) + b \times x(z_{-1}) + c \times x(z_{-2}) - d \times y(z_{-1}) - e \times y(z_{-2})}{4 + 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2} \quad (4.23)$$

Donde:

$$a = 4$$

$$b = -8$$

$$c = 4$$

$$d = -8 + 2 \times \omega_n^2 \times T^2$$

$$e = 4 - 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2$$

$x(z_0)$  es la última entrada a la función.

$x(z_{-1})$  es la penúltima entrada a la función.

$y(z_0)$  es la salida actual de la función.

$y(z_{-1})$  es la salida anterior de la función.

$T$  es el tiempo de muestreo.

$\omega_n$  es la frecuencia natural del filtro.

$\xi$  es el factor de amortiguamiento del filtro.

#### 4.10.5.- Filtro Notch (rechazabanda):

$$H(z) = \frac{x(z_0) \times a + x(z_{-1}) \times b + x(z_{-2}) \times c - y(z_{-1}) \times d - y(z_{-2}) \times e}{4 + 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2} \quad (4.24)$$

Donde:

$$a = 4 + \omega_n^2 \times T^2$$

$$b = -8 + 2 \times \omega_n^2 \times T^2$$

$$c = 4 + \omega_n^2 \times T^2$$

$$d = -8 + 2 \times \omega_n^2 \times T^2$$

$$e = 4 - 4 \times \xi \times \omega_n \times T + \omega_n^2 \times T^2$$

$x(z_0)$  es la última entrada a la función.

$x(z_{-1})$  es la penúltima entrada a la función.

$y(z_0)$  es la salida actual de la función.

$y(z_{-1})$  es la salida anterior de la función.

$T$  es el tiempo de muestreo.

$\omega_n$  es la frecuencia natural del filtro.

$\xi$  es el factor de amortiguamiento del filtro.

## 4.11.- ARMÓNICOS EN LA RED

Los armónicos son ondas que pueden aparecer en la red y cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental (como se conoce a la frecuencia de la red). Estos aparecen en la red debido al consumo no lineal que realizan algunos aparatos electrónicos como ordenadores, inversores, o variadores de frecuencia de motores.

Los armónicos generados por unas instalaciones se transmiten hacia otras. Esto será en mayor o menor medida en función de la impedancia de la red (a mayor impedancia, mayor propagación de armónicos en la tensión). En ciertas ocasiones, se puede tener un problema con la excesiva presencia de armónicos en la red de un usuario debido a que se tenga una potencia de cortocircuito demasiado pequeña en el punto de conexión con la red (conviene recordar que es lo mismo hablar de baja potencia de cortocircuito que de alta impedancia). En otras ocasiones, el problema de la presencia de armónicos debido a una alta impedancia desde los puntos de generación hasta los equipos del usuario puede ser causado por una alta impedancia entre el punto de acometida y los equipos de ese usuario. Teniendo en cuenta que el Smart Meter estará instalado muy cerca del punto de acometida, únicamente se estará midiendo la presencia de armónicos en él. Sin embargo, se debe tener presente este hecho que puede ser importante en ciertas instalaciones.

Existen varios motivos por los que se debe intentar reducir todo lo posible la presencia de armónicos en la red: en primer lugar, deterioran la calidad de la onda de tensión, lo cual puede afectar a algunos equipos sensibles; generan sobrecarga en los cables (especialmente en el neutro) y transformadores; empeoran el factor de potencia, disminuyendo la capacidad de entregar potencia activa y obligando a sobredimensionar la instalación; pueden provocar sobrecalentamiento de bancos de condensadores e incluso pueden provocar el disparo de las protecciones en momentos en los que no deberían disparar.



Existen en el mundo diferentes normativas que limitan la máxima presencia de armónicos en la red, dos de las más representativas son la IEEE-519 y la IEC 61000. Es importante que los generadores de energía sean conocedores de estas normativas para asegurar su cumplimiento y comprobar que su instalación no está generando energía con demasiados armónicos que puedan dañar instalaciones cercanas. En el caso de los consumidores, estas normas ofrecen el valor máximo de presencia de armónicos de la red a la que conecten sus equipos, los cuales es posible que tengan una cierta tolerancia a los mismos. Asimismo, estos equipos pueden ser generadores de armónicos que se pueden transmitir aguas arriba de la red y pueden provocar daños en instalaciones adyacentes tales como disparo de protecciones o sobrecalentamientos excesivos de ciertos equipos. Por lo tanto, también para los consumidores es importante asegurarse de estar cumpliendo la normativa que aplique en esa instalación. [11]

TABLE 1  
VOLTAGE DISTORTION LIMITS ACCORDING  
TO IEEE 519-1992 STANDARD [11]

Bus voltage at PCC	Individual voltage distortion (%)	Total harmonic distortion (%)
< 69 kV	3.0	5.0
> 69 kV and < 161 kV	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

Figura 4.13.- Límites de armónicos en la tensión según la norma IEEE-519.

Odd harmonics non-multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3		Even harmonics	
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27 \cdot \frac{17}{h} - 0.27$	$21 < h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot \frac{10}{h} + 0.25$

NOTE: The corresponding compatibility level for the total harmonic distortion is THD = 8%.

Figura 4.14.- Límites de armónicos en la tensión según la norma IEC-61000.

A continuación se desarrollará el razonamiento teórico que explica por qué se pueden despreciar los armónicos de orden par:

En una instalación eléctrica, se tendrá una forma de onda simétrica, lo cual se puede escribir por medio de esta expresión:

$$f(\omega t + \pi) = -f(\omega t) \quad (4.25)$$

Si esta onda contase con la presencia de un armónico de segundo orden, se podría también escribir:

$$I(\omega t) = I_1 \times \sin(\omega t) + I_2 \times \sin(2\omega t) \quad (4.26)$$

y por tanto:

$$\begin{aligned} I(\omega t + \pi) &= I_1 \times \sin(\omega t + \pi) + I_2 \times \sin(2 \times (\omega t + \pi)) = \\ &= -I_1 \times \sin(\omega t) + I_2 \times \sin(2\omega t) \quad (4.27) \end{aligned}$$

Tomando (4.25):

$$f(\omega t + \pi) = -f(\omega t) \quad (4.28)$$

Lo cual demuestra que (4.26) y (4.27) deben ser iguales pero con distinto signo. Por lo tanto, la expresión (4.28) únicamente se cumplirá en el caso de que la amplitud del segundo armónico sea igual a cero.

Este razonamiento se puede aplicar a todos los armónicos de orden par. Por tanto, se puede concluir que no existirán en esta red armónicos de orden par.

Otro razonamiento a tener en cuenta es el siguiente. Si en una red trifásica se tienen armónicos de orden tres, su valor ha de ser el siguiente:

$$I_{r3} = I_3 \times \text{sen}(3 \times (\omega t)) \quad (4.28)$$

$$I_{s3} = I_3 \times \sin\left(3 \times \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) = I_3 \times \text{sen}(3\omega t - 2\pi) = I_{r3} \quad (4.29)$$

$$I_{t3} = I_3 \times \sin\left(3 \times \left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) = I_3 \times \text{sen}(3\omega t - 4\pi) = I_{r3} \quad (4.30)$$

Luego:

$$I_{r3} = I_{s3} = I_{t3} \quad (4.31)$$

Además, si no hay neutro:

$$I_{r3} + I_{s3} + I_{t3} = 0 \quad (4.32)$$

La ecuación 4.32 únicamente es compatible con la ecuación 4.31 si no hay tercer armónico en la instalación. Por lo tanto, teniendo en cuenta que se considera que el Smart Meter se conectará a instalaciones trifásicas sin neutro, también se puede considerar que no habrá tercer armónico en la misma [12].

Respecto a armónicos de orden impar superior a 7, se considera que su valor es despreciable. Por lo tanto, únicamente se tendrán en cuenta aquellos armónicos de orden 5 y 7. Otro dato a tener en cuenta es que el quinto armónico siempre es de secuencia negativa, o lo que es lo mismo, que su velocidad angular es -5 veces la de la magnitud fundamental.

#### 4.12.- SPI

Es un protocolo de comunicaciones de alta velocidad desarrollado por Motorola a mediados de la década de 1980, full-duplex (se pueden enviar y recibir datos al mismo tiempo), síncrono y que únicamente necesita cuatro pines para establecer la comunicación. Utiliza una

arquitectura maestro-esclavo, con un único maestro y uno o varios esclavos. Los cuatro pines que necesita son los siguientes:

- SCLK: Serial Clock.
- MOSI: Master Out Slave In. Salida del maestro y entrada del esclavo.
- MISO: Master In Slave Out. Entrada del maestro y salida del esclavo.
- SS: Slave Select. Selección de esclavo.

La señal del SCLK es generada por el maestro y usada para la sincronización entre maestro y esclavos.

El valor del SS será 1 en inicialmente, y cuando el maestro se quiera comunicar con un esclavo en concreto, cambiará el valor de esta señal a 0. Esto será el inicio de la comunicación y activará el reloj.

El maestro envía información al esclavo a través del pin MOSI y la recibe a través del pin MISO de forma simultánea, estableciendo así la comunicación full-duplex.

Con cada pulso del reloj, la información almacenada en los registros MISO y MOSI es enviada al otro dispositivo (al maestro en el caso del MISO y al esclavo en el caso del MOSI) bit a bit. Por tanto, para transmitir un paquete de 8 bits, se necesitarán 8 cambios de la señal del reloj (SCLK). [13] [14]

# **5.- Análisis de opciones y solución aportada en cuanto al proceso productivo.**

## **5.1.- SENSORES DE CORRIENTE.**

Existe en el mercado una amplia oferta de sensores de muy diversos tipos. Principalmente había dos grupos, que eran los sensores tipo pinza y los que tenían contacto directo con la instalación. Entre los que podían medir al menos 30 A (se descartaron los que no alcanzaban ese valor puesto que, teniendo en cuenta la potencia instalada en la mayoría de hogares españoles, era probable que no fuera suficiente ni siquiera para uso doméstico) se podía comprobar que no había grandes diferencias de precio entre ambos grupos y, teniendo en cuenta que para instalar los de tipo pinza no es necesario modificar la instalación existente, se optó por un sensor de tipo pinza. A continuación unos ejemplos de los sensores que se plantearon:

### **5.1.1.- ACS712**

Este sensor tiene una forma y modo de conexión muy similar al sensor de tensión que se eligió finalmente. Sin embargo, este sensor se descartó porque tenía un precio similar al que se escogió finalmente, pero no era capaz de medir una intensidad suficiente para un uso industrial del Smart Meter. Como factor extra, el hecho de que necesitase contacto directo con la instalación, a diferencia de un sensor tipo pinza, también hizo que se considerase preferible el SCT-013-000.

### **5.1.2.- SCT-013-030**

Este sensor pertenece a la familia del SCT-013-000 que se escogió finalmente. Tiene el mismo aspecto y forma de uso que el SCT-013-000 y, al igual que este, también tiene una frecuencia de muestreo de 20 kHz. Las principales diferencias residen en que este tiene capacidad para medir hasta 30 A, ofrece como salida una tensión proporcional a la que circula a través del sensor, y es un poco más barato.

### **5.1.3.- SCT-013-000**

Este fue finalmente el modelo de sensor de corriente elegido. Se eligió este modelo de sensor porque es el que mejores características globales reunía. Por un lado, tenía un precio reducido, facilidad de instalación, capacidad de medir hasta 100 A (lo cual permite su uso para instalaciones domésticas e industriales de hasta 23 kW monofásicos o 69 kW trifásicos), salida en intensidad y una frecuencia de muestreo de hasta 20 kHz.

## **5.2.- SENSORES DE TENSIÓN.**

En cuanto a los sensores de tensión, se encontró una menor variedad de sensores que fueran adecuados para este proyecto. El principal candidato frente al ZMPT101B que se escogió finalmente era el LEM DVC 1000-B.

### **5.2.1.- LEM DVC 1000-B**

Este sensor presenta unas muy buenas características. Es capaz de medir hasta 1000 V, lo cual es interesante porque permitiría, por ejemplo, medir tensión entre fases. Cuenta con una precisión del 1,7% y salida en tensión. El motivo que hizo que al final no fuera el escogido es que tiene un precio demasiado alto para un proyecto en el que se busca desarrollar un producto de bajo coste. Por lo tanto, pese a presentar peores características, se consideró que las del ZMPT101B eran suficientes y tenían un precio mucho más reducido.

### **5.2.2.- ZMPT101B**

Este es el sensor elegido finalmente. Permite medir tensiones de hasta 250 V, tiene salida en forma de tensión proporcional a la medida y un precio muy reducido en comparación con la otra opción planteada. Este sensor está diseñado para ser conectado a un Arduino, cuyas características de entrada son similares a las de la Raspberry Pi. Esto facilitará también la conexión entre el sensor y la Raspberry Pi, de lo cual se hablará en el apartado 6.1.

### **5.3.- PROCESADOR.**

Se barajaron diferentes opciones de dispositivos que quizás pudieran cumplir con esta tarea. Las principales opciones que se plantearon fueron los diferentes modelos de Raspberry Pi y de Arduino, por su bajo precio, facilidad de uso y abundancia de información sobre ellos en internet. Finalmente se eligió una Raspberry Pi Zero W.

El principal motivo para elegir entre Raspberry o Arduino fue el siguiente. Debido al número de cálculos que se necesitaba que el dispositivo llevase a cabo, y sobre todo debido a la necesidad de la inmediatez de los resultados (recuérdese que el objetivo del proyecto era poder ver en tiempo real los datos de los consumos y de la red a la que el usuario se está conectando) se descartó a la familia Arduino, más indicada para otro tipo de proyectos que para este, frente a la familia Raspberry, más indicada para proyectos en los que se requiere un cierto volumen de cálculos.

Dentro de la familia de Raspberry, aún quedaban varios modelos entre los que comparar pero, como se indicó al principio de este punto, finalmente se eligió el modelo Zero W por diferentes motivos. En primer lugar, tiene un tamaño aún más reducido que el del resto de modelos de la familia. Este punto no es algo imprescindible puesto que, en principio, no se va a instalar en lugares en los que exista un espacio muy limitado. No obstante, si entre las características del dispositivo se encuentra el que tenga un tamaño reducido, es un punto a favor.

Finalmente, este modelo está en el mercado a un precio bastante inferior al del resto de modelos (menos de la mitad) contando con un número de pines y capacidad de cálculo ampliamente suficientes para este proyecto.

## 6.-Instalación.

A continuación, se explicará el modo de instalación necesario para el correcto funcionamiento del Smart Meter.

### 6.1.- CONEXIÓN ENTRE SENSORES Y RASPBERRY PI.

Tal y como se mencionó anteriormente, el sensor de tensión proporciona una tensión proporcional a la tensión que está midiendo. En cambio, el sensor de intensidad proporciona una intensidad proporcional a la intensidad que está midiendo. En ambos casos la salida es un valor analógico, es decir, continuo.

Para que la Raspberry Pi pueda trabajar con las medidas de los sensores, debe recibir las señales de los mismos en forma de una tensión proporcional a las mismas. Además, debe recibirlas en forma digital, es decir, discretizadas. Para ello se usará un convertidor ADC, concretamente el modelo MCP3008. Finalmente, esa salida del MCP3008 en tensión discretizada debe enviarse a la Raspberry Pi realizando las conexiones necesarias para que se comuniquen utilizando el protocolo SPI. Se puede ver un esquema de las conexiones en la figura 6.1. Otro requisito adicional de las tensiones leídas por la Raspberry Pi es que su valor no puede ser negativo.

#### 6.1.1.- Sensor de intensidad

En primer lugar, se debe instalar el sensor de intensidad en la instalación. Esto es muy sencillo puesto que únicamente será necesario hacer pasar el cable de la acometida por el interior de la pinza del sensor y asegurarse de que esta está completamente cerrada.

Es importante tener en cuenta que el ADC admite tensiones de entrada que se encuentren en el rango  $[V_{SS} - V_{DD}]$  siendo  $V_{SS}$  la tensión a la que se conecte la tierra, y  $V_{DD}$  la tensión a la que se alimente el ADC. En este proyecto se considerará  $V_{SS} = 0 \text{ V}$  y  $V_{DD} = 5 \text{ V}$ .



Se conectará la salida del sensor a un circuito (figura 6.1) que provoque una tensión proporcional a la intensidad de salida del mismo y cuyo valor sea siempre no negativo. Para ello, se conectará el sensor a una resistencia ( $R_{\text{sensor}}$ ) que provoque una caída de tensión tal que, cuando el sensor mida la intensidad máxima admisible, es decir 100 A, esta tenga un valor de 2,5 V.

Se debe generar una tensión CC de 2,5 V que actúe como offset para conectar al extremo negativo del sensor de corriente. Para ello se conectarán en serie dos resistencias ( $R_{\text{offset}}$ ) entre un pin de 5 V de la Raspberry Pi y la tierra de la misma. Las resistencias deben ser de igual valor para que la tensión en el punto medio entre ellas sea de 2,5 V.

El lado positivo del sensor de intensidad se conectará a la entrada analógica del ADC. Por su parte, la tierra de la Raspberry Pi estará conectada con la tierra del ADC. Así, cuando el sensor mida 100 A, la diferencia de potencial entre la entrada analógica del ADC y la tierra del mismo será de 5 V, y cuando el sensor mida -100 A, la diferencia de potencial será de 0 V.

El valor de las resistencias  $R_{\text{offset}}$  es indiferente, puesto que al tener el mismo valor provocarán una caída de tensión de 2,5 V cada una. No obstante, con el fin de minimizar las pérdidas de energía por efecto Joule se intentará que tengan una resistencia alta, a fin de minimizar la intensidad. Recuérdese que:

$$P = I^2 \times R \quad (6.1)$$

En cuanto a la resistencia de  $R_{\text{sensor}}$ , se quiere que la caída de tensión sea de 2,5 V cuando se miden 100 A. Según la hoja de especificaciones, cuando el sensor mide 100 A, circulan por el secundario 50 mA. Aplicando la ley de Ohm:

$$V = I \times R \quad (6.2)$$

$$2,5 \text{ V} = 0,05 \text{ A} \times R \quad (6.3)$$

$$R = 50 \Omega \text{ (6.3)}$$

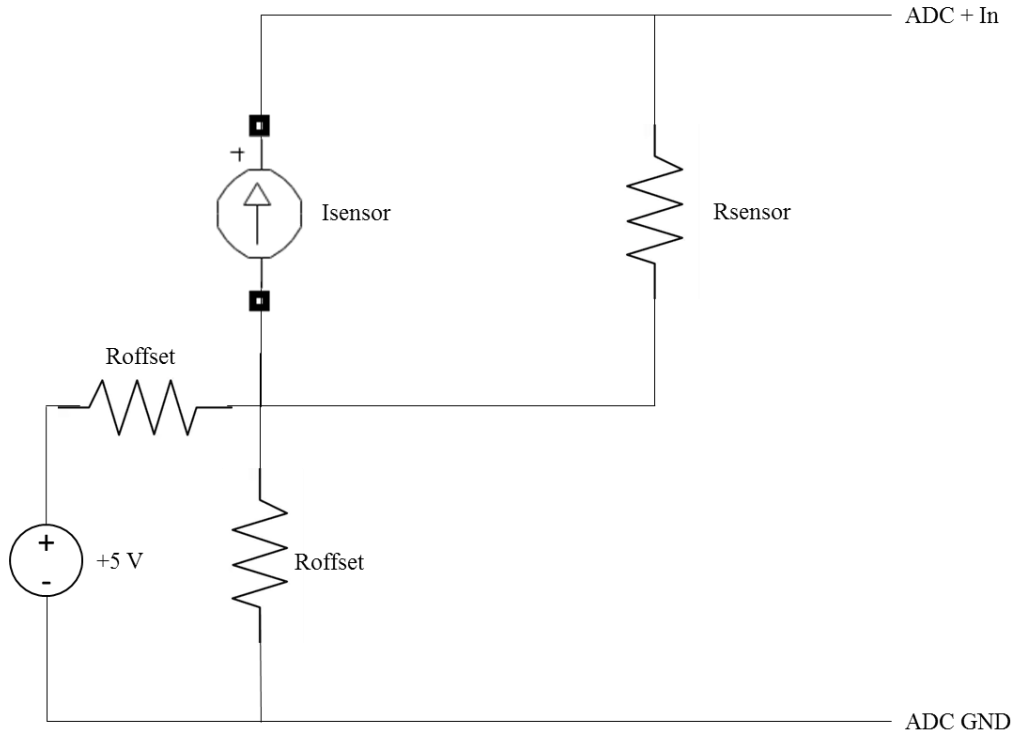


Figura 6.1.- Esquema de conexión sensor de corriente – ADC.

