



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



DIMARI: Dispositivo de Medida y Análisis para Redes Inteligentes

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Gastón Pereira, Marina Rogova, Felipe Vitar

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Leonardo Barboni..... Universidad de la República

TRIBUNAL

Federico Favaro..... Universidad de la República

Javier Schandy..... Universidad de la República

Juan Bazerque..... Universidad de la República

Guillermo Antunez..... Universidad de la República

Montevideo
miércoles 26 julio, 2017

DIMARI: Dispositivo de Medida y Análisis para Redes Inteligentes, Gastón Pereira, Marina Rogova, Felipe Vitar.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 170 páginas.
Compilada el miércoles 26 julio, 2017.
<http://iie.fing.edu.uy/>

“El científico no tiene por objeto un resultado inmediato. Él no espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir y señalar el camino.”

NIKOLA TESLA

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Queremos agradecer a las personas que han sido un impulso fundamental en el desarrollo de este proyecto. Tanto de manera directa, colaborando y aportando ideas; como a los que nos apoyaron moralmente y supieron tolerar nuestras ansiedades.

Primero que nada agradecer a Leonardo Barboni, tutor, guía y compañero en este camino. Siempre disponible a las consultas, y con actitud agradable, fue un pilar de suma importancia en este año de trabajo. Leonardo aportó ideas, explicó conceptos y nos motivó en la búsqueda incansable de información. También agradecerle por su buena onda y simpatía, atento no sólo al proyecto sino también a nuestro desempeño en el resto de la carrera.

Deseamos darle las gracias a las personas que con la mayor disposición del mundo, sacrificaron parte de su tiempo en nosotros para responder consultas concretas. Al profesor Sergio Nesmachnow por darnos una pequeña introducción sobre los modelos autorregresivos. Agradecerle también a Hong Lei Chen, ingeniero de Broadcom por la consulta sobre los amplificadores con aislación óptica. A Eduardo Pereira, Ingeniero Eléctrico especializado en generación y distribución de energía; padre de Gastón, por su disponibilidad para responder dudas referentes al consumo eléctrico.

Agradecer también a nuestras familias, por el apoyo incondicional. Padres, hermanos y primos, siempre atentos al avance del proyecto. Por saber calmarnos en los momentos de nervios, impulsarnos ante las caídas, y compartir nuestro entusiasmo frente a los éxitos. Sobre todo queremos agradecer a Beatriz y Jorge, padres de Gastón, por los asados de los domingos y por el aguante continuo. A Virginia y Gabriel, padres de Felipe, por ser un apoyo moral en esta largo año. A Elena, mamá de Marina, por sacrificar parte de su fin de semana junto a su hija, para que pueda ir al laboratorio de la facultad. Y finalmente a Mikhail, papá de Marina, que ya no se encuentra con nosotros, pero de seguro estaría orgulloso de los logros de su hija y del lindo grupo que la acompaña.

También queremos agradecer a nuestros amigos, algunos estudiantes de ingeniería y otros que transitan distintos caminos. Por mostrar interés y apoyo en el proyecto. Por entendernos cuando rechazamos una reunión o salida en grupo. Y a los que seguro nos visitarán en nuestra defensa de proyecto.

No queremos dejar afuera a los integrantes del tribunal, Federico Favaro, Javier Schandy, Juan Bazerque y Guillermo Antunez, por aceptar formar parte de este proyecto con su evaluación y crítica. Recibimos con la mejor actitud las palabras que tengan para nosotros, y esperamos que les resulte interesante nuestro trabajo.

Por último queremos agradecernos a nosotros mismos, porque no es de egocéntrico mirarse al espejo y reconocerse. Dar gracias por el esfuerzo, la actitud, y la “garra”, esa que los uruguayos siempre mencionamos. Logramos un buen trabajo y por suerte se formó un lindo grupo. No solo compartimos momentos agradables dentro de la facultad, sino también fuera de ella. Y por qué no, vamos a seguir compartiendo momentos luego de finalizada la carrera, ya como ingenieros, pero también como mejores personas.

A Samantha, Lucho, Pelvina y el Turquito.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

El proyecto DIMARI, tiene como objetivo, el desarrollo de una plataforma Hardware-Software, capaz de relevar parámetros eléctricos de un hogar, y realizar una predicción del consumo futuro. La idea es aportar conceptos claves, para el avance de los medidores inteligentes. Estos tipos de medidores, sustituirán a los actuales y formarán parte de lo que se conoce como la red inteligente o “Smart Grid”.

Podemos dividir el proyecto en tres etapas; con tópicos distintos, pero relacionados en su conjunto. En el primer capítulo realizaremos un marco teórico de las “Smart Grids”. Mencionaremos los problemas actuales, y cómo el agregado de los medidores inteligentes, puede ser una pieza clave en el desarrollo de estas redes. Además veremos las limitaciones de los medidores, y las maneras posibles de realizar una comunicación confiable con las subestaciones de distribución. También veremos como la inminente llegada del auto eléctrico a nuestras vidas, puede aumentar la necesidad de contar con medidores inteligentes.

Los capítulos dos y tres, serán dedicados al Hardware. Por un lado realizamos un estudio de los distintos tipos de medidores; características generales, necesidades, limitaciones, y el por qué de la elección de los medidores de efecto Hall. Una vez elegido y diseñado el Hardware, mostraremos la implementación, calibración y pruebas.

Para el procesamiento y análisis de los datos, probamos distintos modelos de Raspberry Pi. En el capítulo tres, mostraremos las características de este Hardware, del sistema operativo y del lenguaje Python.

En los capítulos cuatro y cinco, veremos el algoritmo predictivo. Primero un análisis teórico de su funcionamiento, y luego el desarrollo práctico del mismo en Python. Al final del capítulo cinco, haremos pruebas y simulaciones para evaluar la viabilidad del algoritmo implementado.

Finalmente, en el capítulo seis mostraremos los distintos resultados obtenidos, tanto para la adquisición de los datos, como para la predicción del consumo. Las predicciones obtenidas, si bien se pueden mejorar, son satisfactorias y cumplen los requisitos exigidos. Además veremos las conclusiones del proyecto y posibles trabajos futuros a realizar.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Prefacio

Antes de comenzar con el contenido de este proyecto de fin de carrera, nos gustaría decir algunas palabras respecto al mismo. Al mirar atrás en este año y medio de trabajo, son distintas las emociones que nos invaden. Momentos de alegría y regocijo; otros de preocupación o nervios, llegando a la desesperación. Fueron varios los inconvenientes que se nos presentaron, algunos pudimos resolver, otros los tuvimos que esquivar.

El tiempo, no fue nuestro mejor aliado, los tres integrantes del grupo trabajamos durante gran parte del transcurso de la tarea. Además, no terminamos de salvar los cursos y exámenes de la carrera, lo que también nos quitó horas de avance. Entendemos también, que no supimos aprovechar el poco tiempo que disponíamos. Tuvimos que aumentar la dedicación horaria en Diciembre para poder terminar el Hardware, y en Abril para poder terminar el Software. Si hubiéramos distribuido los tiempos de mejor manera, tal vez los resultados serían mejores. Estas enseñanzas nos quedarán para el resto de nuestra carrera profesional.

Uno de los grandes problemas al que nos enfrentamos, fue la escasez de información. Algunos de los tópicos que se tratan, son temas de actualidad, de los cuales hay poca documentación al respecto. Otro problema fue la falta de objetivos bien definidos desde el inicio, cuando pensábamos abarcar más temas de los posibles. El proyecto fue mutando a lo largo del año, y se fue adaptando a las circunstancias. Al iniciar con la idea, allá por marzo del 2016, teníamos algunos objetivos en claro, pero no muy concreta la manera de implementarlos. El tiempo nos llevo por distintos caminos, y por la toma de decisiones de carácter trascendental.