### 6.1.2.- Sensor de tensión

Paralelamente, el sensor de tensión se debe conectar al cable de acometida y proporcionará una tensión proporcional a la tensión que se esté midiendo. El esquema de conexión del sensor aparece en la figura 6.2.

Tal y como se puede ver en esa figura, se debe alimentar el sensor a través del pin  $V_{cc}$ , que en este caso se conectará a la alimentación de +5 V proveniente de la Raspberry Pi. Los pines  $Gnd$ , que corresponden a la tierra del sensor, también se conectarán a la tierra de la Raspberry Pi. El pin  $Out$  se conectará a la entrada analógica del ADC.



Figura 6.2.- Esquema de conexión del sensor de intensidad. Figura extraída de [15].

Se debe tener en cuenta que el sensor tiene en su interior un circuito en el que aparecen dos resistencias cuyo valor se debe regular para modificar la tensión de salida del sensor. Este circuito aparece en la figura 6.3.

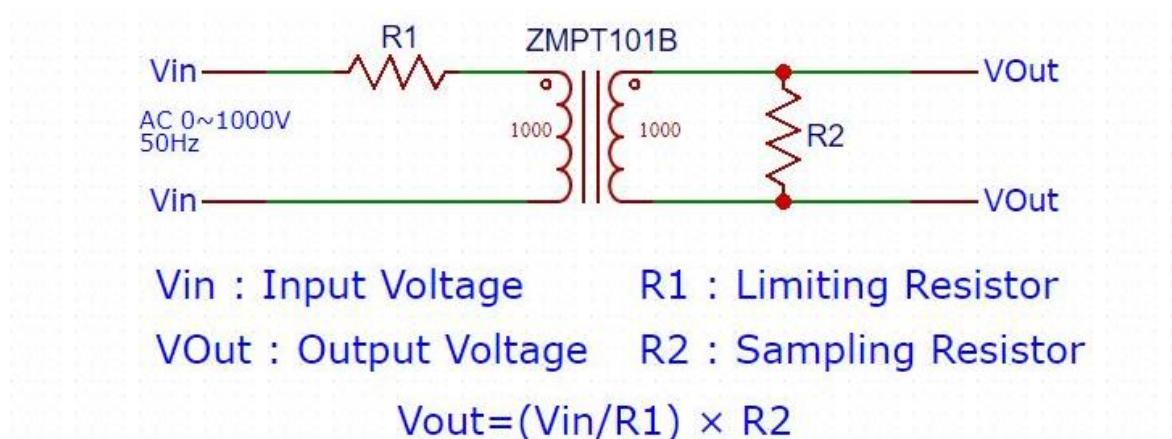


Figura 6.3.- Esquema de conexionado interno del sensor. Figura extraída de [16].

### 6.1.3.- ADC

A continuación, se procede a discretizar las señales. Para ello se haría un circuito como el mostrado en la figura 6.4. Se conecta la señal que se se quiere discretizar al pin 1 del convertidor ADC. Los pines 15 y 16 de los ADCs se conectan a una alimentación de 5 voltios proveniente de la Raspberry Pi, los pines 14 de los ADCs serán la tierra usada como referencia para las señales analógicas. Los pines 13 de los ADCs se conectan al pin GPIO 11 y se corresponderán con los pines SCLK, que se usarán para la sincronización del reloj

de la Raspberry Pi y de los ADCs. Los pines 12 de los ADCs se conectarán al pin GPIO 9 que se corresponde con el pin MISO de la Raspberry Pi, mientras que los pines 11 de los ADCs se conectarán al pin GPIO 10 que se corresponde con el pin MOSI de la Raspberry PI. Por su parte, el pin 10 de un ADC se conectará al pin GPIO 8 de la Raspberry Pi, mientras que el pin 10 de otro ADC se conectará al pin GPIO 7 de la misma. Estos pines GPIO 7 y 8 se corresponden con el pin SS (selector de esclavo).

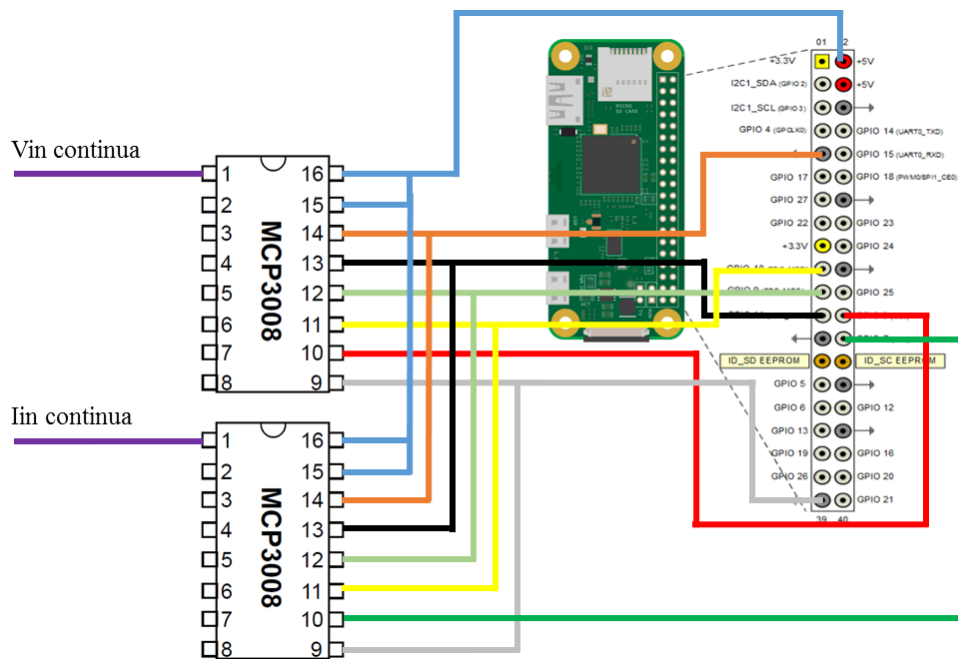


Figura 6.4.- Esquema de conexión de sensores – ADC – Raspberry Pi.

Para obtener los resultados obtenidos en el apartado 8.5 se usó únicamente el PicoScope como sensor de tensión, a partir del cual se estimó la intensidad. Por lo tanto sólo fue necesario un ADC. En las figuras 6.5 y 6.6 se pueden ver las conexiones realizadas para la conexión del prototipo.

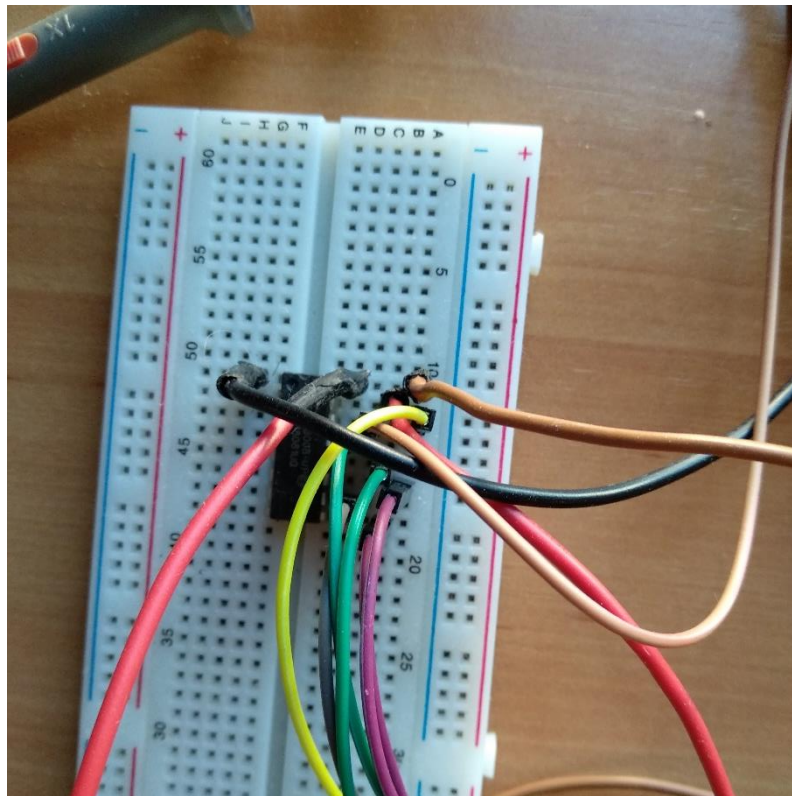


Figura 6.5.- Esquema de conexión de sensores – ADC – Raspberry Pi (prototipo).

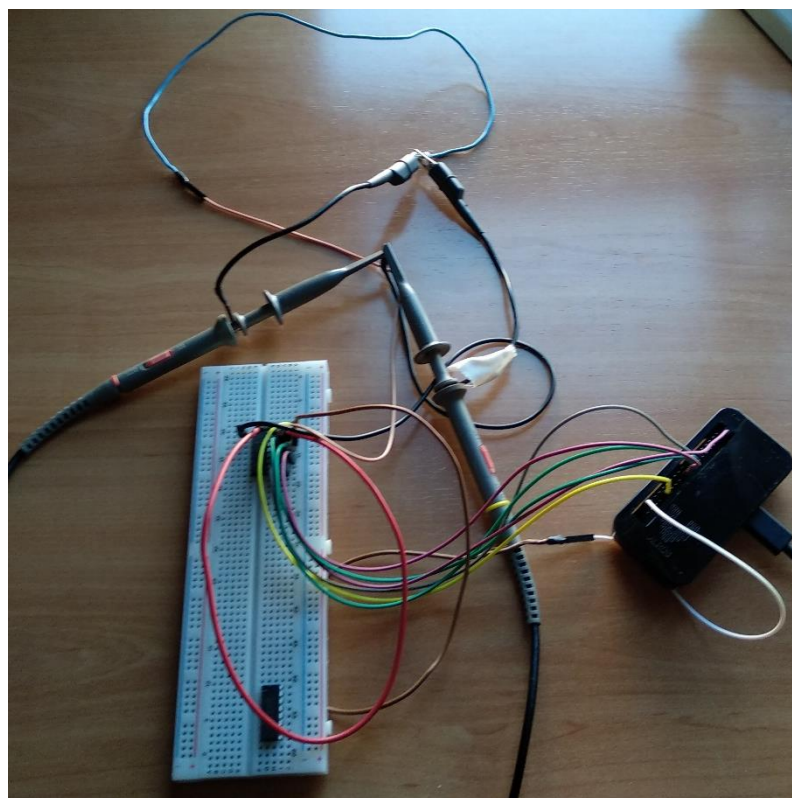


Figura 6.6.- Esquema de conexión de sensores – ADC – Raspberry Pi (prototipo).

En cuanto a la salida del ADC, se debe tener en cuenta que esta tiene 1024 valores posibles que van desde 0 hasta el valor al que se alimenta el ADC, en este caso 5 V. Por lo tanto, la salida tendrá el siguiente valor:

$$Salida = \frac{1024 \times V_{in}}{5V} \quad (6.4)$$

Siendo  $V_{in}$  la entrada analógica del ADC.

Por lo tanto, si  $V_{in}$  tiene un valor de 3 V, la Raspberry leerá:

$$\frac{1024 \times 3V}{5V} = 614,4 \quad (6.5)$$

### 6.3.- CONEXIÓN ENTRE RASPBERRY Y MATLAB.

La conexión entre Raspberry y Matlab se hizo por medio del módulo de Matlab *Simulink Support Package for Raspberry Pi*. Para ello se debe descargar el módulo desde el explorador de extensiones de Matlab.



Figura 6.7.- Módulo de Simulink para Raspberry Pi.

Una vez descargado, el usuario debe instalar en la tarjeta SD la imagen del módulo de Simulink. Para ello, es necesario entrar al módulo recién instalado en el ordenador, entrar en configuración, e ir siguiendo los pasos que se indican. En primer lugar, el usuario debe indicar el modelo de Raspberry Pi que se desea conectar, que en este caso es Raspberry Pi Zero W.



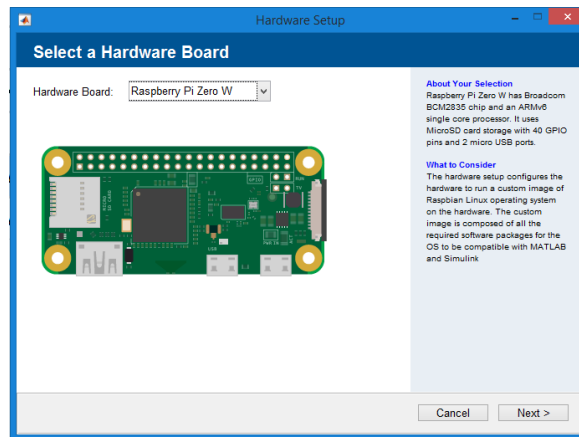
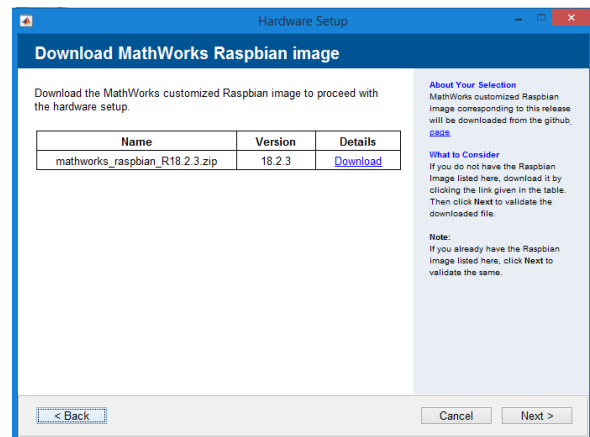
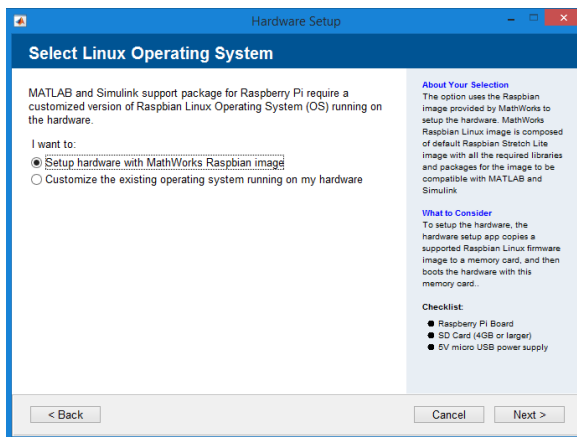


Figura 6.8.- Proceso de instalación de la imagen. Selección de modelo de Raspberry.

El usuario debe indicar que quiere configurar el hardware con una imagen de Raspbian para MATLAB y el programa le dará la opción de descargarla (paso que se podrá saltar si ya se tiene una imagen descargada con anterioridad). En cualquier caso, en el siguiente paso se pedirá validar la imagen que se tenga (ya sea recién descargada o descargada con anterioridad) para asegurar la correcta conexión con la Raspberry.



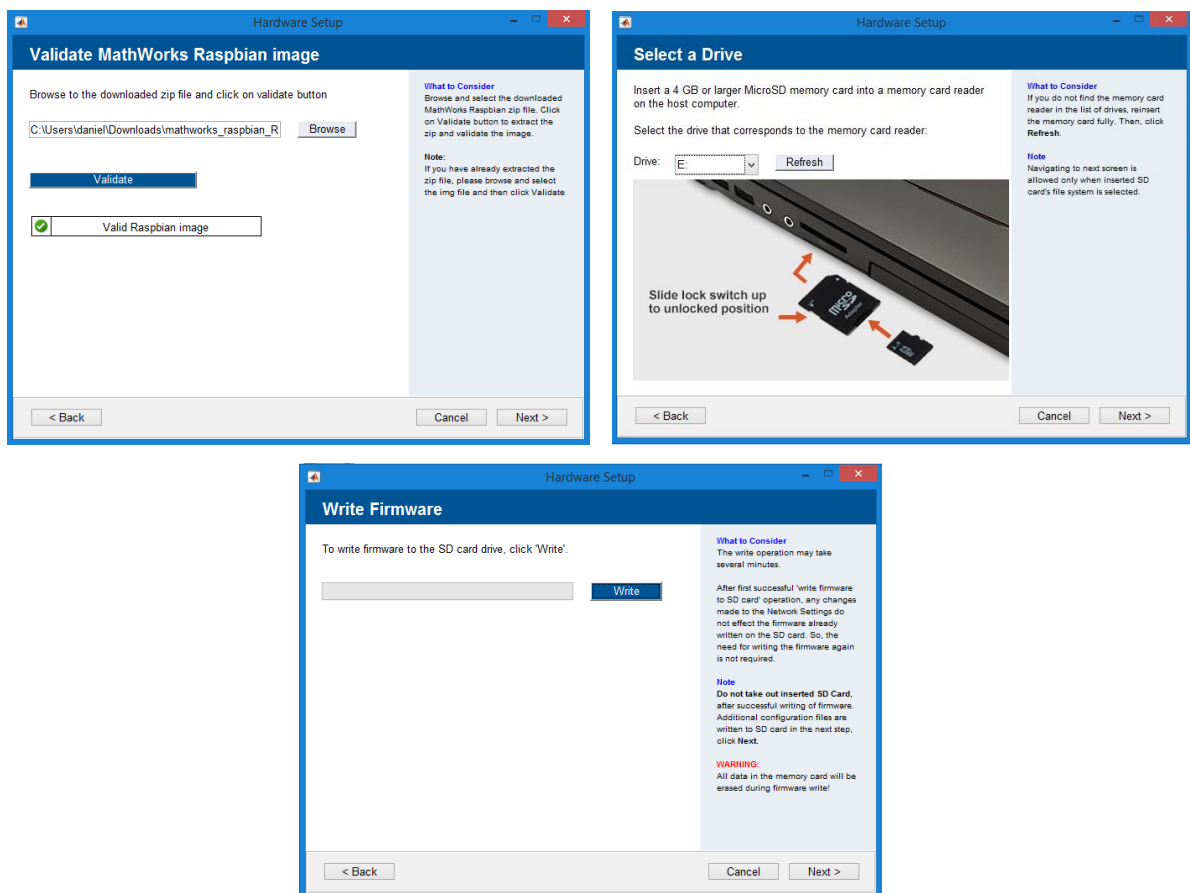


Figura 6.9.- Proceso de instalación de la imagen. Selección de imagen y de tarjeta.