Por estas razones, consideramos que el nuestro, es un proyecto de investigación. Tal vez no en el sentido literal de la palabra. Buscamos la manera de solucionar un problema en concreto, y a través de la investigación y el estudio, logramos un resultado en particular. Tal vez este no sea el óptimo, o el más eficaz, pero se cumplieron los objetivos. Independientemente, si este trabajo es útil o no para futuras generaciones, consideramos que fue de suma importancia para el crecimiento de nosotros mismos como ingenieros.

Grupo DIMARI

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	VII
Prefacio	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Smart Grid	1
1.2.1. Marco de aplicación	3
1.2.2. PMUs y Sincrofasores	4
1.3. Medidores Inteligentes	6
1.3.1. Introducción	6
1.3.2. Principales características	7
1.4. Comunicación	8
1.4.1. Introducción	8
1.4.2. El rol de las comunicaciones en Smart Grid	8
1.4.3. Tipos de tecnologías de comunicación	9
1.4.4. Power Line Communications	10
2. Hardware de medición	15
2.1. Introducción:	15
2.1.1. Aislación galvánica	16
2.1.2. Tipos de medidores	17
2.2. Medidores	19
2.2.1. Medidor de Voltaje	19
2.2.2. Medidor de corriente	25
2.2.3. ADC	27
2.3. Calibración de los instrumentos	28
2.3.1. Calibración según fabricante del sensor de voltaje	28
2.3.2. Nuevo método de calibración	29
2.4. Pruebas experimentales	33
2.4.1. Sensor ACS712	33
2.4.2. Medidor de voltaje en DC	35
2.4.3. Medidor de voltaje en AC	39
2.4.4. Medidor de Corriente LTS 25-NP	41

Tabla de contenidos

2.4.5. Conversor ADS1015	43
3. Raspberry Pi	45
3.1. Introducción	45
3.2. Hardware	45
3.2.1. USB	47
3.2.2. Fuente de Alimentación	48
3.2.3. Reloj de tiempo real	48
3.2.4. GPIO	48
3.3. Sistema Operativo	50
3.4. Python	50
3.4.1. Generalidades del lenguaje	50
3.4.2. Paquetes	51
3.5. Conexión	51
4. Algoritmo Predictivo	53
4.1. Series Temporales	53
4.1.1. Componentes de una Serie Temporal	54
4.1.2. Otros aspectos a estudiar	58
4.1.3. Clasificación de Series Temporales	60
4.2. Análisis Descriptivo	62
4.2.1. Análisis de Tendencia	62
4.2.2. Análisis de estacionalidad	63
4.2.3. Predicción mediante descomposición:	65
4.3. Modelo ARMA:	67
4.3.1. Modelo de Media móvil (MA):	67
4.3.2. Modelo Auto-regresivo (AR):	70
4.3.3. Autoregressive Moving Average (ARMA)	71
5. Software	79
5.1. Código General	79
5.1.1. Tiempos de ejecución	80
5.1.2. Implementación del Código	81
5.2. Etapa A: Medición	83
5.2.1. Fase A1: Adquisición de Datos	84
5.2.2. Fase A2: Tratamiento de Señales	87
5.2.3. Fase A3: Cálculo de Potencia	89
5.3. Etapa B: Predicción	91
5.3.1. Fase B1: Lectura de Datos	92
5.3.2. Fase B2: Modelado	93
5.3.3. Fase B3: Predicción	94
5.4. Simulación, Errores y Pruebas	95
5.4.1. Métodos Etapa A: Medición	96
5.4.2. Métodos Etapa B: Predicción	100

6. Conclusión y Trabajos futuros	109
6.1. Conclusiones referentes al hardware	109
6.1.1. Hardware de medición	109
6.1.2. Conversor analógico digital	110
6.1.3. Raspberry Pi	110
6.2. Conclusiones referentes al software	110
6.3. Conclusiones referentes a la predicción	111
6.4. Trabajos Futuros	112
A. Smart Grids	113
A.1. Transitorios en el hogar	113
A.2. Auto eléctrico	113
B. Tipos de comunicación	117
B.1. Tecnologías Cableadas	117
B.2. Tecnologías Inalámbricas	118
C. Hardware	121
C.1. Proceso de elección del hardware	121
C.1.1. YoMo	121
C.1.2. Medidor óptico	122
C.2. Transferencia del medidor de voltaje ACS712	126
D. Procesos Estocásticos	131
D.1. Vinculación con las Series Temporales	131
D.2. Características de los Procesos Estocásticos	132
D.3. Procesos Estacionarios	132
D.4. Funciones de Autocorrelación (ACF y PACF)	133
D.5. Procesos Ergódicos	135
D.6. Estimación de características del proceso	136
E. Librerías Python	137
E.1. Librería ADS1x15	137
E.2. Librería Time	139
E.3. Librería numpy	140
E.4. Librería matplotlib	141
E.5. Librería math	141
E.6. Librería statsmodels	142
E.7. Librería Pyflux	142
Referencias	145
Índice de tablas	147
Índice de figuras	148

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del proyecto

La principal motivación, surge de los perfiles de carrera de los integrantes. Felipe, con el perfil de potencia. Marina y Gastón con telecomunicaciones. La idea fue desarrollar un proyecto que integre los dos perfiles, y de ahí surge el tema de las Smart Grids.

Cuando le planteamos la idea a Leonardo, nos propuso un camino posible. Este nos resultó interesante, ya que además englobaba otras ramas de la ingeniería eléctrica; como la electrónica, la programación y control. Nos gustó la idea de tener que desarrollar un Hardware y Software propio, que involucre lectura y análisis de datos.

Por otro lado, queríamos tratar un tema de actualidad, y creemos que las redes inteligentes van a ser de vital importancia en el futuro próximo.

1.2. Smart Grid

Para comprender el concepto de “Smart Grid” comenzamos por dar una introducción a lo que es el sistema eléctrico en la actualidad ¹. Se divide el sistema eléctrico en tres grupos:

- Generación: Transforma otros tipos de energía, en energía eléctrica. Ya sea a partir de fuentes renovables, como hidráulica, eólica, fotovoltaica; o de fuentes no renovables, como nuclear o fósil.
- Transmisión y Distribución: Es el transporte de la energía eléctrica desde los generadores hasta los consumidores.

¹Se entiende por sistema eléctrico a la red eléctrica, desde el punto donde se genera la energía, hasta el consumidor, sea éste residencial o industrial.

Capítulo 1. Introducción

- Consumidores: Tanto residenciales como industrias, son los que utilizan la energía eléctrica como alimentación para sus equipos.

Del punto de vista de la generación, las principales fuentes de energía han sido a lo largo de los años la hidroeléctrica (grandes represas) y la generación termoeléctrica a base de combustibles fósiles (y en algunos países también combustible nuclear).

Respecto al transporte de la energía hacia los consumidores, observamos grandes redes de transmisión y distribución, que se extienden por centenares de kilómetros llevando enormes cantidades de energía a diversos puntos.

Varios son los ejemplos sobre la dificultad de mantener estas redes activas de forma continua. Uno de ellos es el Apagón del Noroeste de Estados Unidos de 1965, que afectó a 30 millones de personas y duró 14 horas. Otro ejemplo más reciente, es el Apagón en India en el 2012, que afectó a 700 millones de personas. A medida que pasa el tiempo, el desafío de mantener las redes activas va en aumento. Por este motivo es que aparece el “EMS” (Energy Management System) y el “SCADA” (Supervisory Control And Data Acquisition).

El EMS es el sistema utilizado actualmente para monitorear, controlar y optimizar la performance de la generación y/o sistema de transmisión de energía. Es la herramienta que ayuda a los operarios a cargo, a tomar las decisiones correspondientes, con el fin de mantener el suministro eléctrico, o restablecerlo en caso de fallas.

El SCADA es el software de adquisición de datos en el cual se apoya el EMS. [19,20]. El diagrama de la figura 1.1 ilustra la interacción de red eléctrica-SCADA-EMS.