El programa pedirá al usuario que seleccione la tarjeta en la que desea instalar la imagen y comenzará a instalarla.

Tras esto, será necesario extraer la tarjeta SD del ordenador e introducirla en la Raspberry. También se debe conectar la Raspberry con el ordenador a través del cable USB conectado en el puerto de transmisión de datos, tal y como se indica en la primera imagen de la figura 6.10.



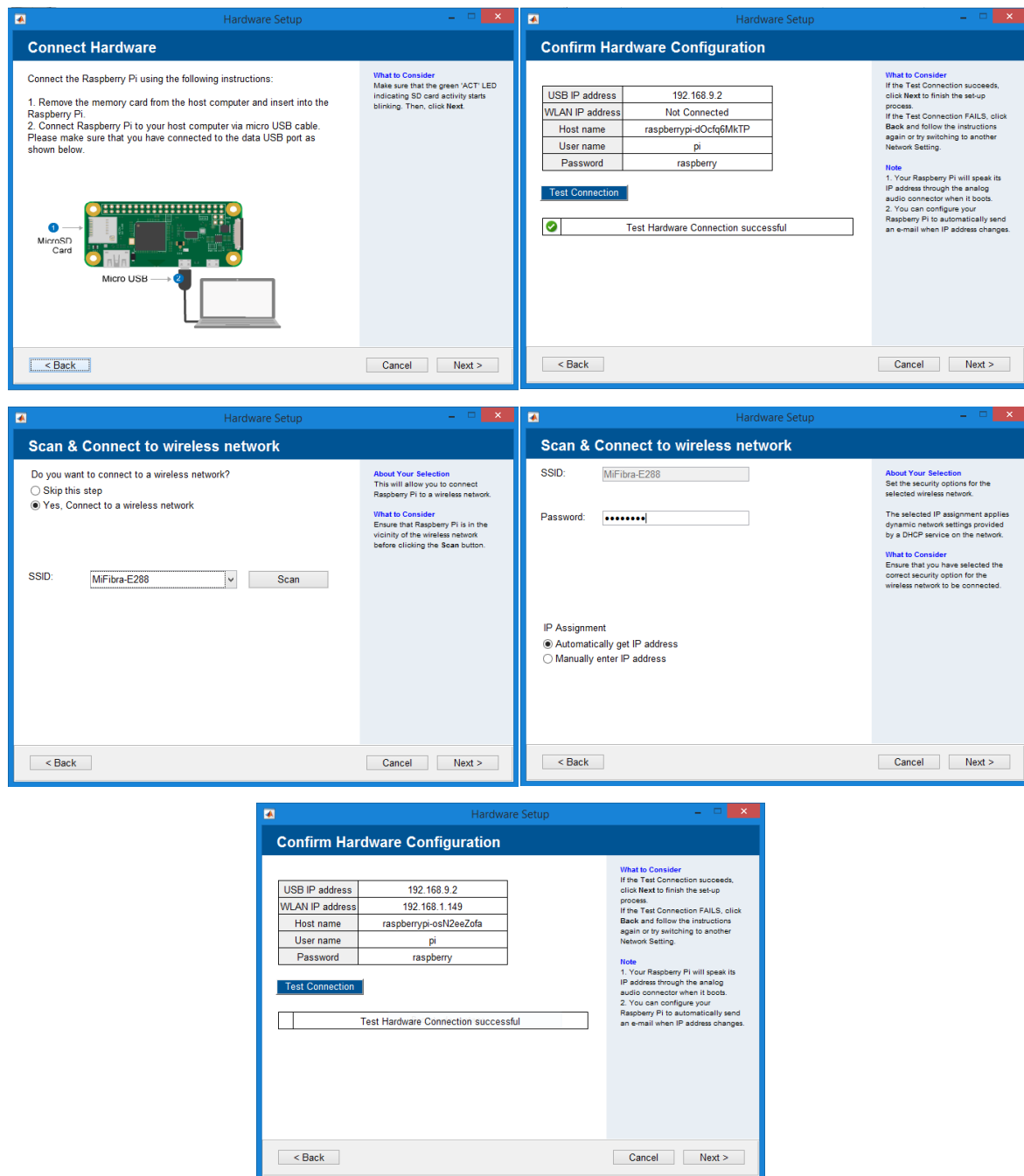


Figura 6.10.- Proceso de instalación de la imagen. Conexión.

Las dos direcciones IP que aparecen se corresponden con la dirección IP de la Raspberry cuando se conecta por medio de un cable USB y con la IP de la misma al conectarse mediante Wi-Fi. En el caso de que se desee realizar la conexión mediante Wi-Fi, este momento es el momento en el que se debe desenchufar el cable USB y conectar el cable de alimentación de la Raspberry Pi al puerto de alimentación de la misma.

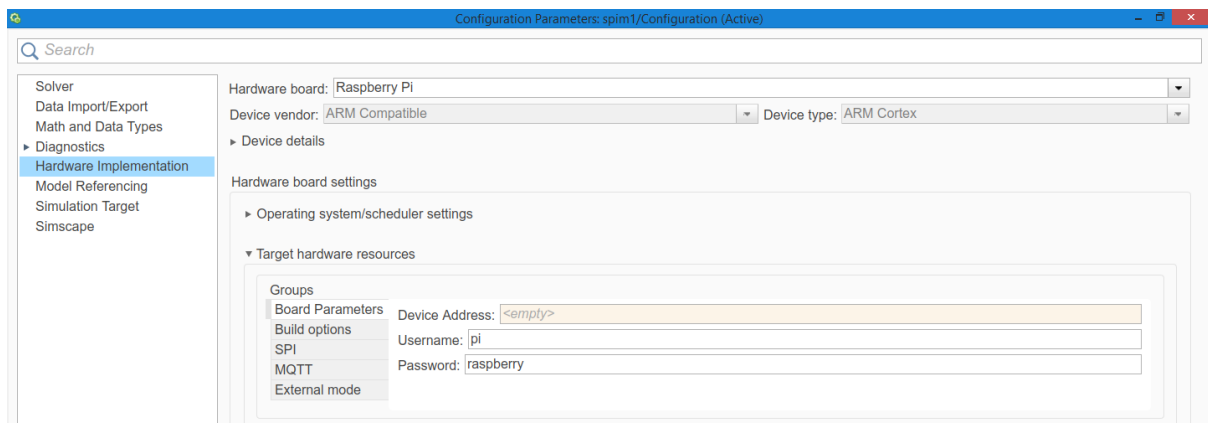


Figura 6.11.- Introducción de los parámetros de la Raspberry en Simulink.

En esta ventana aparece la casilla “*Device Address*”. En ella se debe introducir la dirección IP que corresponda al modo de conexión que se desee.

En este caso, se probó a realizar la conexión entre la Raspberry Pi y Matlab de las dos formas posibles: por Wi-Fi y a través de un cable USB. La conclusión es que, sin haber grandes diferencias de rendimiento entre un modo y otro, la conexión mediante cable ofrece un funcionamiento mejor, siendo capaz de realizar lecturas con una frecuencia algo superior que la que puede ofrecer la conexión por Wi-Fi.

## 7.- Código.

Como ya se mencionó anteriormente, se tendrán tres modos de operación del Smart Meter que se adaptarán al tipo de instalación a la que se conecte y al número de sensores de los que se disponga. Así, el usuario tendrá que indicar mediante algún tipo de hardware (conmutador o similares) al Smart Meter si se va a conectar a una red monofásica o trifásica, y si tendrá sensores de tensión e intensidad en una única fase, o si tendrá sensores en cada una de ellas. Esto provocará que el Smart Meter trabaje en un determinado modo de funcionamiento cuyo comportamiento será diferente.

Los parámetros de entrada al Smart Meter son:

- La medida de la tensión fase-tierra expresada en valores pico.
- La medida de la intensidad de fase. Expresada también en valores pico.
- Parámetros de los filtros, controladores PI, y tiempo de muestreo del sistema. Se introducen como entradas para mayor facilidad y rapidez de modificación de los mismos.

Los parámetros de salida del Smart Meter son:

- Estimación de la velocidad angular de la tensión del circuito eléctrico expresada en radianes/segundo. Se llamará  $\omega_1$ .
- Estimación de la magnitud de la componente fundamental de la tensión del circuito eléctrico. Medida en valor eficaz entre fase y tierra y expresada en voltios. Se llamará  $V_1$ .
- Estimación de la magnitud del quinto armónico de la tensión del circuito eléctrico. Medida en valor eficaz entre fase y tierra y expresada en voltios. Se llamará  $V_5$ .
- Estimación de la magnitud del séptimo armónico de la tensión del circuito eléctrico. Medida en valor eficaz entre fase y tierra y expresada en voltios. Se llamará  $V_7$ .
- Estimación de la potencia activa en valor eficaz que consume la instalación. Medida en vatios. Se llamará  $P$ .
- Estimación de la potencia reactiva en valor eficaz generada por el generador. Medida en voltamperios reactivos. Se llamará  $Q$ .

- Estimación del ángulo de la carga medido en grados centesimales. Se llamará *cosphi*.

Todas las medidas se expresan en valor eficaz y se hacen pasar por un filtro paso bajo que reduce la distorsión de las mismas.

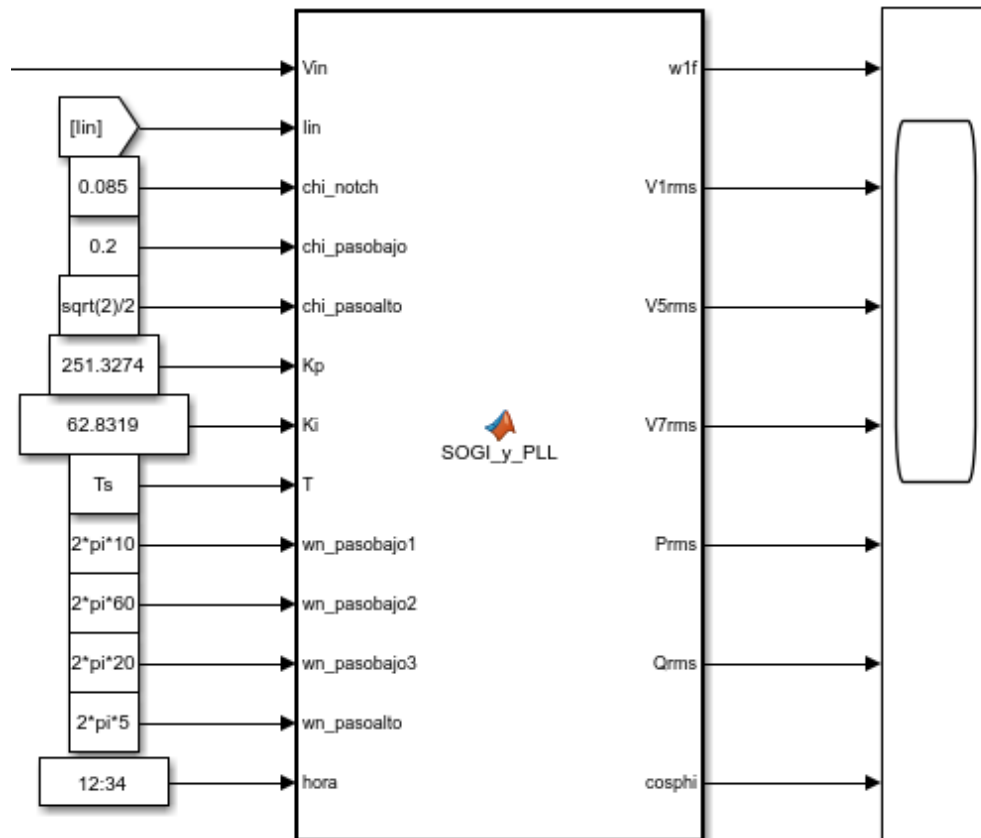


Figura 7.1.- Captura de la implementación del Smart Meter monofásico.

Según el modo de funcionamiento, el Smart Meter funcionará de forma diferente. El software contará con funciones cuya ejecución dependa de condicionales *if*. A continuación se explicará el código resultante en cada modo de funcionamiento.

## 7.1.- MODOS DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO DE DOS SENSORES

Estos dos modos de funcionamiento realizan las mismas operaciones, con la única diferencia de que las potencias activa y reactiva que se calculan en el modo monofásico son un tercio

de la que se calcularía en modo trifásico de dos sensores con mismas medidas en los sensores de tensión e intensidad.

- Se filtra la componente de CC de las medidas.
- Se eliminan los armónicos de la tensión con dos filtros Notch, como se indica en la figura 7.2.
- Se realizan los SOGI-QSG de tensión filtrada y sin filtrar y de la corriente para calcular  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $I_\alpha$  y  $I_\beta$ .
- Se lleva a cabo la PLL. De aquí se toman los resultados de  $V_1$  y  $\omega_1$ .
- Mediante filtros Notch, se crean dos variables de las cuales se eliminan la componente fundamental de la tensión y el armónico contrario al que se va a calcular a partir de esa variable.
- Se lleva a cabo un SOGI-QSG para calcular  $V_\alpha$  y  $V_\beta$  de cada armónico, a partir de los cuales se calcularán  $V_5$  y  $V_7$ .
- A partir de  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $I_\alpha$  y  $I_\beta$  sin filtrar, se calculan las tensiones e intensidades referidas a los ejes  $dq$ , con las que se calcula la potencia que consume la red trifásica imaginaria (en el modo de funcionamiento monofásico) o real (en el modo de funcionamiento trifásico de dos sensores). En caso de estar en modo de funcionamiento monofásico, se dividen P y Q entre 3.

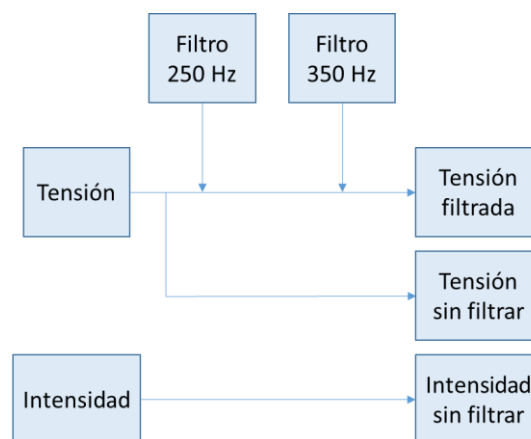


Figura 7.2.- Filtros Notch a la entrada de los SOGI-QSG.

## 7.2.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSO-RES

- Se filtra la componente de CC de las medidas.
- Se eliminan los armónicos mediante filtros Notch.
- Se lleva a cabo la PLL. De aquí se toman los cálculos de  $V_1$  y  $\omega_1$ .
- Se calculan el quinto y séptimo armónico. Para ello, se transforman las medidas de tensión referidas a los ejes  $abc$  en medidas referidas a los ejes  $dq0$  rotando a  $-5$  y  $7$  veces  $\omega_1$ . Así, mediante un filtro paso bajo se eliminan la tensión fundamental y el otro armónico. De aquí se toman  $V_5$  y  $V_7$ .
- Se calculan P y Q a partir de  $V_{abc}$  y  $I_{abc}$ .

## 8.- Análisis de resultados.

A continuación, se llevarán a cabo una serie de simulaciones utilizando el software MATLAB y, más concretamente, su entorno Simulink. Con estas simulaciones se comprobará el comportamiento del Smart Meter en los modos de funcionamiento trifásico de seis sensores y monofásico. Se considera que la comprobación del modo monofásico es suficiente para validar el modo trifásico de dos sensores por su extrema similitud.

### 8.1.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSO-RES CON SEÑAL GENERADA DESDE MATLAB.

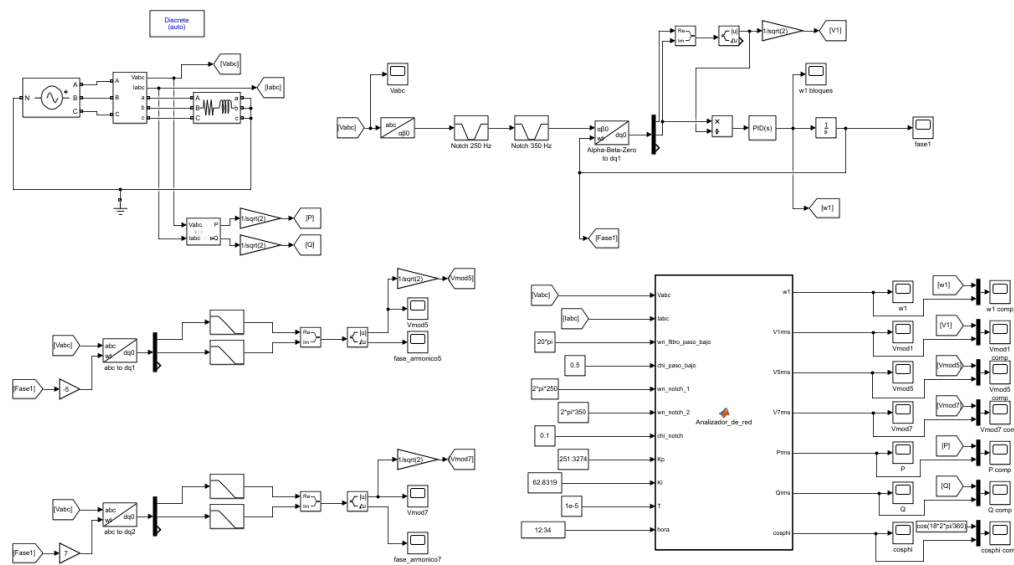


Figura 8.1.- Modelo general del modo trifásico de seis sensores en Simulink. Señal a partir de MATLAB.

Se crea un modelo de Simulink en el que se representa el funcionamiento del Smart Meter trabajando en modo trifásico de seis sensores y con una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

#### 8.1.1.- Circuito eléctrico.

Tipo de circuito: Este circuito eléctrico será un circuito eléctrico trifásico con una conexión estrella-estrella. En la figura 8.2 se puede ver un esquema del mismo.

Fuente de tensión: Se tendrá una fuente de tensión trifásica que genera una tensión de línea de 400 V en valor eficaz. Tendrá una frecuencia de 50 Hz.

Inyección de armónicos: La fuente de tensión inyectará dos armónicos. Estos serán el quinto y el séptimo armónico. El quinto armónico, por el hecho de serlo, tendrá una frecuencia de 250 Hz, será de secuencia negativa, y tendrá una amplitud del 10% de la amplitud de la componente fundamental, es decir 40 V de valor eficaz para la tensión de línea.

Por otra parte, el séptimo armónico, también por el hecho de serlo, tendrá una frecuencia de 350 Hz. Este armónico será de secuencia positiva y tendrá una amplitud del 5% de la amplitud de la componente fundamental, es decir 20 V de valor eficaz para la tensión de línea. De este circuito se tomarán las medidas que luego el Smart Meter utilizará para realizar los cálculos.

En la tabla 8.1 se puede ver una tabla resumen de los datos de la fuente de tensión, tanto en magnitud fundamental, como de la inyección de armónicos por parte de la misma.

A esta fuente de tensión, estará conectada una impedancia trifásica de  $47.552825 \Omega$  y  $0.04918158 \text{ H}$ , es decir una impedancia cuyo módulo son  $50 \Omega$  y  $18^\circ$ . Esta estará conectada en estrella, con el centro de la misma puesta a tierra.



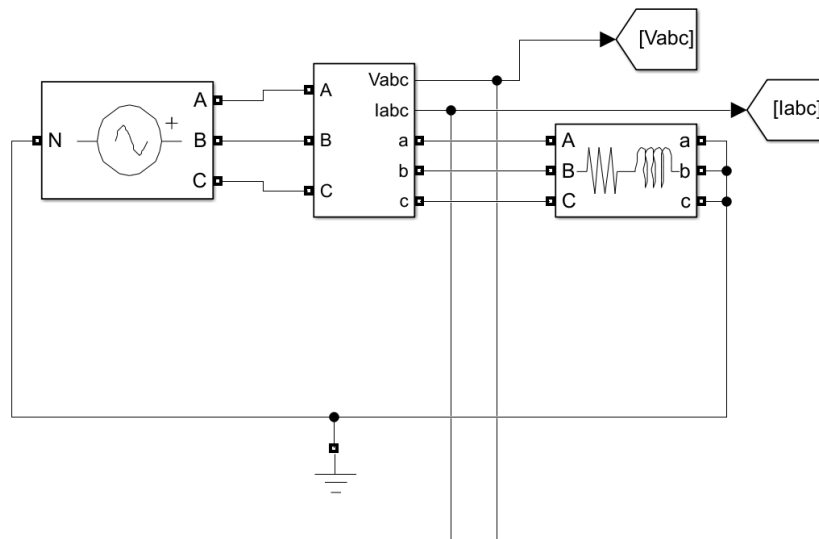


Figura 8.2.- Circuito eléctrico del modelo.

Datos del generador			
Magnitud fundamental		Magnitud armónicos	
Amplitud ( $V_{RMS}$ fase-fase) (V)	400	5° armónico ( $V_{RMS}$ fase-fase) (V)	40
Frecuencia (Hz)	50	7° armónico ( $V_{RMS}$ fase-fase) (V)	20

Tabla 8.1.- Datos del generador.

A continuación, se procederá a analizar los resultados obtenidos en este escenario. Se comprobará gráficamente el comportamiento del Smart Meter comparando los resultados arrojados por el mismo con los arrojados por un modelo que realizará los mismos cálculos en el dominio continuo y que estará implementado con bloques de MATLAB. Por supuesto, se tendrán también los valores de la tabla 8.1 como referencia.

### 8.1.2.- Resultados.

Es necesario mencionar que los datos reflejados en las gráficas de las tensiones corresponden a valores eficaces de tensión fase – tierra.

En primer lugar, se tiene la medida de la velocidad angular de la componente fundamental, que se denominará  $\omega_1$ . Se estaba generando en el circuito eléctrico una señal de 50 Hz, por lo que  $\omega_1$  debería ser igual a  $2 \times \pi \times 50 \left( \frac{rad}{s} \right)$ , es decir, aproximadamente  $314 \frac{rad}{s}$ . En la

figura 8.3 y en el zoom de la misma que aparece en la figura 8.4, se puede apreciar que se consigue una medida suficientemente precisa, muy similar a la que se consigue con los bloques de Matlab, y que alcanza el régimen permanente en un tiempo muy reducido.

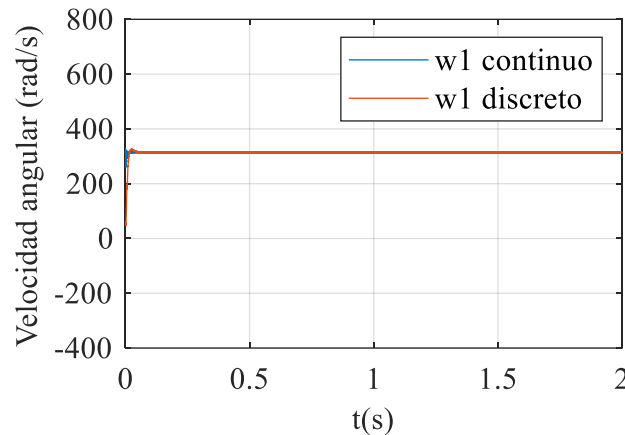


Figura 8.3.- Velocidad angular calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

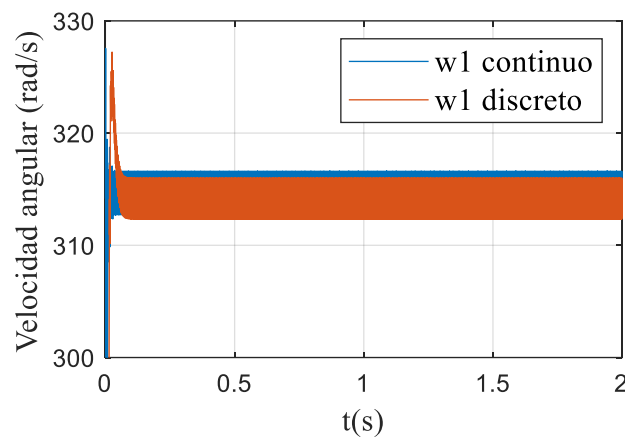


Figura 8.4.- Zoom de la velocidad angular calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

En el caso de la magnitud fundamental de la tensión, en la figura 8.5 se puede ver que se alcanza el régimen permanente aún más rápido que en el caso de la velocidad angular. Las medidas obtenidas por ambos modelos son muy similares y se acercan mucho al valor real de la magnitud fundamental y que, expresado en valor eficaz de tensión fase – tierra tiene un valor de  $\frac{400}{\sqrt{3}} \sim 230$  V.

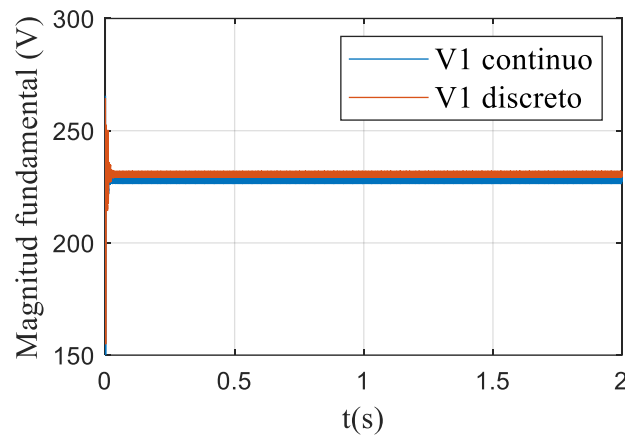


Figura 8.5.- Magnitud fundamental de la tensión calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

En cuanto a la medida del quinto armónico, que se puede ver en la figura 8.6, se vuelven a tener gráficas muy similares en la medida obtenida por ambos modelos, tanto en los valores alcanzados en régimen permanente, como en el tiempo necesario para alcanzarlo, como en los valores tomados durante el transitorio. El valor real del quinto armónico es  $\frac{400}{\sqrt{3}} \times 0,1 \sim 23$  V de tensión fase – tierra en valor eficaz, por lo que la medida obtenida es suficientemente precisa.

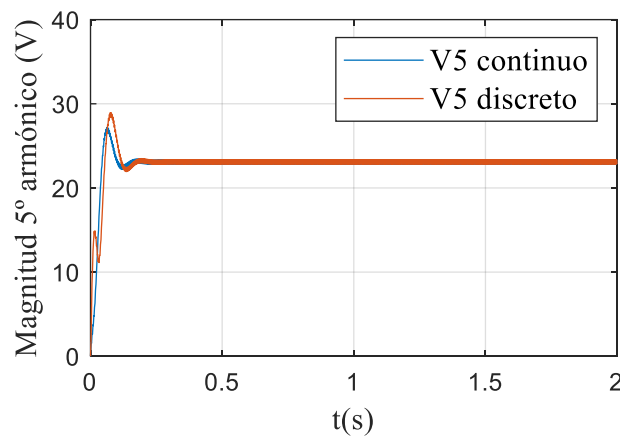


Figura 8.6.- Magnitud del quinto armónico de la tensión calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

Por su parte, en el cálculo del séptimo armónico que aparece en la figura 8.7, se pueden ver mayores diferencias en los transitorios. No obstante, el valor alcanzado en régimen permanente es muy similar en ambos casos. Teniendo en cuenta que el valor real del séptimo armónico es  $\frac{400}{\sqrt{3}} \times 0,05 \sim 11,5$  V de tensión fase – tierra en valor eficaz, también se puede dar por válida esta medida.

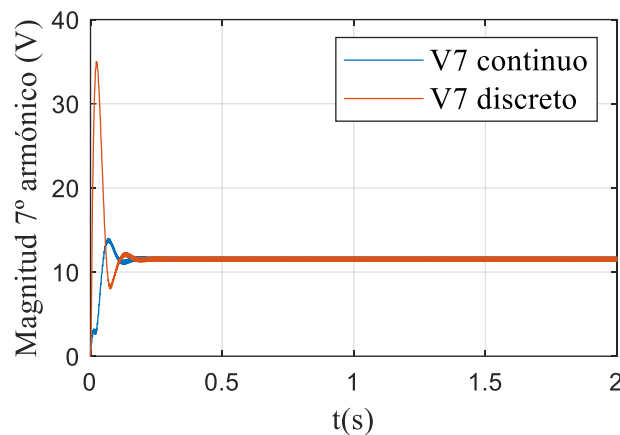


Figura 8.7.- Magnitud del séptimo armónico de la tensión calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

Las medidas de potencias activa y reactiva arrojadas por ambos modelos y que aparecen en las figuras 8.8 y 8.9 tienen un valor similar en régimen permanente. No obstante, en las gráficas se pueden apreciar bastantes más oscilaciones en los resultados del modelo del dominio continuo debido a que en el Smart Meter se aplica un filtro paso bajo a las medidas de la potencia para obtener un resultado más estable.

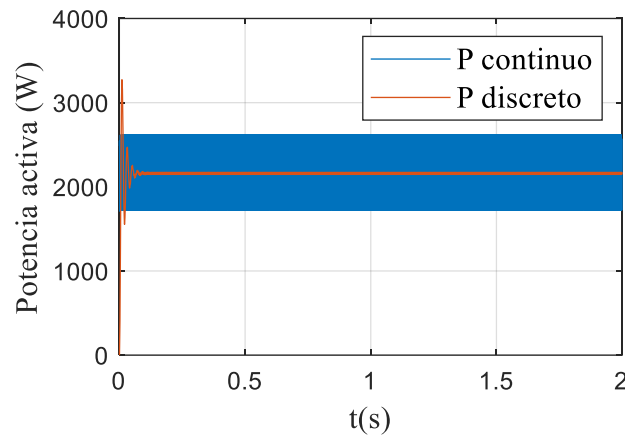


Figura 8.8.- Magnitud de la potencia activa calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

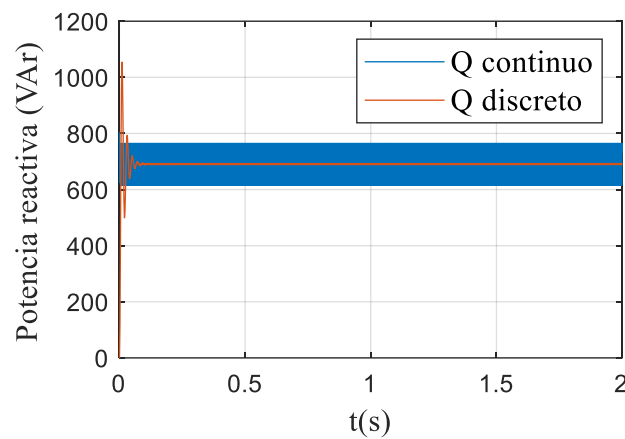


Figura 8.9.- Magnitud de la potencia reactiva calculada por los modelos del dominio continuo y discreto.

En la figura 8.10 se compara la medida del coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter con el dato real, que sería  $\cos(18^\circ) \sim 0,951$ . El Smart meter alcanza ese valor de forma rápida y precisa.

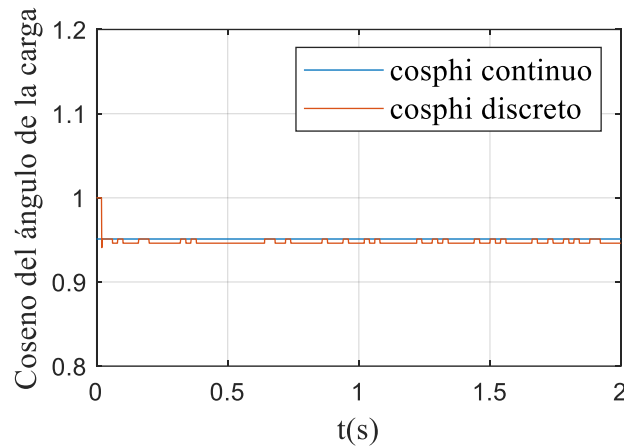


Figura 8.10.- Coseno del ángulo de la carga calculado por los modelos del dominio continuo y discreto.

## 8.2.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA DESDE MATLAB.

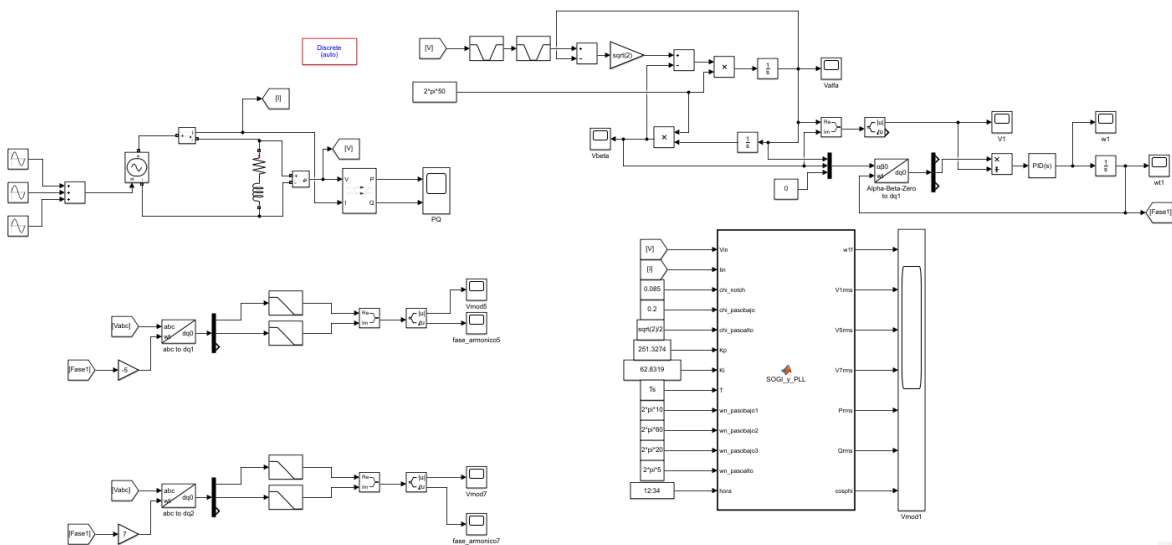


Figura 8.11.- Modelo general del modo monofásico en Simulink. Señal a partir de MATLAB.

En este caso se tendrá un circuito monofásico y se tomarán medidas con el Smart Meter en el modo de funcionamiento monofásico. De nuevo se tendrá una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

### 8.2.1.- Circuito eléctrico.

Tipo de circuito: Este circuito eléctrico será un circuito eléctrico monofásico. En la figura 8.12 se puede ver un esquema del mismo.

Fuente de tensión: Se tendrá una fuente de tensión monofásica que genera una tensión de línea de 230 V en valor eficaz. Tendrá una frecuencia de 50 Hz.

Inyección de armónicos: La fuente de tensión inyectará dos armónicos de igual orden y magnitud que los del circuito trifásico, es decir, inyectará el quinto y el séptimo armónico con una amplitud del 10% y del 5% respectivamente de la amplitud de la tensión de la componente fundamental.

En la tabla 8.2 se puede ver una tabla resumen de los datos de la fuente de tensión, tanto en magnitud fundamental, como de la inyección de armónicos por parte de la misma.

A esta fuente de tensión, estará conectada una impedancia de  $47.552825 \Omega$  y  $0.04918158 \text{ H}$ , es decir una impedancia cuyo módulo son  $50 \Omega$  y su ángulo es de  $18^\circ$ .

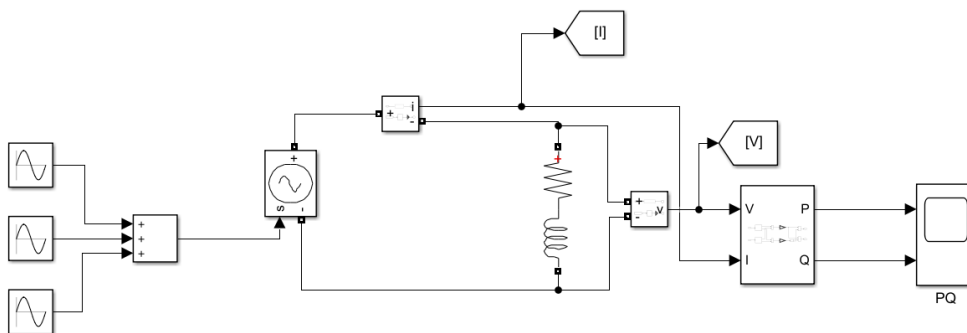


Figura 8.12.- Circuito eléctrico del modelo.

Datos del generador			
Magnitud fundamental		Magnitud armónicos	
Amplitud ( $V_{RMS}$ fase – tierra) (V)	230	5º armónico ( $V_{RMS}$ fase - tierra) (V)	23
Frecuencia (Hz)	50	7º armónico ( $V_{RMS}$ fase - tierra) (V)	11,5

Tabla 8.2.- Datos del generador.

A continuación, se procederá a analizar los resultados obtenidos en este escenario. Se comprobará gráficamente el comportamiento del modelo del dominio discreto, es decir el Smart Meter, tomando como referencia los datos de la tabla 8.2.

### 8.2.2.- Resultados.

En este caso en las gráficas ya no se compararán los resultados obtenidos por el Smart Meter con los resultados obtenidos por el modelo que trabaja en el dominio continuo, sino que por simplicidad únicamente se compararán con los datos reales del circuito eléctrico.

Al igual que el circuito trifásico, este circuito trabaja con una velocidad angular de  $2 \times \pi \times 50 \sim 314 \text{ rad/s}$ . El Smart Meter alcanza este valor de forma precisa, en un tiempo muy reducido, y con muy poco ruido ni oscilaciones. Se puede ver en las figuras 8.13 y 8.14.

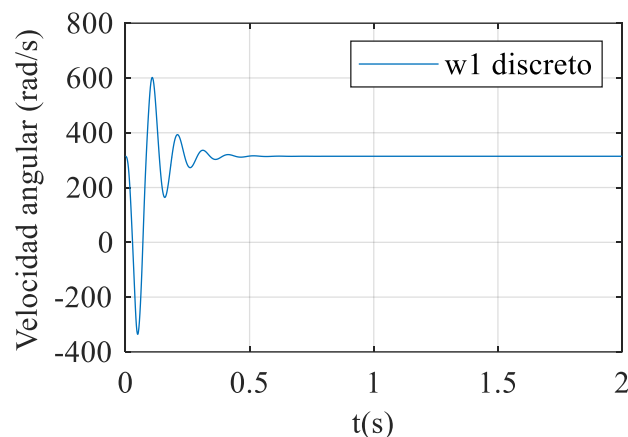


Figura 8.13.- Velocidad angular calculada por el Smart Meter.