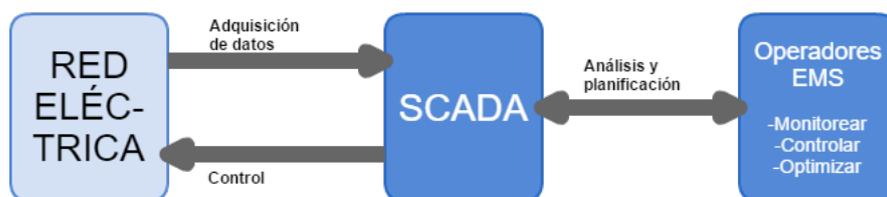


Figura 1.1: Interacción de red eléctrica con el sistema SCADA-EMS.

Finalmente, los consumidores son las cargas que ve el sistema eléctrico. Estas cargas tienden a ser cada vez más grandes, y presentan cambios más abruptos, dificultando el control eficiente de la red. En el apéndice A, veremos los transitorios que pueden llegar a aparecer en una residencia, y los efectos de la llegada del auto eléctrico sobre la red.

1.2.1. Marco de aplicación

Vamos a analizar las nuevas tendencias respecto al tema de las Smart Grids. Observaremos cada sector, y los nuevos retos a superar.

Por parte de la generación, hay un gran crecimiento de las “energías renovables no tradicionales”. Las de mayor peso hoy en día son la Energía Eólica y de forma creciente la Energía Fotovoltaica. Estos tipos de generación, dependen de las condiciones climáticas, lo que produce que varíe la energía que se genera de forma brusca. Como consecuencia, se carga o descarga la generación total del sistema eléctrico, donde se sigue un modelo en el cual la generación de energía se ajusta según la curva de la demanda². También estos cambios bruscos de voltaje y formas de generación pueden provocar desequilibrios en la red que deriva en fluctuaciones en la frecuencia.

Por parte de los consumidores, estos cada vez más desean consumir de forma eficiente y de manera mas regulada. También desean ser capaces de generar su propia energía, no únicamente para auto suministrarse, sino que también invirtiendo la dirección del flujo de potencia e inyectándola a la red, trabajando de este modo como generadores.

Aparecen además nuevas tecnologías como convertidores DC-DC que se utilizan en los electrodomésticos del hogar y pueden llegar a inyectar armónicos a la red. Por otro lado; y el tema que nos compete, el usuario de hoy en día desea saber a ciencia cierta, que elementos del hogar le generan más gastos. Aquí es donde los medidores inteligentes cumplen un rol fundamental en las Smart Grids. Son la conexión del consumidor final, con la red.

Por último, en la transmisión-distribución, quienes planifican y controlan el flujo de potencia, toman como supuesto que el suministro se cortará en algún momento, y que es imposible asegurar la red al 100 %. El objetivo entonces es reducir al máximo los casos de corte y restablecer la energía lo más rápido posible, en caso de que suceda. Es debido a los cambios que aparecen en los tres sectores: generación, transmisión-distribución y consumidor, que surge la necesidad de implementar una nueva forma de testear las condiciones de la red.

En vista a lo mencionado, damos lugar a nuestro concepto de una red inteligente:

“Una red inteligente es aquella capaz de trabajar de forma eficiente la energía, introduciendo suministros de energía renovables no convencionales. La red inteligente también debe ser robusta, disminuir y aislar al máximo, las posibles contingencias que afecten al suministro y en caso de que sucedan, restablecer el mismo de forma inmediata.”

²Tradicionalmente, se estudia la curva de demanda, se realiza una predicción de ésta, y en base a los resultados obtenidos se planifica cómo debe ser la generación.

Capítulo 1. Introducción

Por consiguiente, el sistema de monitoreo, control y optimización debe ser replanteado. Se implementa una nueva forma de adquisición de datos a través de los PMU (“Phasor Measurement Unit”). Actualmente trabaja en paralelo con el SCADA, pero se propone suplantar en un futuro al mismo. Daremos una introducción sobre los PMUs en la siguiente sección.

La figura 1.2 ilustra la tendencia de adquisición de datos y control sobre la red eléctrica en la actualidad, que combina el SCADA con los PMUs [19] [20].

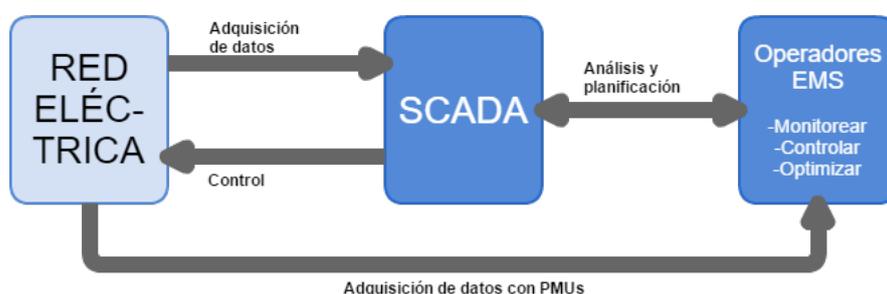


Figura 1.2: Interacción de red eléctrica con el sistema SCADA-EMS y PMUs.

En este proyecto se investigaron los avances relacionados al Smart Grid, del lado del cliente. Se trató de implementar un hardware de aplicación residencial, que brindase nuevos datos de investigación a las Smart Grids. Automatizando de esta manera los procesos involucrados, y acelerando al máximo las respuestas a los contingencias que aparezcan.

1.2.2. PMUs y Sincrofasores

Las nuevas tecnologías de las Smart Grids, utilizan sistemas de monitoreo colocados estratégicamente, llamados PMUs. Estos miden de forma instantánea los valores de voltaje, corriente y frecuencia. Una de las principales ventajas, es su alta frecuencia de muestreo, típicamente de 30 o más muestras por segundo. Comparada con la tecnología convencional, son más rápidas ya que estas reportan cada dos a seis minutos.

También designan a cada muestra un tag de tiempo, con referencia a un tiempo universal. Esto les permite obtener la fase entre el voltaje y la corriente, formando un fasor (vector conformado por módulo y fase) de voltaje y corriente.

Al estar los tiempos referenciados a uno universal, se logra una sincronización de todos los fasores de la red, por lo que se les denomina **sincrofasores**. Como los sincrofasores están ubicados en distintos puntos de la red, es posible observar el estado de la misma de forma confiable, tanto en el presente, como dejar registro

de los acontecimientos pasados.

La utilización de los sincrofasores viene en aumento desde el 2004, cuando los gobiernos de Estados Unidos y Canadá reportaron que la mayoría de los apagones ocurridos en Norteamérica, se debían a una mala observación de la red eléctrica. El resultado fue la recomendación de utilizar tecnología basada en sincrofasores.

Los componentes básicos de un sistema de sincrofasores son [32]:

- **Phasor Measurement Unit (PMUs):**
Es el dispositivo que sensa el voltaje, corriente y desfase, y les asigna un tag de tiempo con referencia a un tiempo universal. De esta manera se crean los sincrofasores. Luego la información es enviada a los PDCs.
- **Phasor Data Concentrators (PDCs):**
Son computadoras con software encargado de recolectar la información enviada de varios PMUs. Esta información luego de ser chequeada, se alinea con los distintos fasores respecto a su tag de tiempo, y finalmente se envía todos los datos al centro de procesamiento correspondiente.

La figura 1.3 ilustra un ejemplo de un sistema con sincrofasores. Los PMUs se colocan en diversos puntos de la red de transmisión y en subestaciones. Estos mandan la información que recaban a la PDC, y esta a su vez al centro de procesamiento.