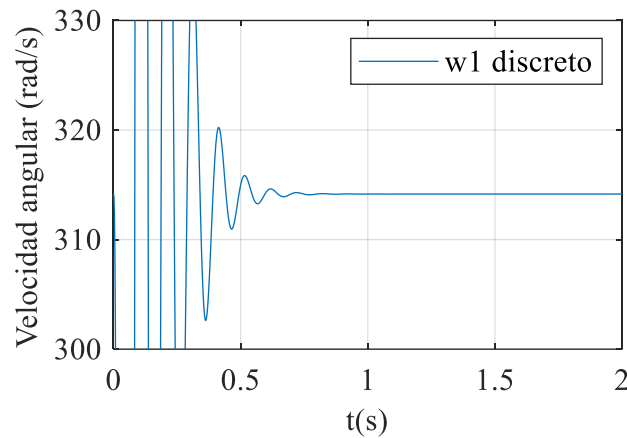


Figura 8.14.- Zoom de la velocidad angular calculada por el Smart Meter.

En el caso de la medida de la magnitud fundamental de la tensión del circuito, durante el transitorio se alcanzan valores muy altos, tras los cuales se alcanza el régimen permanente en un tiempo de alrededor de 0,5 segundos. El valor alcanzado se puede ver en la figura 8.15 y en su zoom en la figura 8.16. Es un valor muy cercano al real, que son 230 V en valor eficaz. Por lo tanto, se puede dar por válido el cálculo de este parámetro pese a los grandes valores alcanzados durante los transitorios.

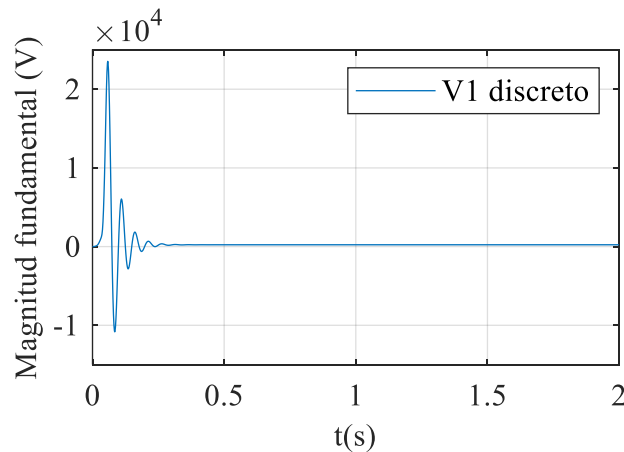


Figura 8.15.- Magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.

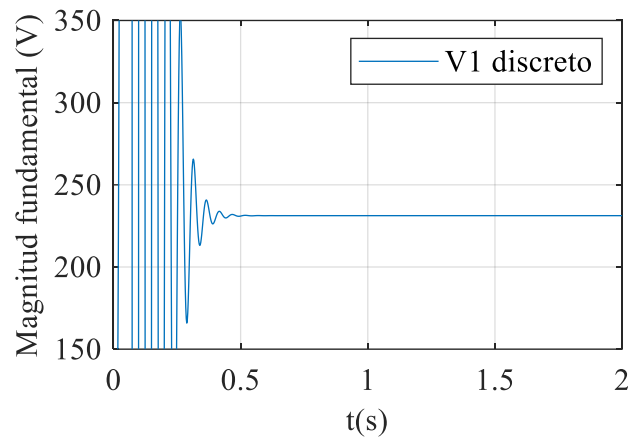


Figura 8.16.- Zoom de la magnitud fundamental calculada por el Smart Meter.

El cálculo del quinto armónico, que se puede ver en la figura 8.17 y en su zoom en la figura 8.18, también tiene un transitorio elevado. En este caso tiene una duración de alrededor de 0,25 segundos. Tras este transitorio, se alcanza un valor en régimen permanente muy cercano a los  $230 \times 0,1 = 23$  V en valor eficaz que corresponden al valor real.

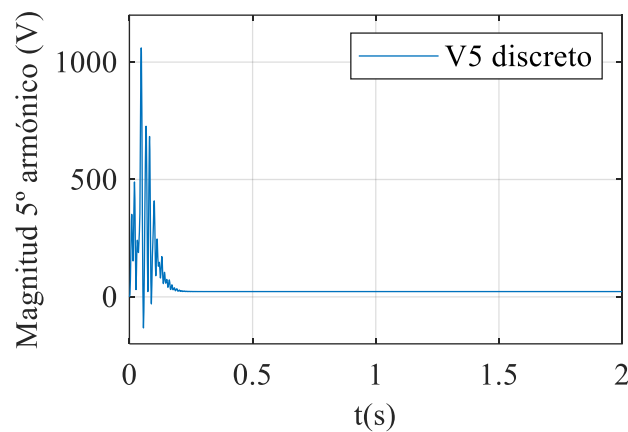


Figura 8.17.- Magnitud del quinto armónico calculado por el Smart Meter.

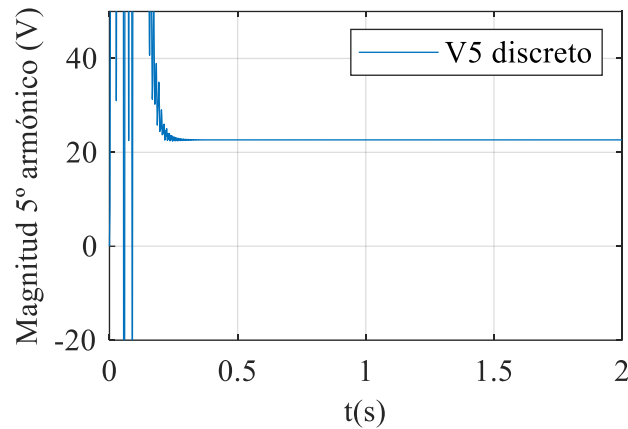


Figura 8.18.- Zoom de la magnitud del quinto armónico calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.19 y 8.20 se puede ver que el cálculo del séptimo armónico ofrece un resultado similar al del quinto. También tiene un transitorio elevado de duración cercana a los 0,25 segundos y un valor de régimen permanente muy cercano al valor real, que es  $0,05 \times 230 = 11,5$  V en valor eficaz.

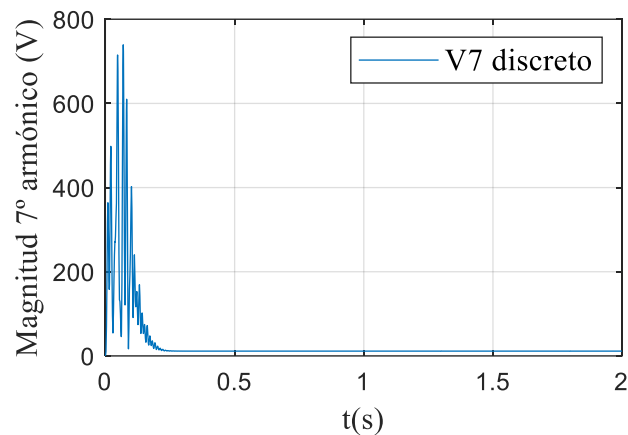


Figura 8.19.- Magnitud del séptimo armónico calculado por el Smart Meter.

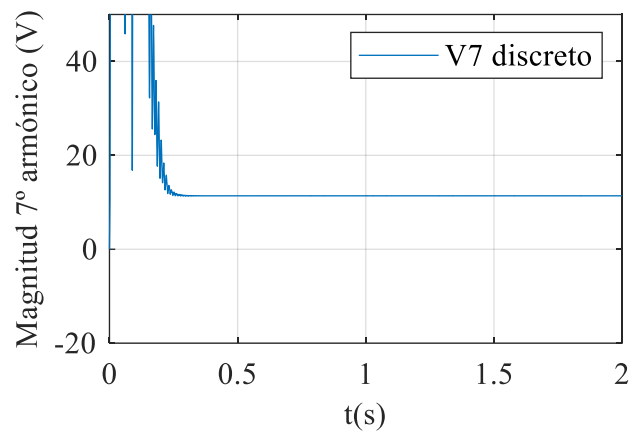


Figura 8.20.- Zoom de la magnitud del séptimo armónico calculado por el Smart Meter.

En el caso de las potencias activas y reactivas, también se tiene un transitorio de duración cercana a los 0,25 segundos durante los cuales se alcanzan valores muy superiores a los valores reales. Tras este transitorio se llega al régimen permanente, en el que se alcanzan valores muy cercanos a los del circuito real.

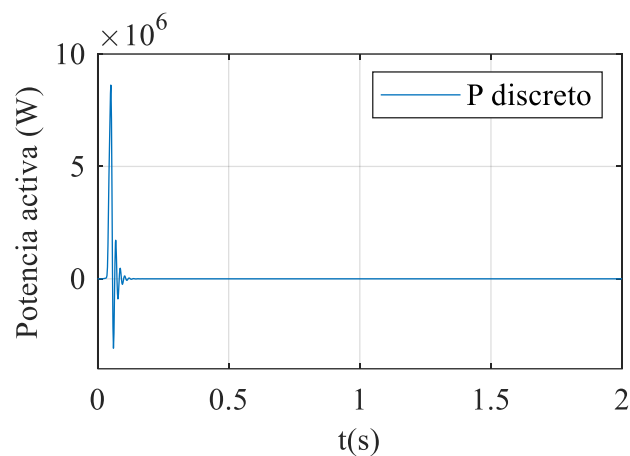


Figura 8.21.- Potencia activa calculada por el Smart Meter.

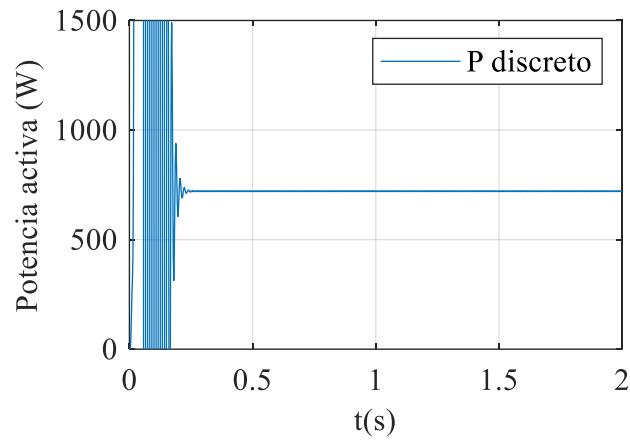


Figura 8.22.- Zoom de la potencia activa calculada por el Smart Meter.

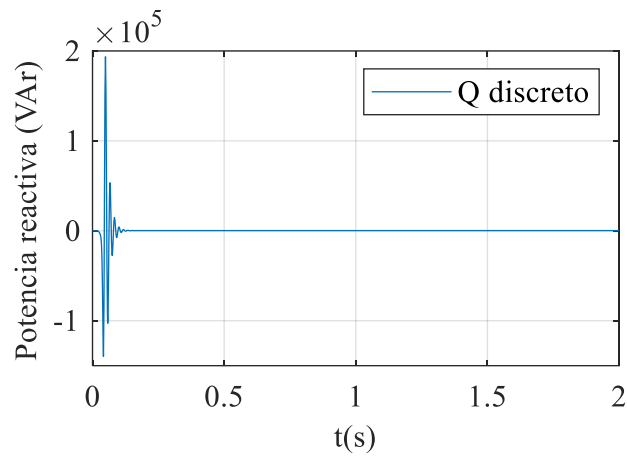


Figura 8.23.- Potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

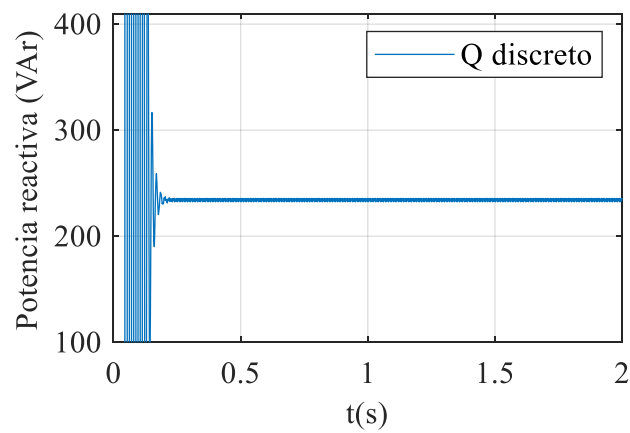


Figura 8.24.- Zoom de la potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.25 se puede ver el coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter, que es muy cercano al dato real cuyo valor es de  $\cos(18^\circ) \sim 0,95$ .

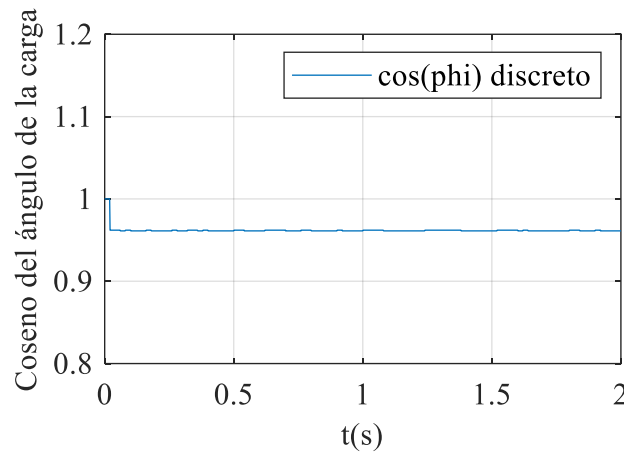


Figura 8.25.- Coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter.

### 8.3.- MODO DE FUNCIONAMIENTO TRIFÁSICO DE SEIS SENSO-RES CON SEÑAL GENERADA A PARTIR DE UN FICHERO DE DATOS.

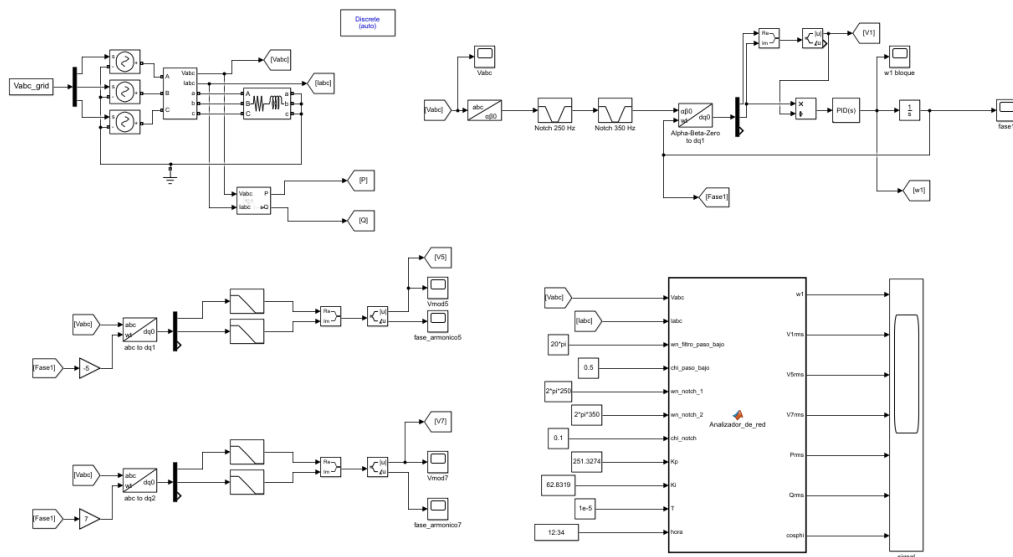


Figura 8.26.- Modelo general del modo trifásico en Simulink. Señal a partir de fichero.

En este otro caso se tendrá un circuito trifásico cuya tensión es la tensión registrada en un fichero de datos de MATLAB. Para obtener los datos de dicho fichero, se ha usado una

fuente de tensión programable, modelo 2210 TC-ACS-50-480-400 del fabricante Regatron, con la que se llevan a cabo las variaciones de magnitud, frecuencia y fase. Estos datos fueron capturados en un laboratorio y almacenados en forma de fichero de datos de MATLAB. En este modelo también se trabaja con una frecuencia de 100 kHz.

### 8.3.1.- Circuito eléctrico.

Tipo de circuito: Este circuito eléctrico será un circuito eléctrico trifásico. En la figura 8.27 se puede ver un esquema del mismo.

Fuente de tensión: Se tendrá una fuente de tensión trifásica cuyos parámetros irán modificándose a lo largo del tiempo. En la tabla 8.3 se puede ver la evolución de los mismos.

Datos del generador	
Amplitud base ( $V_{RMS}$ fase – tierra) = 230 V	
T = 0 segundos	1 p.u.
T = 0,8 segundos	0.8 p.u.
T = 0,9 segundos	1.2 p.u.
T = 1 segundos	1 p.u.
T = 1,98 segundos	0.8 p.u.
T = 2,08 segundos	1.2 p.u.
T = 2,18 segundos	1 p.u.
Frecuencia	
T = 0 segundos	50 Hz
T = 0,2 segundos	49 Hz
T = 0,3 segundos	51 Hz
T = 0,4 segundos	50 Hz
T = 1,38 segundos	49 Hz
T = 1,48 segundos	51 Hz
T = 1,58 segundos	50 Hz
Saltos de fase	
T = 0,5 segundos	30°
T = 0,6 segundos	-60°
T = 0,7 segundos	30°
T = 1,68 segundos	30°
T = 1,78 segundos	-60°
T = 1,88 segundos	30°

Offset de CC	
T = 0 segundos	0 V
T = 1,5 segundos	+10 V fase a +5 V fase b -5 V fase c
Armónicos	
T = 0 segundos	No se inyectan armónicos
T = 1,2 segundos	5° armónico: 0,05 p.u. 7° armónico: 0,05 p.u.

Tabla 8.3.- Consignas de los generadores.

A esta fuente de tensión, estará conectada una impedancia de  $47.552825 \Omega$  y  $0.04918158 \text{ H}$ , es decir una impedancia cuyo módulo son  $50 \Omega$  y su ángulo es de  $18^\circ$ .

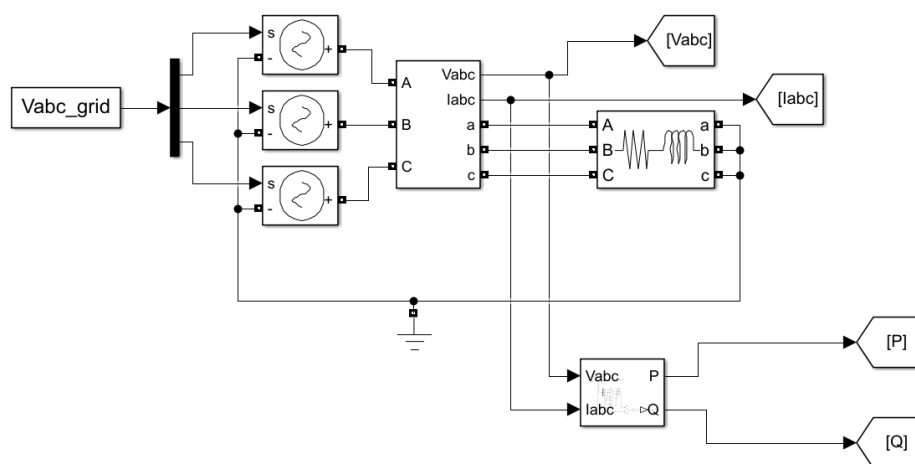


Figura 8.27.- Circuito eléctrico del modelo.

A continuación, se procederá a analizar los resultados obtenidos en este escenario. Se comprobará gráficamente el comportamiento del modelo del dominio discreto, es decir el Smart Meter, tomando como referencia los datos de la tabla 8.3.

### 8.3.2.- Resultados.

Se analizarán los resultados en el mismo orden que en los escenarios anteriores. En primer lugar, se analizará la medida de la velocidad angular. En las figuras 8.28 y 8.29 se puede ver el cálculo de la velocidad angular. Siguiendo los datos reales, al comienzo se tiene una velocidad angular de  $2 \times \pi \times 50 \sim 314 \text{ rad/s}$ . En  $t = 0,2$  segundos se pasa a  $2 \times \pi \times$



$49 \sim 308 \text{ rad/s}$ , en  $t = 0,3$  segundos se pasa a  $2 \times \pi \times 51 \sim 320 \text{ rad/s}$  y en  $t = 0,4$  segundos se vuelve a  $2 \times \pi \times 50 \sim 314 \text{ rad/s}$ . Esos mismos cambios tienen lugar en  $t = 1,38$  segundos,  $t = 1,48$  segundos y  $t = 1,58$  segundos. Se puede apreciar que se siguen con suficiente fidelidad los escalones pese a que se en ciertos momentos se producen desviaciones significativas, especialmente en los momentos en los que se producen los saltos de fase. También se puede apreciar que en el momento en el que se genera el offset de CC aumenta considerablemente el nivel de ruido en la medida.

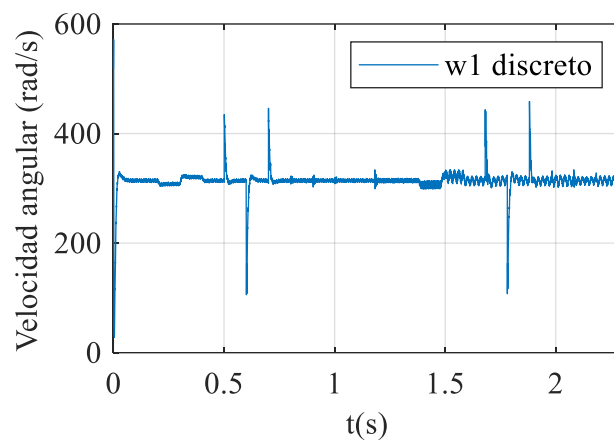


Figura 8.28.- Velocidad angular calculada por el Smart Meter.

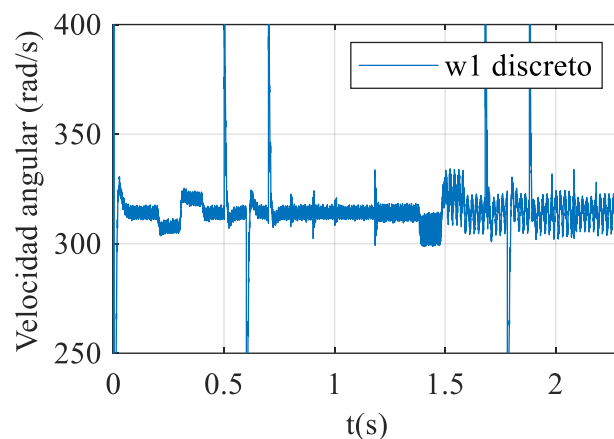


Figura 8.29.- Zoom de la velocidad angular calculada por el Smart Meter.

En cuanto al cálculo de la magnitud fundamental de la tensión, en la figura 8.30 se puede ver que también se siguen correctamente los escalones de este parámetro. Se comienza con 230 V, en  $t = 0,8$  segundos se pasa a  $0,8 \times 230 = 184 \text{ V}$ , en  $t = 0,9$  segundos se pasa a  $1,2 \times$

230 = 276 V y en  $t = 1$  segundos se vuelve a 230 V. En  $t = 1,98$  segundos,  $t = 2,08$  segundos y  $t = 2,18$  segundos se repiten los mismos escalones. De nuevo se pueden apreciar las distorsiones provocadas por los saltos de fase y por el offset de CC, pero cuyo valor no es relevante.

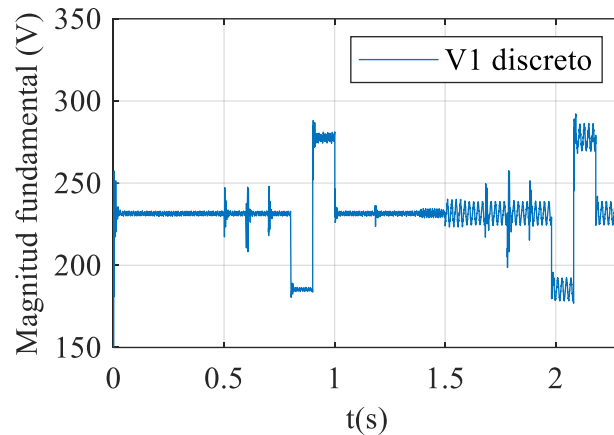


Figura 8.30.- Magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.31 se puede ver el cálculo del quinto armónico. Este cálculo está suicientemente cerca de los datos reales, que serían 0 V desde  $t = 0$  segundos hasta  $t = 1,2$  segundos, y  $0,05 \times 230 = 11,5$  V desde  $t = 1,2$  segundos hasta el final de la simulación.

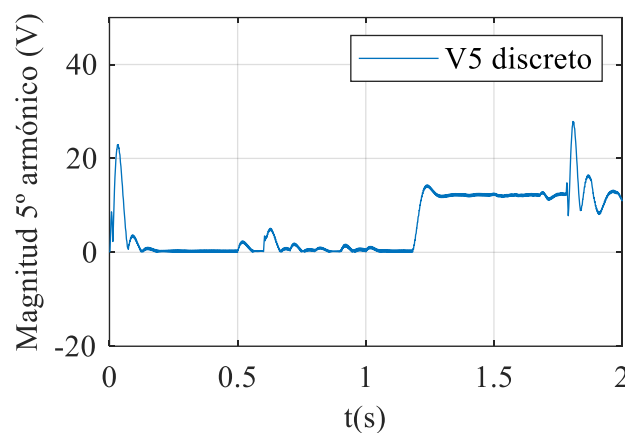


Figura 8.31.- Magnitud del quinto armónico de la tensión calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.32 se puede ver el cálculo del séptimo armónico. También coincide de forma adecuada con los datos reales, que serían los mismos que para el quinto armónico. Es decir, 0 V desde  $t = 0$  segundos hasta  $t = 1,2$  segundos, y  $0,05 \times 230 = 11,5$  V desde  $t = 1,2$  segundos hasta el final de la simulación.

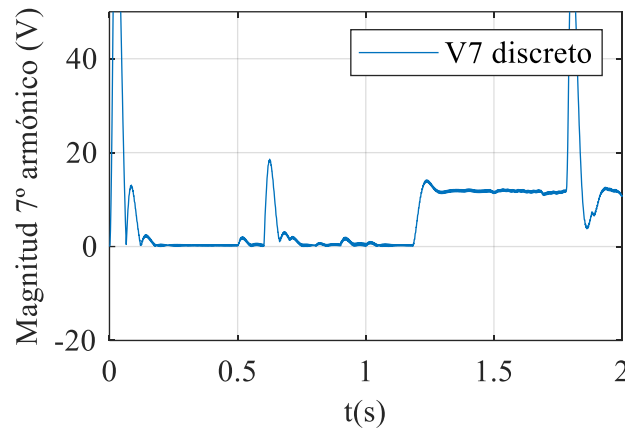


Figura 8.32.- Magnitud del séptimo armónico de la tensión calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.33 y 8.34 se pueden ver los cálculos de las potencias activa y reactiva realizados por el Smart Meter. Se aprecia un ligero aumento de la distorsión de las medidas a partir de  $t = 1,5$  segundos, momento en el que se introduce el offset de CC. El efecto de esta perturbación es reducido en gran medida por el filtro paso bajo que se aplica.

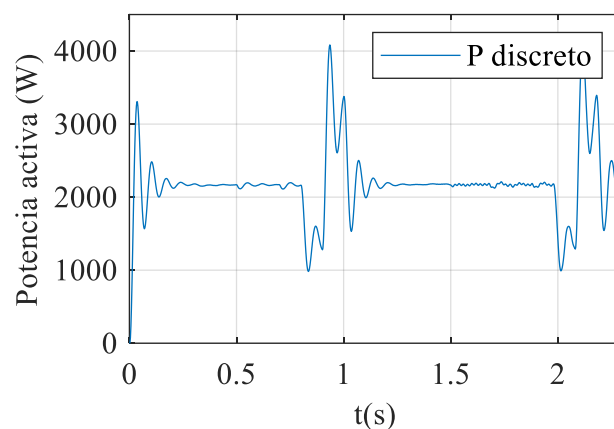


Figura 8.33.- Potencia activa calculada por el Smart Meter.

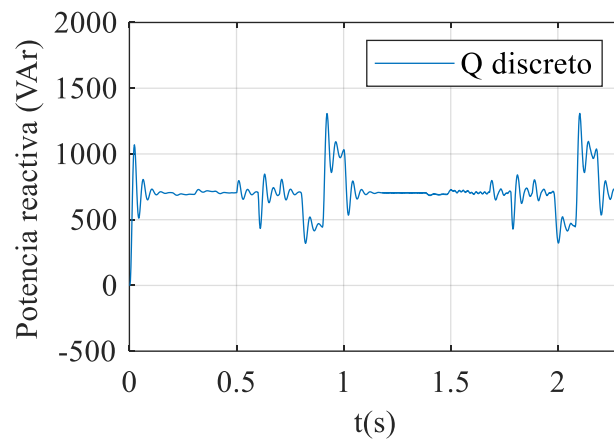


Figura 8.34.- Potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.35 se puede ver el ángulo de la carga calculado por el Smart Meter. Este parámetro en el circuito real tiene un valor de  $\cos(18^\circ) \sim 0,951$ . El Smart Meter arroja una medida bastante estable entorno a ese valor, aunque tiene ligeras desviaciones en momentos puntuales.

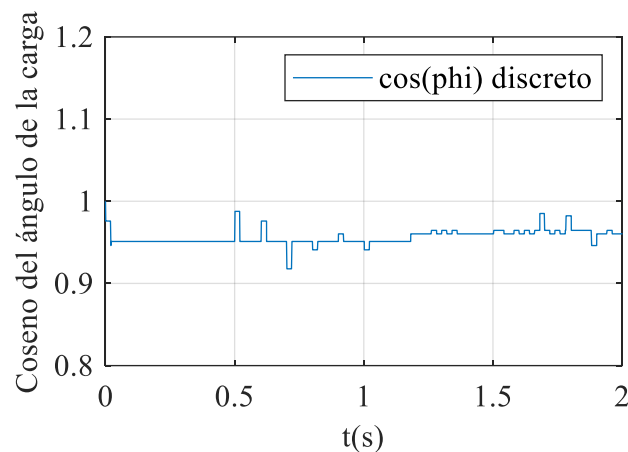


Figura 8.35.- Coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter.

#### 8.4.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA A PARTIR DE UN FICHERO DE DATOS

En este otro caso se tendrá un circuito monofásico cuya tensión es la tensión registrada en la fase *a* del mismo fichero de datos de MATLAB usado para el escenario anterior. En este caso el modelo también trabajará con una frecuencia de muestreo de 100 kHz.

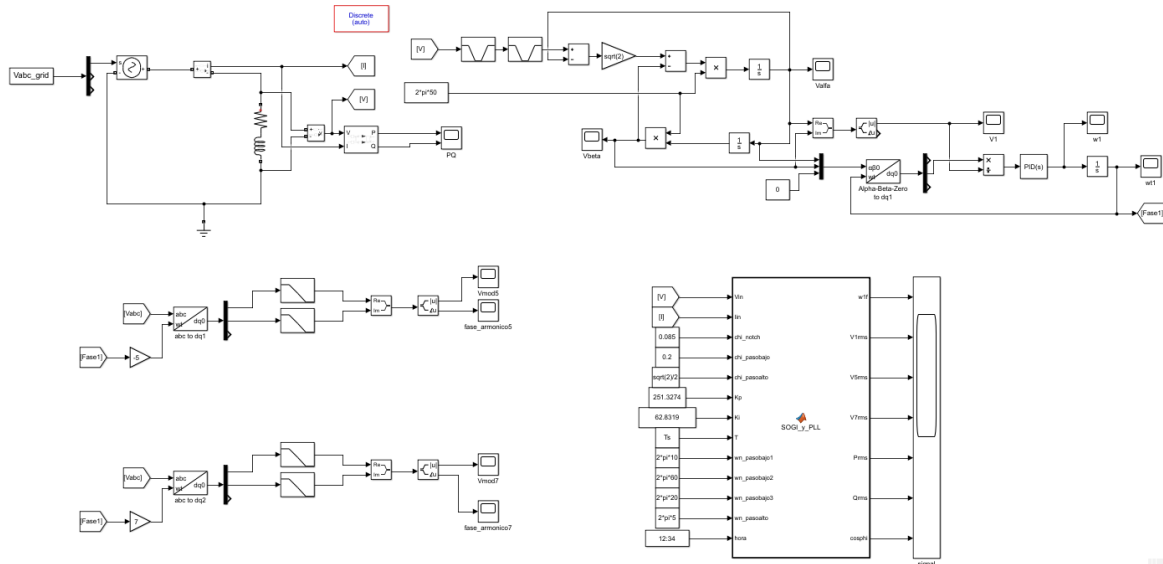


Figura 8.36.- Modelo general del modo monofásico en Simulink. Señal a partir de fichero.

#### 8.4.1.- Circuito eléctrico.

Tipo de circuito: Este circuito eléctrico será un circuito eléctrico monofásico. En la figura 8.37 se puede ver un esquema del mismo.

Fuente de tensión: Se tendrá una fuente de tensión monofásica cuyos parámetros irán modificándose a lo largo del tiempo de la misma forma que se hacía en el apartado 8.3. En la tabla 8.4 se puede ver la evolución de los mismos.

Datos del generador	
Amplitud base ( $V_{RMS}$ ) = 230 V	
T = 0 segundos	1 p.u.
T = 0,8 segundos	0.8 p.u.
T = 0,9 segundos	1.2 p.u.
T = 1 segundos	1 p.u.
T = 1,98 segundos	0.8 p.u.
T = 2,08 segundos	1.2 p.u.

T = 2,18 segundos	1 p.u.
Frecuencia	
T = 0 segundos	50 Hz
T = 0,2 segundos	49 Hz
T = 0,3 segundos	51 Hz
T = 0,4 segundos	50 Hz
T = 1,38 segundos	49 Hz
T = 1,48 segundos	51 Hz
T = 1,58 segundos	50 Hz
Saltos de fase	
T = 0,5 segundos	30°
T = 0,6 segundos	-60°
T = 0,7 segundos	30°
T = 1,68 segundos	30°
T = 1,78 segundos	-60°
T = 1,88 segundos	30°
Offset de CC	
T = 0 segundos	0 V
T = 1,5 segundos	+10 V
Armónicos	
T = 0 segundos	No se inyectan armónicos
T = 1,2 segundos	5° armónico: 0,05 p.u. 7° armónico: 0,05 p.u.

Tabla 8.4.- Consignas de los generadores.

A esta fuente de tensión, estará conectada una impedancia de  $47.552825 \Omega$  y  $0.04918158 \text{ H}$ , es decir una impedancia cuyo módulo son  $50 \Omega$  y su ángulo es de  $18^\circ$ .

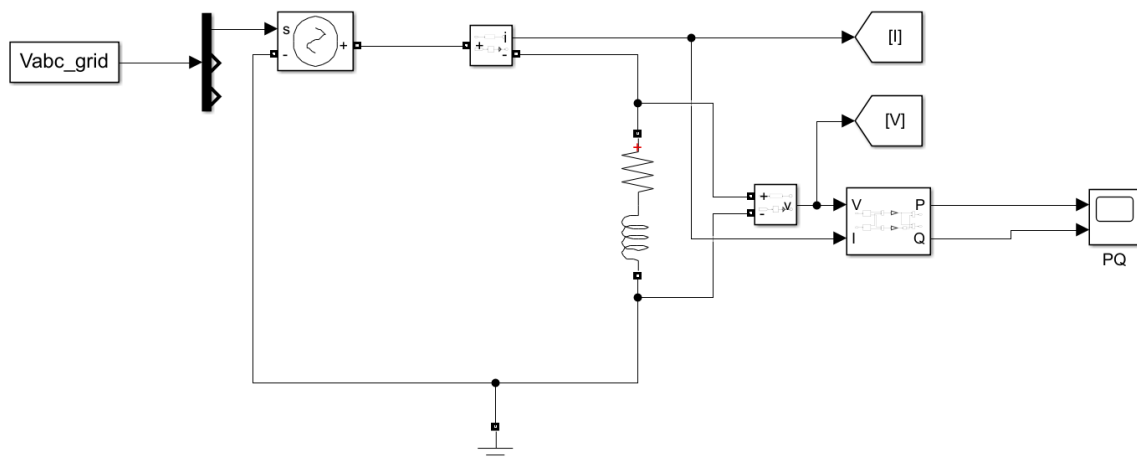


Figura 8.37.- Circuito eléctrico del modelo.

Del mismo modo que se hizo para el apartado 8.3, se procederá a analizar los resultados obtenidos en este escenario. Se comprobará gráficamente el comportamiento del modelo del dominio discreto, es decir el Smart Meter, tomando como referencia los datos de la tabla 8.4.

#### 8.4.2.- Resultados.

Como se puede ver en las figuras 8.38 y 8.39, no se consigue una medida legible de la magnitud de la velocidad angular durante los escalones de 0,1 segundos de duración. Sí se estabiliza la medida en periodos de mayor duración, por lo que se puede concluir que el Smart Meter en modo de funcionamiento monofásico no es capaz de medir con suficiente precisión variaciones tan bruscas como las que aparecen en los datos de partida.

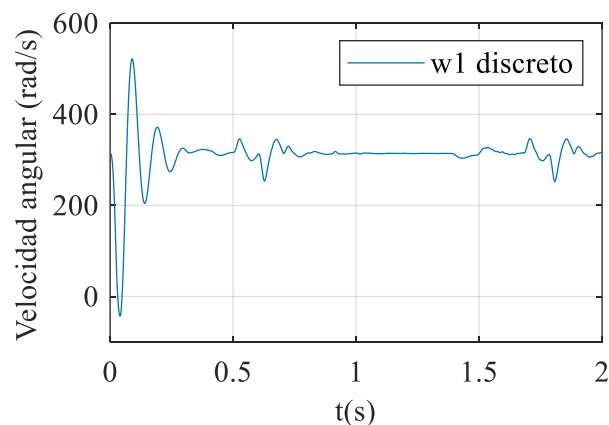


Figura 8.38.- Velocidad angular calculada por el Smart Meter.