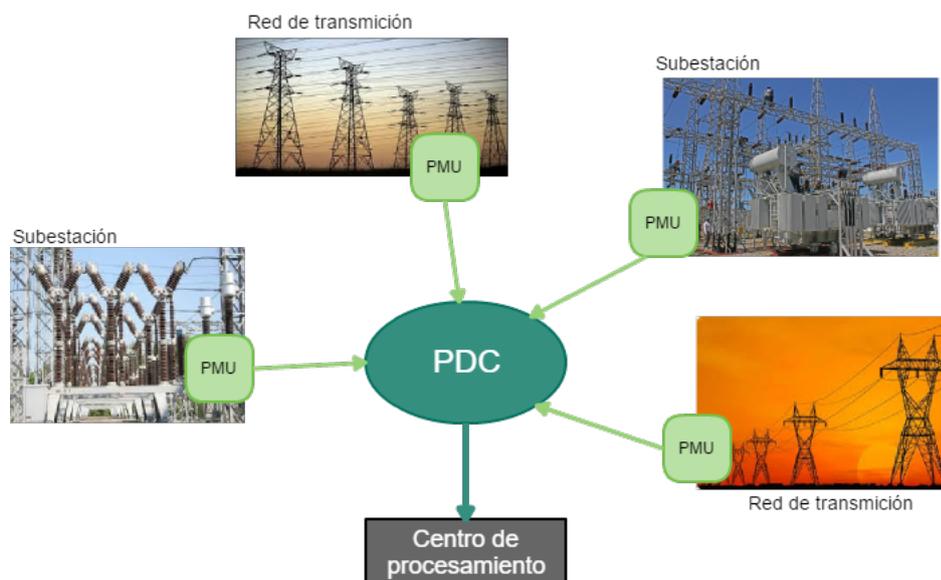


Figura 1.3: Sistema eléctrico con sincrofasores.

Capítulo 1. Introducción

Los sincrofasores son utilizados para el análisis de red tanto, instantáneo como preventivo. Nombraremos algunos de cada tipo a modo ilustrativo.

El análisis instantáneo actúa en tiempo real sobre la falla. Estos pueden ser:

- Monitoreo de la red.
- Detección de oscilaciones.
- Control de estabilidad en la frecuencia.
- Monitoreo en la estabilidad del voltaje.
- Detección de perturbaciones.
- Estudio de sistema de alarmas.
- Conexión de generadores a la red.
- Estimación de potencia.
- Corte y reconexión de energía por sectores aislados.

Los sistemas preventivos involucran: análisis post evento y validación de los modelos de carga de la red. [31]

1.3. Medidores Inteligentes

1.3.1. Introducción

Al principio del proyecto, decidimos enfocarnos en el ambiente residencial. Por esta razón, cuando nos referimos a medidores, siempre es en relación a medidores en el hogar, y no medidores industriales o de alto voltaje.

Un medidor inteligente es un dispositivo electrónico que registra el consumo de energía en intervalos regulares, y presenta la información al usuario mediante una interfaz gráfica.

Permite la comunicación de ida y vuelta entre el medidor y el sistema central, posibilitando la toma de decisiones, como el apagado y/o encendido del flujo de energía [21].

Esta comunicación bidireccional es la principal diferencia entre un medidor inteligente y uno tradicional.

La interacción con el usuario, es de particular interés a la hora de diseñar un medidor residencial. Los usuarios desean cada vez más formar parte de las redes inteligentes, quieren comprender de mejor manera el consumo en su hogar, y poder ajustar el uso de los dispositivos eléctricos, acorde al precio de la energía.

Además de utilizar los medidores para controlar la factura eléctrica, pueden ser

1.3. Medidores Inteligentes

instalados en Smart Grids y aportar al monitoreo, coordinación de flujo de energía o reconfiguración de la red cuando hay un problema localizado [23].

Las principales características que debe tener un medidor inteligente son:

- Recolección, almacenamiento y procesamiento de datos (Voltaje, corriente, potencia activa y reactiva).
- Comunicación de dos vías.
- Capacidad de programación.
- Capacidad para restaurar en caso de emergencia ³.
- Bajo consumo eléctrico en relación a la carga, para no alterar las mediciones.
- Posibilidad de apagar o encender la carga.
- Interfaz de usuario que permita acceder a los datos almacenados de manera remota.

La construcción de una ciudad inteligente es un tema de la actualidad en el mundo, y las Smart Grids son una parte importante de las mismas. Boulder Colorado fue anunciada en 2008 como primera ciudad en América en implementar una red inteligente. La ciudad instaló medidores de energía inteligentes para todas las familias, permitiéndoles ajustar automáticamente el uso de los electrodomésticos, de acuerdo al precio de la energía; optimizando el uso de los paneles solares, aerogeneradores y otras fuentes de energía renovable. Las subestaciones pueden recolectar la información de todos los usuarios, y reconfigurar la red ante algún problema [23].

Así como el caso de Boulder Colorado, cada vez más ciudades en el mundo están pasando a este nuevo modelo de la red, por lo que el diseño de un buen medidor inteligente es vital para el correcto desarrollo de la misma.

1.3.2. Principales características

Lo primero que se debe tener en cuenta a la hora del diseño de un medidor inteligente, es que el mismo estará conformado por dos partes diferenciales y aisladas una de la otra. Una primera parte, en contacto directo con la red del hogar, se encarga de generar señales analógicas proporcionales a los valores de corriente y voltaje. En la sección 2.1 veremos distintas maneras de generar dichas señales.

La segunda parte del medidor, es la unidad de procesamiento y análisis (UPA). La misma cumple la función de muestrear las señales analógicas, y procesarlas para poder adquirir distinta información que se le pueda solicitar pedir al medidor. Como la UPA trabaja con voltajes mucho menores (5 o 3,3V) que la red eléctrica

³Los medidores tradicionales requieren encendidos manuales.

Capítulo 1. Introducción

de un hogar, es de vital importancia contar con aislación galvánica entre ambas partes. Picos de voltaje o cortocircuitos pueden dañar permanentemente los equipos, o incluso atentar contra la vida de las personas que lo manipulan.

Distintos tipos de aislación galvánica fueron estudiados durante el desarrollo del proyecto (transformadores, acopladores ópticos, efecto hall). También en la sección 2.1 informaremos en detalle las principales características de los mismos, y las razones que nos llevaron a elegir uno en particular.

Otra parte importante del medidor inteligente es el módulo de comunicación. Es el encargado de enviar la información ya procesada por el medidor, a un concentrador o subestación que acumule todos los datos de un área o barrio específico. En la próxima sección analizaremos los distintos tipos de modos de comunicación.

Por último, el medidor puede controlar en caso de ser necesario, con algún sistema de relés, el encendido o apagado de la carga del hogar. Si la residencia cuenta con micro-generación, ya sea paneles solares o aerogeneradores, el medidor puede ante una falla de la red, alimentar al hogar con baterías cargadas previamente. Incluso en un futuro se podría hacer que la subestación maneje de manera remota al medidor, y encienda o apague la micro-generación de los distintos hogares del barrio de acuerdo a las necesidades de la red. Por supuesto que por ahora son sólo ideas, pero con que el medidor cuente con salidas programables y un procesador que maneje distintas peticiones, ya se deja la posibilidad abierta para que se implemente en el futuro.

1.4. Comunicación

1.4.1. Introducción

En esta sección presentaremos los distintos tipos de tecnologías de comunicación utilizados en Smart Grid, haciendo énfasis en PLC (“Power Line Communication”). Elegimos profundizar en esta tecnología en particular, porque nos pareció una forma no convencional de transmisión de datos. Además, sabiendo que no es una tecnología muy usada, nos resultó interesante investigar el tema y descubrir sus ventajas e inconvenientes, para ver la posibilidad de implementarla en nuestro medidor.

1.4.2. El rol de las comunicaciones en Smart Grid

Toda la información recogida de los dispositivos de medición y monitorización, debe ser compartida de manera segura y confiable a sistemas de gestión de la energía. Dichos sistemas son responsables de analizar los datos, predecir y detectar fallas, faltas de energía o perturbaciones en la red y tomar decisiones para controlar el sistema de potencia.

1.4. Comunicación

La infraestructura de comunicación consiste en un conjunto de tecnologías, protocolos y redes que soportan la comunicación entre dispositivos o subsistemas de red, y permiten la distribución de información y comandos dentro del sistema de energía. Los requisitos básicos de dicha infraestructura son: la seguridad, escalabilidad y fiabilidad.

La seguridad es importante, porque se manejan datos de usuarios, que pueden ser privados. Tiene que ser escalable, para crecer a medida que aumente la cantidad de cliente. Y los datos transmitidos deben ser fiables, para el correcto análisis de la información.

En la figura 1.4 se puede visualizar un ejemplo de infraestructura de comunicación para Smart Grid. [11]

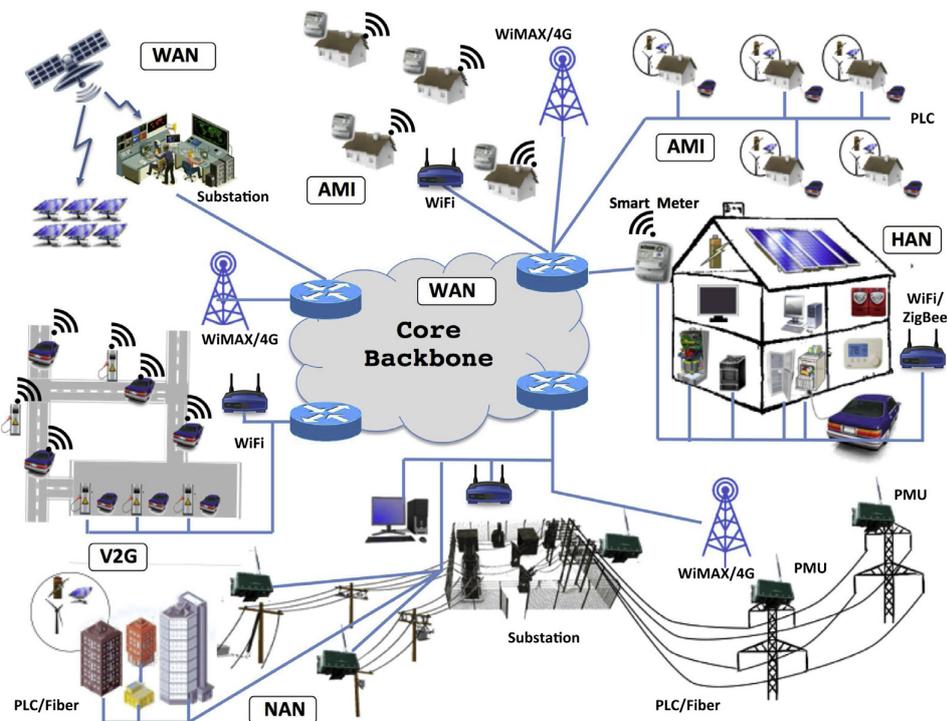


Figura 1.4: Infraestructura de comunicación para Smart Grid.

1.4.3. Tipos de tecnologías de comunicación

Las tecnologías de comunicación se clasifican en dos grandes grupos: tecnologías cableadas y tecnologías inalámbricas. Las tecnologías cableadas se consideran superiores a las inalámbricas con respecto a la seguridad, fiabilidad y anchos de banda. Además, los equipos son más baratos de comprar y de mantener.

Capítulo 1. Introducción

Por otra parte las redes inalámbricas garantizan bajos costos de instalación; permiten un despliegue flexible con un cableado mínimo, lo cual facilita la conectividad. Los recientes avances de las tecnologías inalámbricas logran alcanzar altos anchos de banda para la transmisión de datos, comparables con las redes cableadas.

En el apéndice B resumimos los distintos tipos de comunicación.

1.4.4. Power Line Communications

Power Line Communications (PLC) permite ofrecer servicios de telecomunicaciones a través de la red eléctrica. Utiliza las líneas de energía eléctrica para la transmisión de datos. La señal eléctrica y la señal de datos, comparten el medio de transmisión, sin embargo lo hacen a diferentes frecuencias.

Esta idea surgió a principios del siglo XX, [27] y desde entonces las empresas eléctricas han estado usando esta tecnología para medición y control a distancia de la carga, utilizando al principio banda angosta de una única portadora.

A medida que se desarrollaba la tecnología y el campo de aplicación aumentaba, empezó a aparecer PLC de banda ancha, que operaba en la banda de alta frecuencia (2-30 MHz), con velocidades de datos hasta 200 Mbps.

En los últimos años apareció el termino de alta tasa de datos NB-PLC (Narrow Band PLC), basado en múltiples portadoras y que trabaja en la banda entre 3-500 kHz.

PLC se utiliza para proporcionar acceso a Internet de banda ancha a clientes residenciales, conectividad LAN de banda ancha en el hogar, oficina o vehículos. También tiene capacidad de manejo y control para automatización y medición remota. El mayor incentivo de utilizar este tipo de tecnologías, es que la red eléctrica cuenta con una infraestructura mucho mas extensa que cualquier otra tecnología cableada o inalámbrica. De este modo, prácticamente cualquier dispositivo con alimentación puede convertirse en un dispositivo de transmisión de datos.

Clases de tecnología PLC

Existen tres clases de tecnología PLC:

- **Ultra Narrow Band (UNB):**

Se trata de tecnologías que trabajan a una velocidad de datos muy baja (alrededor de 100 bps), en una banda de frecuencia ultra baja (0.3 a 3 kHz), o en la parte superior de la banda de super bajas frecuencias (30 a 300 Hz). UNB tiene un rango de operación enorme (de mas de 150 km). Aunque la velocidad de transmisión de datos por enlace es baja, los sistemas utilizan direccionamiento eficiente.

- **Narrow Band (NB):**

Estas tecnologías operan a frecuencias del rango de 3 a 500 kHz. Se tienen dos velocidades, Low Data Rate (LDR): tecnologías de portadora única

capaces de transmitir pocos kbps. Luego tenemos High Data Rate (HDR): tecnologías de varias portadoras con velocidades de datos que van desde decenas de kbps hasta 500 kbps.

- **Broad Band (BB):**

Tecnologías que operan en rangos de frecuencia de 1.8 a 250 MHz y tienen una tasa que oscila entre varios Mbps y cientos de Mbps. [17]

Aplicaciones

Las aplicaciones de estas tecnologías varían dependiendo del tipo de red (alta, media o baja tensión). A continuación mostraremos algunos ejemplos de aplicación, según la categoría de red a la que pertenece:

- **Alta Tensión:**

La comunicación fiable es de vital importancia en estos casos. Algunas aplicaciones son: estimación de estado de la línea (PMU), retransmisión de protección, transmisión de SCADA a estaciones remotas, vigilancia y control de estaciones remotas, detección de fallas.

Existen tecnologías PLC que operan sobre líneas de corriente alterna y continua de hasta 1,1 kV en la banda de 40-500 kHz; que permiten velocidades de transmisión de datos de cientos de kbps, desempeñando un papel importante en dichas redes, debido a su alta fiabilidad y alcance.

Las líneas de alto voltaje son buenas guías de onda ya que presentan un comportamiento pasabanda e invariabilidad en el tiempo. El ruido es causado principalmente por fugas o descargas y se pueden observar fluctuaciones de la potencia del ruido, debidas a las condiciones climáticas.

Comparando con media y baja tensión, las líneas de alta tensión son un medio de comunicación mas eficiente debido a su baja atenuación.

- **Media Tensión:**

Un requisito importante para las redes inteligentes, es que los datos puedan transferirse entre las distintas subestaciones. En el caso de localización y aislamiento de fallas, y la restauración de servicio, los IED (“Intelligent Electronic Devices”) de la subestación deben comunicarse con IEDs externos, tales como interruptores, reconectores o seccionadores. Todas estas comunicaciones requieren una conectividad a baja velocidad, lo cual es compatible con PLC.