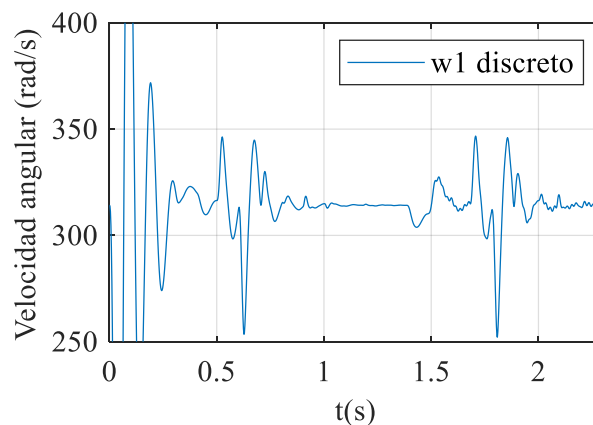


Figura 8.39.- Zoom de la velocidad angular calculada por el Smart Meter.

La medida de la magnitud fundamental de la tensión aparece en las figuras 8.40 y 8.41. En ambas gráficas se puede apreciar que el Smart Meter sigue de forma general las variaciones de la tensión, pero sin ser capaz de dar una medida de gran precisión durante los escalones. Además, se puede ver que tiene gran sensibilidad frente a las perturbaciones tales como los propios escalones o los saltos de fase de la tensión. El tiempo necesario para estabilizar la medida tras esos cambios es considerablemente mayor que el que necesitaba el Smart Meter en el modo de funcionamiento trifásico de seis sensores.

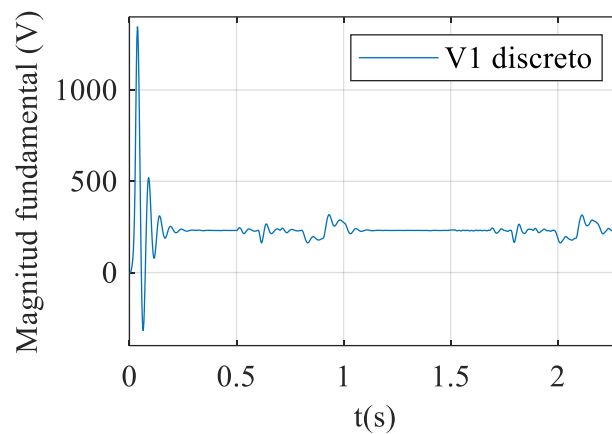


Figura 8.40.- Magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.

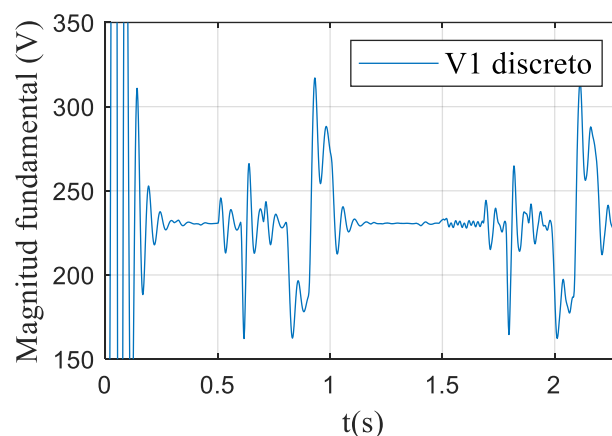


Figura 8.41.- Zoom de la magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.



En las figuras 8.42, 8.43, 8.44 y 8.45 se pueden ver los cálculos del quinto y séptimo armónicos y que tienen un comportamiento similar. En ambos casos el Smart Meter es capaz de dar una medida estable en una porción muy reducida del tiempo total de la simulación. A lo largo de la mayor parte de la misma, la medida está completamente distorsionada por el ruido y no es posible tener una medida legible. Por lo tanto, se puede concluir que este Smart Meter no es válido para el cálculo de los armónicos en un sistema que vaya a sufrir variaciones tan bruscas como las del fichero de datos de MATLAB utilizado.

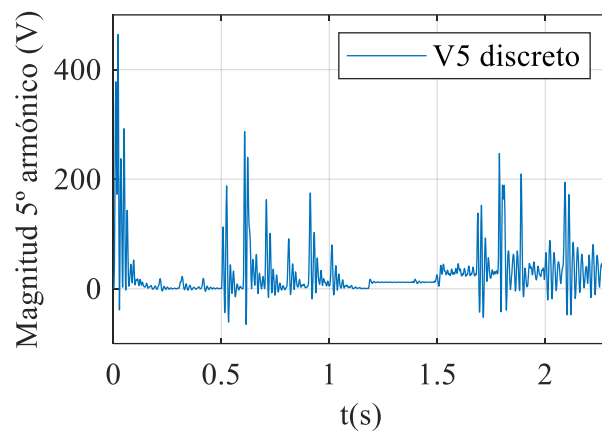


Figura 8.42.- Magnitud del quinto armónico calculada por el Smart Meter.

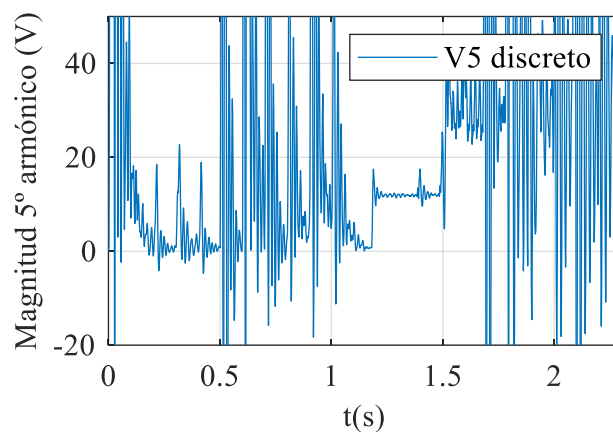


Figura 8.43.- Zoom de la magnitud del quinto armónico calculada por el Smart Meter.

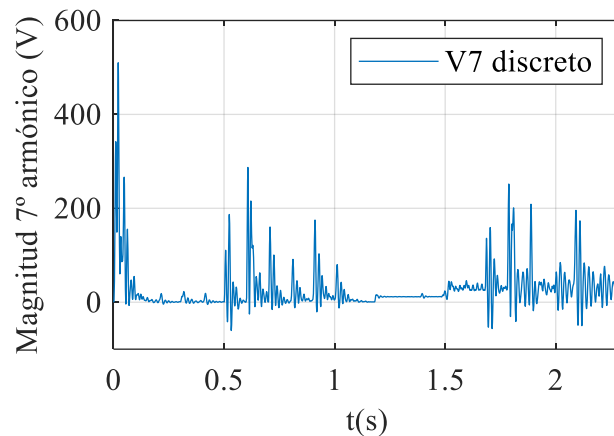


Figura 8.44.- Magnitud del séptimo armónico calculada por el Smart Meter.

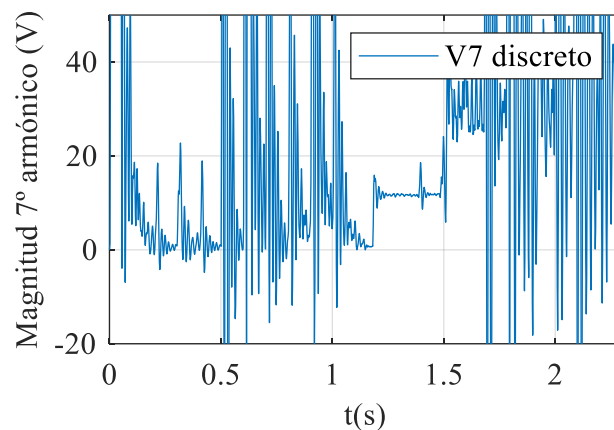


Figura 8.45.- Zoom de la magnitud del séptimo armónico calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.46, 8.47, 8.48 y 8.49 se puede apreciar el cálculo de las potencias activa y reactiva llevado a cabo por el Smart Meter. En ambas medidas se tiene un funcionamiento similar, con las características principales de que aparece un transitorio inicial durante el que se alcanzan valores muy altos, pero que tiene una duración muy corta en el tiempo. Tras este transitorio, el valor alcanzado por la medida es bastante preciso. Se pueden apreciar las desviaciones provocadas por los saltos de fase así como el ruido provocado por el offset de CC. Tienen un valor que no es despreciable, pero tampoco es preocupante para la aplicación para la que se diseña este Smart Meter, por lo que se puede dar por válido el cálculo de las potencias realizado por el mismo.

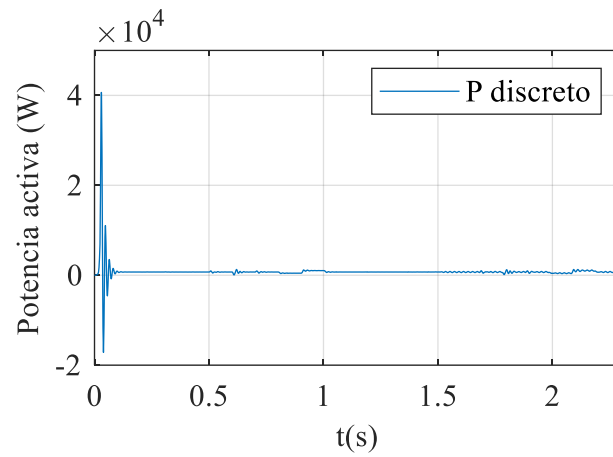


Figura 8.46.- Potencia activa calculada por el Smart Meter.

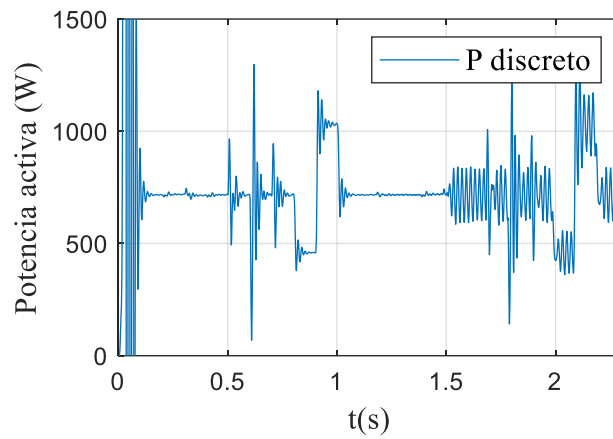


Figura 8.47.- Zoom de la potencia activa calculada por el Smart Meter.

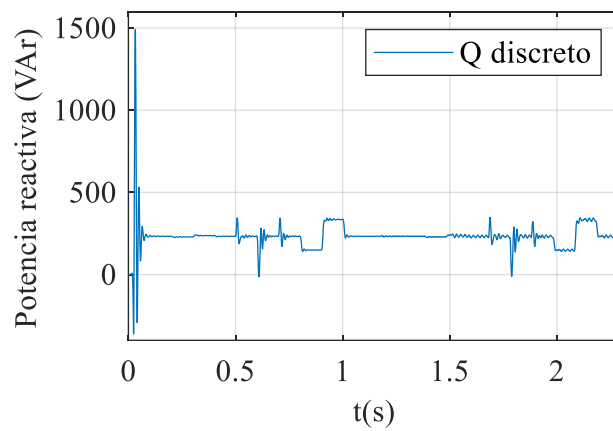


Figura 8.48.- Potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

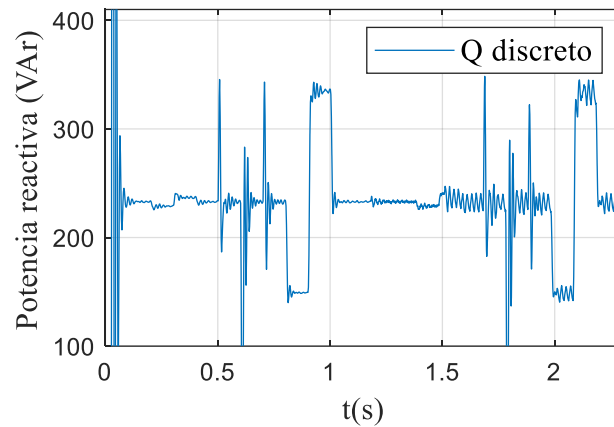


Figura 8.49.- Zoom de la potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.50 aparece el cálculo del coseno del ángulo de la carga. El dato calculado por el Smart Meter se encuentra siempre muy cercano al valor real, cuyo valor es de  $\cos(18^\circ) \sim 0,951$ . En ciertas ocasiones aparecen desviaciones de la medida cuyo valor no es demasiado lejano al real ni la duración de las mismas suficientemente larga como para que suponga un problema. Por lo tanto, también se puede dar por válido este cálculo.

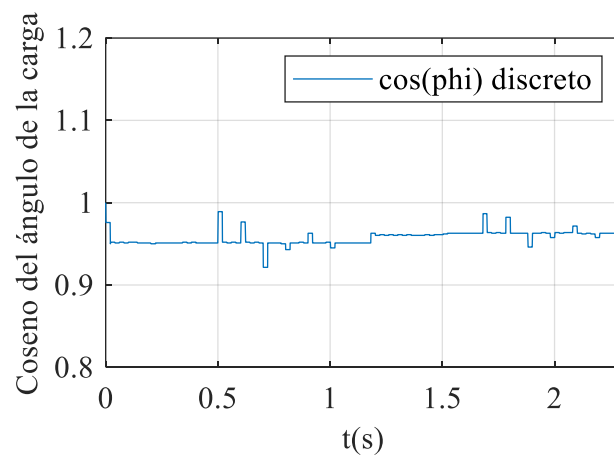


Figura 8.50.- Coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter.

## 8.5.- MODO DE FUNCIONAMIENTO MONOFÁSICO CON SEÑAL GENERADA POR UN OSCILOSCOPIO

Se crea un último modelo en el que el Smart Meter trabaja en modo de funcionamiento monofásico y toma los datos generados por un osciloscopio. El modelo trabaja con una frecuencia de 3 kHz. Se lleva a cabo así una simulación a escala del funcionamiento del Smart Meter conectado a una red eléctrica real. En este modelo sí se implementa el software dentro de la Raspberry Pi y se hace pasar la medida de la tensión a través del ADC. La tensión generada por el osciloscopio se conecta directamente a la entrada del ADC y, al no haber un circuito eléctrico con generador e impedancia, se calcula la intensidad a partir de la tensión medida.

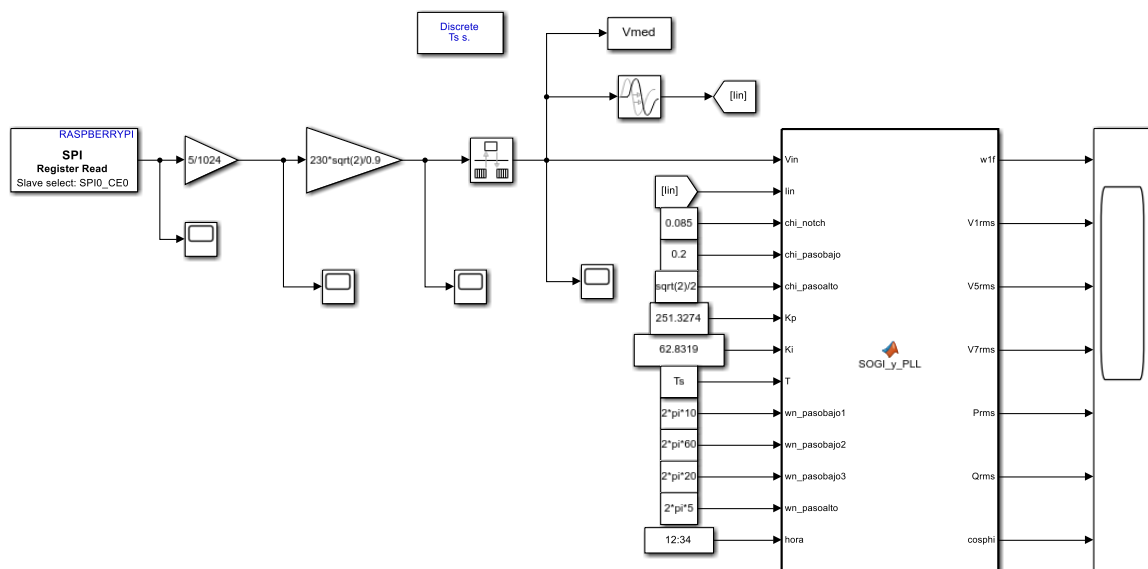


Figura 8.51.- Modelo general del modo monofásico en Simulink. Señal generada por osciloscopio.

### 8.5.1.- Circuito eléctrico.

A continuación se presentarán los datos obtenidos al conectar Smart Meter en el modo de funcionamiento monofásico a una red eléctrica a escala formada por un osciloscopio que genera una tensión con las características mostradas en la tabla 8.5. Se realizan las transformaciones necesarias para escalar esta tensión y que el Smart Meter mida una tensión similar a la que puede haber en una instalación eléctrica en España y que aparecen en la tabla 8.6.

Datos generados por el osciloscopio	
Amplitud	0,9 V
$V_{\text{offset}}$	1 V
Frecuencia	50 Hz
Forma de onda	Sinusoidal

Tabla 8.5.-Datos generados por el osciloscopio

Tras la obtención de esta onda por parte de la Raspberry Pi, se multiplica por 5 (tensión a la que se alimenta el ADC y tensión máxima que puede leer) y se divide entre 1024 (señal emitida por el ADC cuando en su entrada analógica lee 5 V) para obtener la tensión real en a la entrada del ADC. Después se multiplica por  $230\sqrt{2}$  (tensión de pico que habría en la red eléctrica que se representa) y se divide entre 0,9 (tensión de pico que genera el osciloscopio). Así se obtiene la tensión que habría en la red que se está representando en este modelo a escala.

Fuera del modelo del Smart Meter, se provoca un retraso de 1 ms a la medida de tensión y se introduce en el Smart Meter como medida de intensidad. Dentro del modelo del Smart Meter, se divide entre 50. Así se simula que la impedancia a la que está conectada la red es inductiva, tiene un módulo de  $50 \Omega$  y un ángulo de  $18^\circ$ .

Datos medidos por el Smart Meter	
Amplitud de la tensión	$230 \times \sqrt{2} \text{ V}$
$V_{\text{offset}}$	$\frac{230 \times \sqrt{2}}{0,9} \text{ V}$
Frecuencia	50 Hz
Forma de onda	Sinusoidal
Amplitud de la intensidad	$\frac{230 \times \sqrt{2}}{50} \text{ A}$
$I_{\text{offset}}$	$\frac{230 \times \sqrt{2}}{0,9 \times 50} \text{ A}$
Retraso de I con respecto a V	1 ms

Tabla 8.6.-Datos medidos por el Smart Meter.

### 8.5.2.- Resultados.

Tal y como se ve en las figuras 8.52 y 8.53, la medida de la velocidad angular se realiza de forma rápida y precisa. Alcanzándose sin demasiados problemas el valor real que corresponde a  $2 \times \pi \times 50 \sim 314 \text{ rad/s}$ .

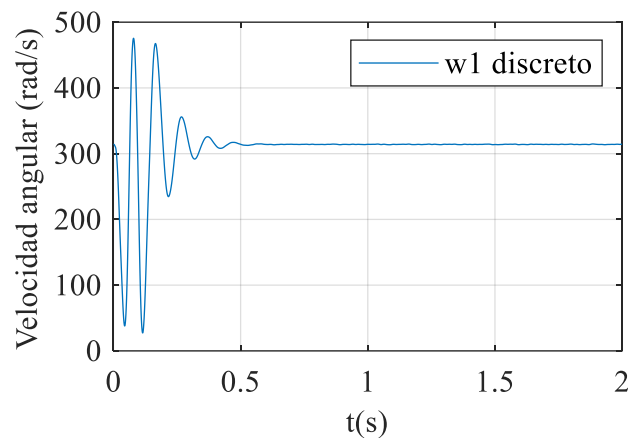


Figura 8.52.- Velocidad angular calculada por el Smart Meter.