- **Baja tensión:**

La mayoría de las aplicaciones Smart Grid de baja tensión, se encuentran en el área de AMR(Automatic Meter Reading) / AMI(Automatic Metering

Capítulo 1. Introducción

Infraestructura)⁴, comunicación de vehículos eléctricos, DSM (Demand Side Management) y gestión de energía en el hogar. A continuación mencionaremos algunas aplicaciones:

1. Lectura Automática de medidores e infraestructura avanzada de medición:

Además de la lectura básica en un solo sentido en el caso de AMR, los sistemas AMI proporcionan comunicaciones bidireccionales, que permiten intercambiar información con dispositivos del cliente. También AMI proporciona utilidades para interactuar con medidores, y habilita a los usuarios a ver el consumo de energía en tiempo real.

En UNB PLC no se necesita ningún tipo de acondicionamiento, como en otros de mayor frecuencia.

2. Vehículo Eléctrico:

Un vehículo eléctrico (EV) carga su batería cuando está conectado a un equipamiento de suministro de energía eléctrica (EVSE), que a su vez está conectado a la red de baja tensión o a la red de distribución (Ver apéndice A.1).

Habilitando el canal de comunicación, se puede por ejemplo controlar el pico de carga que se genera al conectar el vehículo a la red. La existencia de un enlace de comunicación entre el vehículo y el EVSE será vital para este tipo de aplicaciones.

3. DSM - Gestión de la demanda:

Una de las principales aplicaciones de gestión de la demanda en lado de baja tensión es DR (Demand Response). DR se refiere a la capacidad de hacer que la demanda responda al suministro variable de generación que no se puede programar de forma determinista, por ejemplo generación fotovoltaica y eólica.

Mediante DR se logra aliviar los picos de consumo de energía y concientizar al cliente a un uso eficiente de la misma.

DR permitirá un mejor control de las condiciones de potencia de pico, maximizar el uso de la energía disponible y aumentar la eficiencia del sistema.

4. Ambiente hogareño: Existen posibilidades de vincular Smart Grid con HEMS(Home Energy Management System), y estos sistemas ayudarán a fomentar el cambio de comportamiento de los consumidores frente al uso de la energía.

Los HEMS pueden aportar diferencias sustanciales en los servicios públicos, en términos de mejorar la fiabilidad de la red, así como la reducción de la demanda máxima.

⁴Tecnología de recolección automática de consumo, diagnóstico y datos de un medidor, y de transferencia de dichos datos a una base de datos central para la facturación, resolución de problemas y análisis.

Un HEMS puede servir de sensor de una manera mucho más completa y eficaz que lo que un medidor inteligente AMR. Mientras que el AMR es un sensor de bajo costo y sólo puede informar de la demanda instantánea, un HEMS podría informar a la empresa de servicios públicos la demanda prevista de energía, y proporcionar funciones de detección más complejas.

La capacidad de pronóstico de un HEMS podría ser muy precisa, ya que se basaría en el “estado” del hogar y en el modelo de conducta construido sobre la actividad del consumidor. El estado del hogar seguido por un HEMS podría incluir: la demanda actual y prevista de un aparato a medida que avanza a través de su ciclo de servicio; niveles de almacenamiento de baterías; cantidad de demanda cambiada por el consumidor (cola de servicio), etc.

Ventajas e inconvenientes

Debido a que las redes eléctricas no fueron creadas con el propósito de transmitir datos existen múltiples inconvenientes.

Los problemas que tienen mas impacto, son las múltiples interferencias presentes en la red eléctrica, y la atenuación de la señal en las frecuencias de interés; limitando de esta forma el despliegue y la implantación de esta tecnología.

El sistema debe ser capaz de evitar cualquier tipo de interferencia para poder funcionar adecuadamente. Es sumamente difícil obtener un modelo del ruido y las atenuaciones del canal, debido a la constante conexión y desconexión de dispositivos.

Los aspectos técnicos que limitan el correcto despliegue de la red PLC son:

- Líneas eléctricas en mal estado. La tecnología debe proporcionar fiabilidad y seguridad de transmisión de los datos, lo cual se dificulta en el caso de las líneas eléctricas deterioradas.
- Problemas en largas distancias (atenuación). Además las distancias deben ser cortas, ya que de lo contrario provoca un costo mucho mayor para el despliegue de la red, a causa de la instalación de repetidores.
- Relación señal a ruido.
- Múltiples interferencias.

Uno de los asuntos que más preocupa a fabricantes y a futuros proveedores de servicios PLC es el de la legislación, ya que no existe un marco regulatorio y normativo totalmente definido.

Otro problema es la seguridad de la información, que al no estar muy protegida en este tipo de redes, se convierte en foco de interés para hackers.

Capítulo 1. Introducción

La mayor ventaja que tiene esta tecnología es que cuenta con la infraestructura ya desplegada, lo cual abarata considerablemente la red respecto a otras. Además de brindar servicio de telecomunicaciones sigue brindando servicio de la red eléctrica. A nivel de usuario es accesible y las velocidades de conexión son superiores a otras tecnologías.

Incompatibilidad con DIMARI

Analizando las ventajas e inconvenientes de la tecnología PLC, vemos que no resulta útil para los propósitos y objetivos de nuestro proyecto. En primer lugar, las unidades acondicionadoras a colocar en la subestación resultan muy costosas. A nivel de usuario esta tecnología es accesible y de fácil uso, sin embargo en nuestro caso poco aplicable, ya que en lo que mas se podría aprovechar es en la domótica lo cual se encuentra fuera de los alcances de este proyecto. Debido a lo mencionado pensamos que la mejor opción es utilizar una tecnología inalámbrica, tal como Wi-Fi.

Capítulo 2

Hardware de medición

2.1. Introducción:

Un medidor de potencia activa, calcula los datos a partir de tres magnitudes: voltaje V , corriente I y el desfase entre ambos φ . Esos valores deben ser sensados de la red a través de un hardware especializado. Luego tienen que ser digitalizados por un conversor ADC (analog to digital converter), para su posterior procesamiento. Debe que ser capaz de manipular la información, realizar las cuentas necesarias y almacenar los resultados, para que puedan ser accesibles, tanto por el cliente, como por las subestaciones.

Podemos dividir entonces a un medidor inteligente, en tres componentes principales: hardware de medición, conversor analógico digital, y unidad de procesamiento y almacenamiento (UPA).

Con el hardware de medición, logramos adquirir los datos de voltaje y corriente. Mientras que el valor de φ es determinado a partir de una operación matemática en la UPA. En este capítulo nos centraremos en el hardware de medición y del ADC.

Tenemos dos maneras posibles de sensar la corriente. Una primera opción, es transformarla a una escala adecuada para el conversor. Esto se puede lograr, mediante transformadores de corriente. La segunda opción, es convertir la corriente a medir, en otra magnitud física, por ejemplo voltaje. Este enfoque lo que busca es obtener un voltaje proporcional a la corriente a sensar. Conociendo dicha proporción, se obtiene la corriente. Dentro de esta categoría se encuentran: medidores mediante resistencia shunt; magnetoresistencias; medidores de efecto Hall; y medidores de efecto óptico.

Para sensar el voltaje de la red, se conectan dos fases mediante una resistencia de valor alto, y con las técnicas mencionadas anteriormente, se mide la corriente por dicha resistencia. Sabiendo los valores de la resistencia, y la corriente medida, podemos calcular el valor del voltaje entre fases.

Capítulo 2. Hardware de medición

Requisitos para el medidor:

A la hora de seleccionar los dispositivos de medición tanto de corriente como de voltaje, fueron varios los requisitos que se buscaron:

- Aislación galvánica: Separa eléctricamente a la red, del ADC y de la unidad de procesamiento.
- Amplio ancho de banda: Para poder ser capaces de registrar transitorios en la red.
- Que el dispositivo sea lo más simple posible en su desarrollo y de costo accesible.
- Buena precisión de la medida, para evitar errores.
- Inmunidad frente a interferencias.
- Respuesta rápida para realizar medidas en tiempo real.

Todos estos requisitos tenían por objetivo crear un hardware confiable y cuya aplicación en el campo sea tanto efectiva como viable.

2.1.1. Aislación galvánica

La aislación galvánica permite transmitir energía entre dos puntos del circuito, pero sin que estos estén conectados físicamente. Tiene la ventaja de evitar que una corriente de falla de un lado del sistema, afecte al otro. En los sistemas eléctricos es de particular interés contar con aislación galvánica, no solo para evitar roturas en los equipos, sino también para evitar accidentes en la manipulación. Tradicionalmente se puede alcanzar la aislación de las siguientes maneras:

1. Acoplamiento inductivo.
2. Acoplamiento capacitivo.
3. Acoplamiento óptico.

El acoplamiento inductivo; basado en la Ley de Inducción Magnética de Faraday, es el más comunmente utilizado. Consiste en dos bobinas acopladas mediante un núcleo ferromagnético. Al inyectar una corriente alterna por el bobinado primario, se producirá un flujo magnético variable en su núcleo. Debido al cambio en este flujo; siguiendo la ley de Faraday, se generará una corriente inducidas en el arrollamiento secundario:

$$e_1 = N1 * \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = N2 * \frac{d\Phi}{dt}$$

donde Φ es el flujo magnético por el núcleo del transformador, e_1 es el voltaje del bobinado primario impuesto por el circuito del lado primario, y e_2 es el voltaje inducido del lado secundario [26]. De esta forma, a partir de una fuente de voltaje

2.1. Introducción:

o corriente del lado primario, obtenemos una fuente de voltaje o corriente del lado secundario, sin que haya entre estos ninguna conexión mediante algún conductor, aislando una parte de la otra.

En el acople capacitivo, se introduce al circuito una barrera de algún elemento dieléctrico (no conductor), formando un capacitor. Este capacitor separa dos partes del circuito de forma tal que no existe ningún contacto conductor entre ambos, formando la aislación galvánica. Este método, es utilizado en amplificadores operacionales.

Los sensores que se basan en fotodiodos utilizan la luz para emitir señales de corriente de un punto del circuito al otro, no existiendo ningún contacto metálico entre ellos, formando la aislación galvánica.

2.1.2. Tipos de medidores

- **Transformador de corriente:**

Consiste en un transformador, cuya relación de vueltas hace que la corriente en el bobinado secundario, sea sumamente inferior a la corriente del primario. Estas bajas corrientes pueden ser conectadas a una resistencia, y con un conversor ADC, medir el voltaje por la misma. El tipo de aislación en este caso, es inductiva.

- **Resistencia Shunt:**

Un shunt, es un elemento de resistencia baja, conocido con precisión y poca disipación de potencia. Es utilizado para medir corriente, mediante la ley de Ohm. El voltaje es directamente proporcional a la corriente que circula por la resistencia shunt. Con un ADC, medimos el voltaje, y por lo tanto obtenemos la corriente. Como ventaja, tenemos que es sencillo y barato de implementar, además la proporcionalidad es directa, lo que facilita los cálculos. Este medidor tiene la desventaja de no poseer aislación galvánica. Por esta razón, no fue tenido en cuenta para nuestro proyecto.

- **Magnetoresistencias(MR):**

Son materiales que cambian su resistencia eléctrica, cuando un campo magnético es aplicado sobre ellos. La corriente a medir, genera un campo magnético, que es captada por la magnetoresistencia. Utiliza el método de acople inductivo, pero tiene la desventaja que su efecto es no lineal, y depende fuertemente de la temperatura. También tienen un error en su medida, debido a la magnetización remanente ¹.

- **Efecto Hall:**

El efecto Hall se basa en la Ley de Lorentz. La señal de corriente a medir

¹Flujo magnético que es retenido por un cierto elemento.

Capítulo 2. Hardware de medición

se aplica a un núcleo, y genera sobre él un flujo variable. Cuando una lámina conductora por la cual circula corriente (diferente a la cual queremos medir), es sometida a dicho flujo; las cargas positivas y negativas, experimentan una fuerza magnética, que las desplaza hacia lados opuestos. Se induce entonces una diferencia de potencial proporcional al campo, y por consiguiente, proporcional a la corriente a medir [14]. Como la placa y el núcleo magnético, no tienen contacto físico, se logra una aislación galvánica del tipo inductivo [21].

■ Fotodiodos:

Son semiconductores, a los cuales los rayos luminosos, generan variaciones en la corriente eléctrica. De manera inversa, si se le aplica una diferencia de voltaje emitirán luz. Utilizando dos fotodiodos en conjunto (uno de cada tipo), podemos conseguir acoplamiento óptico, y generar una corriente independiente, pero proporcional a la que queremos medir. Esta corriente proporcional resulta ser muy pequeña, por lo que se le agrega un amplificador como se observa en la figura 2.1.

En la figura 2.2 podemos ver la función de transferencia del fotodiodo. Se aprecia que la curva es similar a la de un diodo común, pero que varía ampliamente con la intensidad de corriente que está recibiendo. Como gran desventaja, se pierde completamente la linealidad. Del lado derecho de la figura podemos apreciar también la existencia de una corriente de salida, a pesar de no haber presencia de fuente lumínica, llamada "dark current". Este dato suele suministrarse por los fabricante. [28]

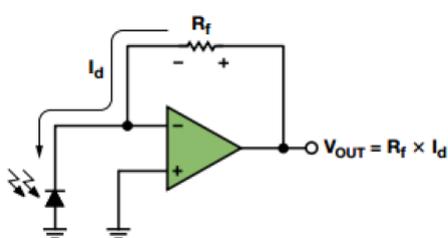


Figura 2.1: Sistema fotodiodo con amplificador.

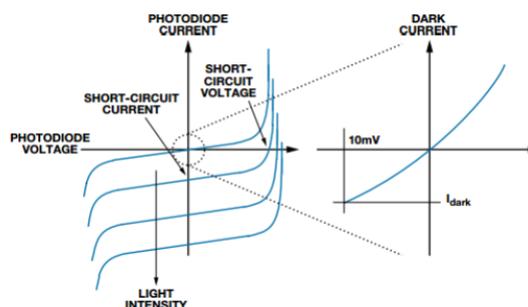


Figura 2.2: Transferencia típica de un fotodiodo.

2.2. Medidores

Un proceso de selección de medidor, nos llevó a optar por los medidores del tipo efecto Hall. En el apéndice C.1 se observa los pasos que realizamos, para tal decisión.

2.2.1. Medidor de Voltaje

Los sensores de efecto hall trabajan con medida de corriente, por lo tanto la opción que elegimos fue la de colocar una resistencia entre dos fases de la alimentación al hogar, y sensar la corriente que circula por esta resistencia. De esta forma, sabiendo el valor de la resistencia y el de la corriente que pasa por ella, despejamos el voltaje final como $V = R * I$.

Para que este tipo de diseño funcione, es necesario que la corriente que circulaba de una fase a la otra fuera lo más pequeña posible, y no generar cortocircuitos. Nos impusimos manejar corrientes de un orden máximo de 200 mA. Así evitamos el salto de protecciones y obtenemos un bajo consumo de potencia activa. Esto nos trajo el problema de que la gama de medidores de efecto hall que se encontraron, tenían un rango mínimo de medición de entre $\pm 5 A$; para la cual, su precisión era demasiado pequeña como para ser fiable.