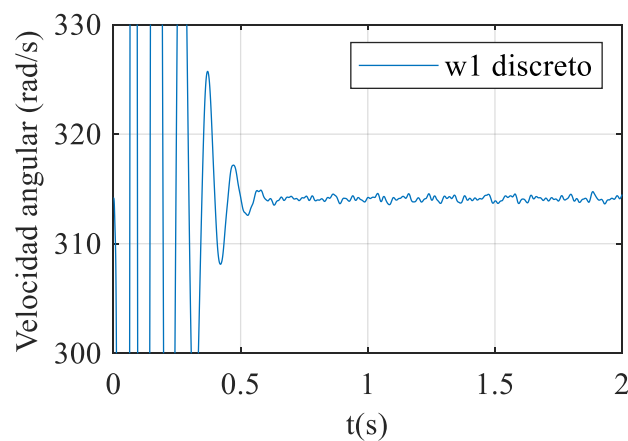


Figura 8.53.- Zoom de la velocidad angular calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.54 y 8.55 se ve el cálculo de la magnitud fundamental de la tensión, cuyo valor real a la entrada del Smart Meter corresponde a 230 V. Se alcanza rápidamente y con precisión un valor cercano a los 220 V. Este valor es ligeramente inferior al que se debería

medir. Se modificó el modelo de Simulink para conectar una onda generada por MATLAB en lugar de la onda obtenida de la Raspberry, teniendo ambas las mismas características, y el resultado fue que alcanzaba 230 V con gran precisión. Por lo tanto, se puede atribuir este desvío y todos los que dependan de la amplitud de la tensión y/o intensidad a una tensión generada por el osciloscopio ligeramente menor que la de su consigna.

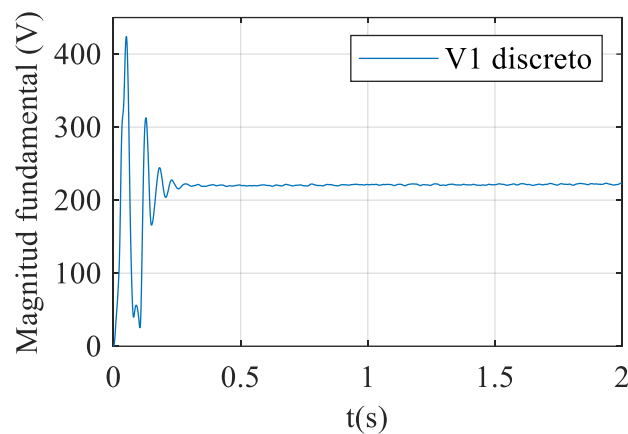


Figura 8.54.- Magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.

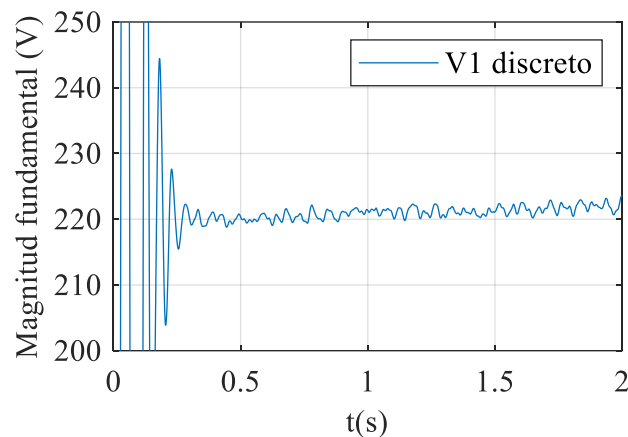


Figura 8.55.- Zoom de la magnitud fundamental de la tensión calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.56 y 8.57 se muestra el valor del quinto armónico calculado por el Smart Meter. En este caso se está calculando el valor del quinto armónico generado por el osciloscopio, el cual tendrá un valor muy reducido pero desconocido. El valor calculado cumple



con esa condición, se calcula una magnitud cercana a cero. Por lo tanto, se puede dar por válido.

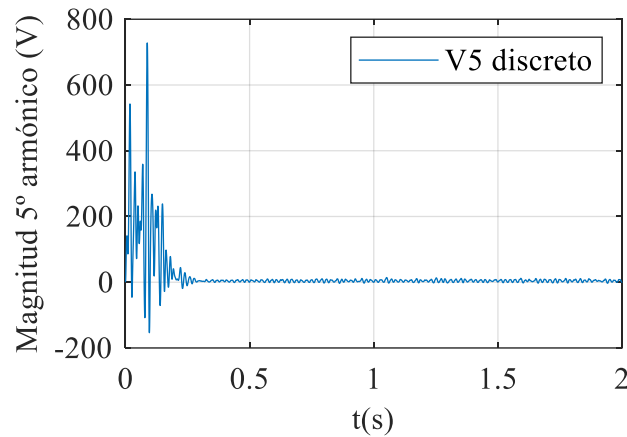


Figura 8.56.-Magnitud del quinto armónico calculada por el Smart Meter.

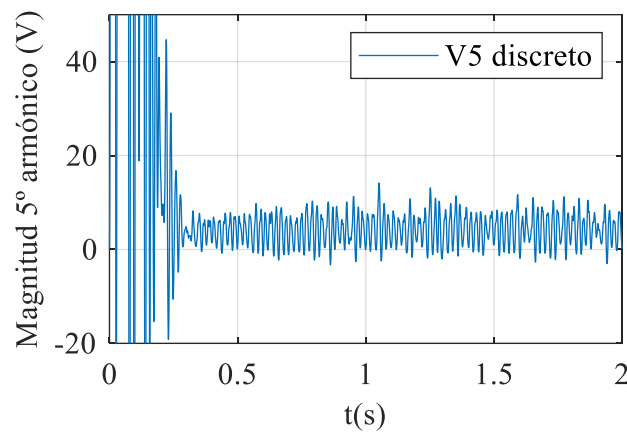


Figura 8.57.- Zoom de la magnitud del quinto armónico calculada por el Smart Meter.

Con el séptimo armónico, que aparece en las figuras 8.58 y 8.59 ocurre exactamente lo mismo que con el quinto. No se tiene un dato concreto del valor del séptimo armónico inyectado por el osciloscopio. Por lo tanto, el valor medido, que se corresponde con un séptimo armónico de valor cercano a cero, se puede dar por válido.

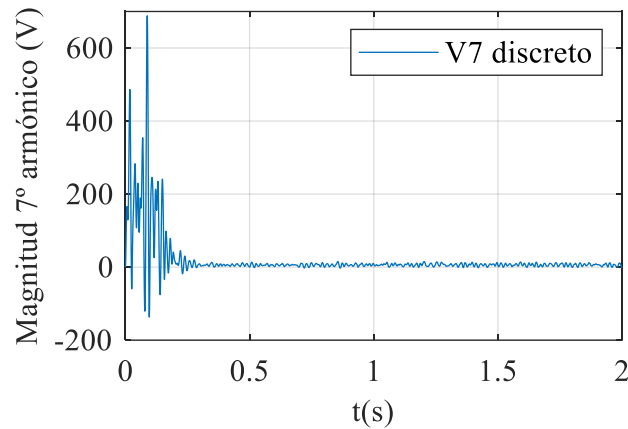


Figura 8.58.- Magnitud del séptimo armónico calculada por el Smart Meter.

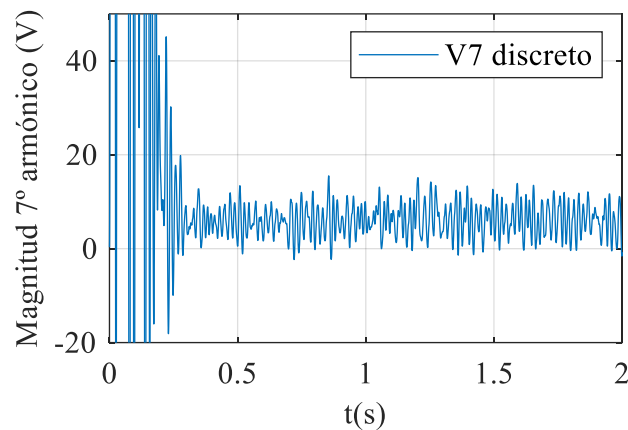


Figura 8.59.- Zoom de la magnitud del séptimo armónico calculada por el Smart Meter.

En las figuras 8.60, 8.61, 8.62 y 8.63 aparecen los cálculos de potencia activa y reactiva realizados por el Smart Meter. Estos cálculos arrojan un valor ligeramente inferior al que tendría la red real. Teniendo en cuenta que, tal y como se mencionó anteriormente, el osciloscopio genera algo menos de lo que se indicó como consigna, se pueden dar por válidas estas medidas.

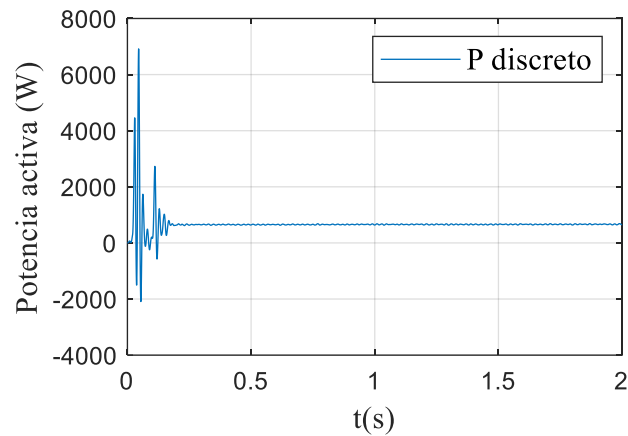


Figura 8.60.- Potencia activa calculada por el Smart Meter.

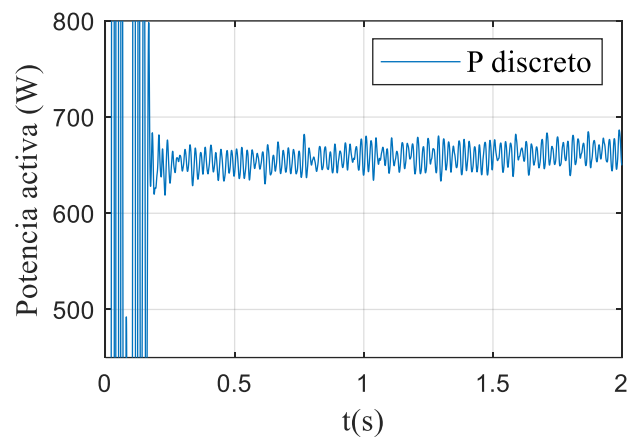


Figura 8.61.- Zoom de la potencia activa calculada por el Smart Meter.

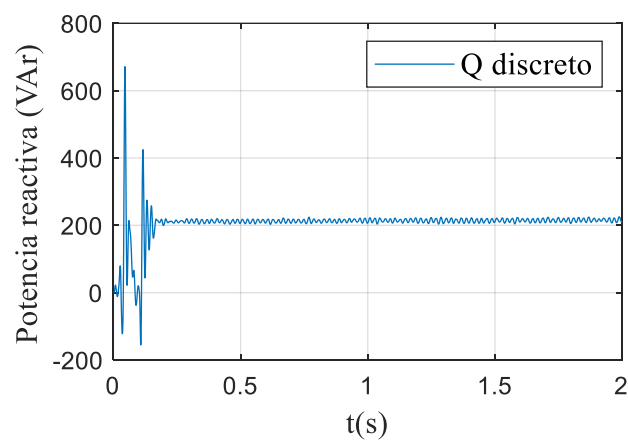


Figura 8.62.- Potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

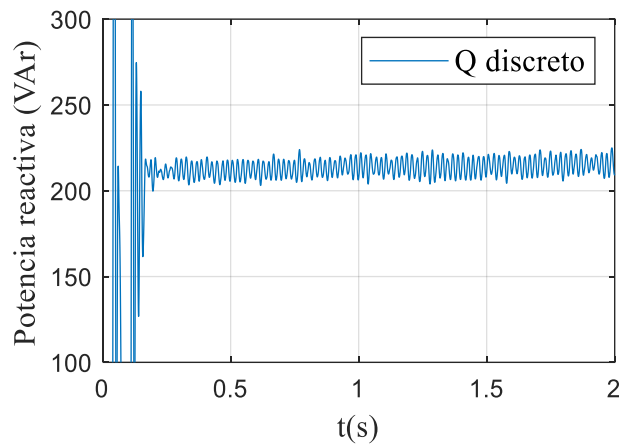


Figura 8.63.- Zoom de la potencia reactiva calculada por el Smart Meter.

En la figura 8.64 aparece el cálculo del ángulo de la carga. La intensidad medida por el Smart Meter tiene un retraso de 1 ms con respecto a la tensión. Por lo tanto, el valor real del ángulo de la carga sería de  $18^\circ$  y su coseno sería  $\cos(18^\circ) \sim 0,951$ . El valor calculado por el Smart Meter es suficientemente cercano como para validar la medida.

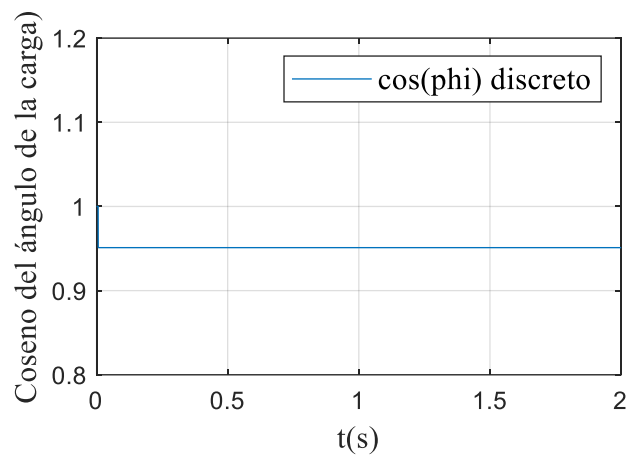


Figura 8.64.- Coseno del ángulo de la carga calculado por el Smart Meter.

## 9.- Presupuesto.

En este apartado se analizará el presupuesto necesario para el desarrollo del Smart Meter.

Gasto en materiales	
1 x Raspberry Pi Zero W	30 €
2 x ADC (MCP3008)	2 x 3,5 € = 7 €
1 x Pack de cables	1 €
1 x Sensor de intensidad (SCT013-000)	6 €
1 x Sensor de tensión (ZMPT101B)	7 €
1 x Tarjeta SD 16 GB	5,5 €
<b>Total</b>	<b>56,5 €</b>

Tabla 9.1.- Costes de los materiales empleados para cada Smart Meter.

Gasto en desarrollo	
1 x Osciloscopio (PicoScope 2204A)	115 €
1 x Licencia de MATLAB de 1 año	800 €
700 x Horas de ingeniería	700 x 10,64 € = 7.448 €
<b>Total</b>	<b>8.363 €</b>

Tabla 9.2.- Costes del diseño del Smart Meter.

En la tabla 9.1 se analizan los costes variables de la producción de este Smart Meter. Estos costes son los relativos al material que forma parte de cada uno de ellos. Como se puede ver, tiene unos costes de 56,5 € por cada Smart Meter producido.

En la tabla 9.2 se analizan los costes fijos del Smart Meter. Corresponden a los costes del diseño del mismo, incluyendo el material necesario para este objetivo y el salario de un graduado en ingeniería que lo diseñe cobrando el salario fijado en el convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos para el año 2020 [17]. Como se puede ver, los costes fijos asociados son de 8.363 €.

Todos los costes incluidos en este capítulo incluyen IVA.

## 10.- Conclusiones.

El Smart Meter presenta un buen comportamiento en los tres modos de funcionamiento. A partir de las simulaciones realizadas con señal generada por MATLAB, se comprueba que los tres modos tienen una buena respuesta ante un sistema estable, sin grandes distorsiones.

A partir de las simulaciones realizadas con señal generada a partir de un fichero de datos, se comprueba que el Smart Meter en modo de funcionamiento trifásico sigue teniendo una buena respuesta ante un sistema más inestable, que presenta escalones, saltos de fase e incluso desequilibrios entre fases, siendo este el efecto más nocivo para su funcionamiento.

En los modos monofásico y trifásico de dos sensores no presenta un comportamiento adecuado ante el sistema generado a partir de ese fichero. El sistema cuenta con demasiadas perturbaciones en un tiempo muy reducido y al Smart Meter no le da tiempo a llegar a dar una medida precisa. Este sistema era una forma de probar el comportamiento del Smart Meter ante grandes perturbaciones, pero se debe tener en cuenta que una red eléctrica real no presentará tantas perturbaciones, de forma tan brusca y en un tiempo tan reducido.

Finalmente, se probó el Smart Meter en modo de funcionamiento monofásico (y considerando probado el trifásico de dos sensores con la misma prueba) conectado a una red eléctrica a escala. Esta representación se llevó a cabo usando un osciloscopio para generar una señal que se conecta directamente al ADC. En este caso, el Smart Meter presentó un buen funcionamiento, alcanzando todas las medidas de forma rápida y precisa.

Queda por tanto validado el Smart Meter para su uso en instalaciones eléctricas reales, tanto domésticas como industriales. Se consigue así lograr el objetivo propuesto al inicio del proyecto: un Smart Meter para medida de parámetros eléctricos basado en software libre, y con un coste reducido.

# 11.- Bibliografía.

- [1] <https://www.edpenergia.es/es/hogares/luz/luz-maximo-ahorro/>.
- [2] <https://www.endesa.com/es/luz-y-gas/luz>.
- [3] <https://www.iberdrola.es/luz>.
- [4] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, «Orden ITC/3860/2007,» 2008.
- [5] <https://wibeee.com/>.
- [6] C. J. O' Rourke, M. M. Cassim, M. R. Overlin y J. L. Kirtley, «A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park.,» 2019.
- [7] P. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff y S. Pekarek, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 2013.
- [8] C. Blanco Charro, «Synchronization, islanding detection and power quality improvement in distributed power generation systems,» 2015.
- [9] P. Rodriguez, A. Luna, R. Teodorescu y F. Blaabjerg, «Grid synchronization of power converters using multiple second order generalized integrators,» 2008.
- [10] A. S. Sedra y K. C. Smith, Microelectronic circuits, 1982.
- [11] R. Zheng y M. Bollen, «Harmonic Resonances Associated with Wind Farms,» 2010.
- [12] Schneider, «CT-202 Las peculiaridades del tercer armónico,» 2000.
- [13] T. Liu y Y. Wang, «IP design of universal multiple devices SPI interface,» 2011.
- [14] D. Trivedi, A. Khade y K. Jain, «SPI to I2C Protocol Conversion Using Verilog,» 2018.
- [15] [https://www.researchgate.net/figure/ZMPT101B-One-Phase-Voltage-Sensor\\_fig2\\_334231027](https://www.researchgate.net/figure/ZMPT101B-One-Phase-Voltage-Sensor_fig2_334231027).
- [16] <https://innovatorsguru.com/zmpt101b/>.
- [17] Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social, «Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos,» 2019.