Finalmente encontramos un medidor de la empresa “SPARKFUN” el cual cuenta dos componentes principales. El primer componente es el integrado ACS712 de “ALLEGRO”, que sensa una corriente mediante efecto Hall, y a su salida brinda un voltaje proporcional a la corriente de entrada. Luego se le adiciona un amplificador. En la figura 2.3 se muestra el sensor y en la 2.4 se ilustra un diagrama de bloques del proceso.

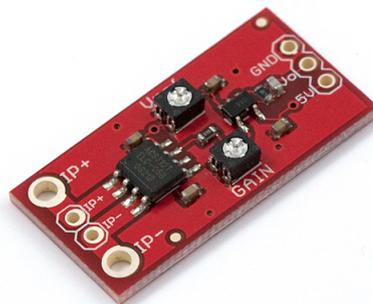


Figura 2.3: Sensor de voltaje.

Capítulo 2. Hardware de medición

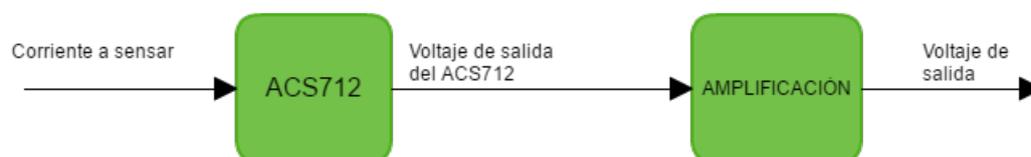


Figura 2.4: Diagrama de bloques del dispositivo completo de SPARKFUN.

El fabricante afirma que el amplificador operacional, es capaz de variar la ganancia del sistema de 4,27 a 47. Para dicho propósito, introduce dos potenciómetros: R_4 y R_3 . Afirma también que variando R_3 se logra modificar la ganancia del sistema, y variando R_4 se modifica la tensión de offset. Un capacitor al cual se denomina C_1 , actúa como un filtro pasa bajos. El modelo y calibrado del sensor será estudiado mas adelante, ahora presentamos las ventajas y principales características técnicas del medidor y el amplificador.

Características eléctricas

Integrado ACS712:

- Permite medir corriente alterna y continua.
- 80 kHz de ancho de banda.
- 1,2 $m\Omega$ de resistencia interna.
- 2,1 kV_{rms} mínima de aislación de voltaje de los pines 1-4 a los pines 5-8.
- 5,0 V, single suply operation.
- 66 a 185 mV/A de sensibilidad de salida.
- Voltaje de salida proporcional a la corriente de entrada.
- Histéresis magnética prácticamente cero.

Amplificador operacional OPA344:

- Ancho de banda: 1 MHz
- Alimentación: 5V

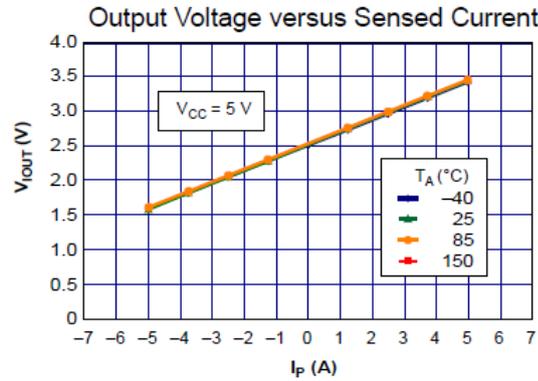


Figura 2.5: Transferencia del integrado ACS712.

Transferencia del sistema

La transferencia del integrado ACS712, la da el fabricante en la hoja de datos (Ver figura 2.5).

Los cálculos para la transferencia del sistema amplificador se pueden ver en el apéndice C.2. Descomponemos la entrada V_I del sistema amplificador en dos partes: V_{in} la componente de alterna, y V_{IN} la componente de continua:

$$V_I = V_{in} + V_{IN}$$

El resultado para la transferencia es:

$$V_o = V_{out} + V_{OUT}$$

$$V_{out} = \frac{-R_1 V_{in}}{(R_2 + R_{3y})(j\omega R_1 C_1 + 1)}$$

$$V_{OUT} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_{3y}) - KR_1}{R_2 + R_{3y}}$$

Donde V_{OUT} es la componente de continua de la respuesta y V_{out} la componente de alterna.

Ganancia y ancho de banda

Una vez hallada la transferencia del sistema, buscamos cual es la ganancia y el ancho de banda del sistema amplificador, y comparamos si se verifica con la brindada por SPARKFUN:

- Ganancia $G\epsilon[4, 27 - 47]$

Capítulo 2. Hardware de medición

- Ancho de banda: 34 kHz

Los parámetros de nuestro sistema son:

- $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 100 \text{ pF}$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$
- $x \in [0, 1]$
- $y \in [0, 1]$

Hacemos notar que el valor de los potenciómetros R_3 y R_4 no fueron dados por el fabricante. Para llegar a su valor medimos con un multímetro y verificamos en diferentes foros de Internet, donde mucha gente compartía los mismos resultados. Finalmente, comprobamos que el valor estimado de estos fuese coherente con el comportamiento del sistema. Por ejemplo, verificamos mediante el siguiente cálculo de la ganancia y ancho de banda, el valor de R_3 . El valor de R_4 no nos interesa por que no aparece en la ecuación de transferencia.

Los potenciómetros fueron modelados por su valor máximo, multiplicados por x para R_4 , e y para R_3 , valores que van de 0 a 1 y representan el porcentaje respecto al valor máximo.

Calculamos entonces la transferencia del sistema:

$$V_o = \frac{-R_1 V_{in}}{(R_2 + R_3 y)(j\omega R_1 C_1 + 1)}$$

La ganancia queda:

$$G(s) = \frac{-R_1}{(R_2 + R_3 y)(sR_1 C_1 + 1)}$$

Notar que el valor de x no aparece en ninguna de las ecuaciones anteriores. Se analizan los dos casos extremos para valores de $y = 0$ e $y = 1$

Primer caso: $y=0$

Para este caso, la ganancia nos queda:

$$G(s) = \frac{-47}{s \times 4,7 \times 10^{-6} + 1}$$

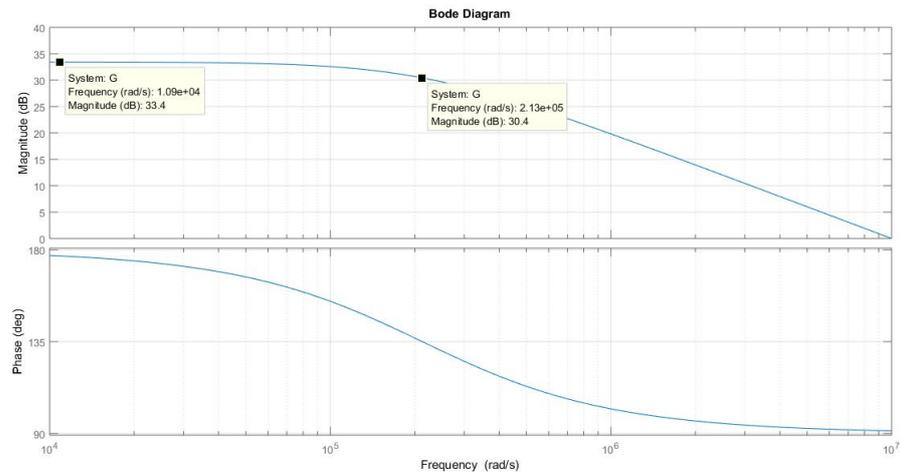


Figura 2.6: Diagrama de bode para $y=0$.

En la imagen 2.6 se seleccionaron dos puntos de importante relevancia. En el primero vemos cuál es la ganancia en decibeles: $33,4dB$. Este es el valor de ganancia máximo. Lo pasamos a valores no logarítmicos:

$$20\log(x) = 33,4$$

$$\log(x) = 1,67$$

$$x = 46,77$$

Vemos que se cumple lo estipulado por el fabricante.

Nos centramos ahora el segundo punto de la gráfica, el cual se seleccionó donde la ganancia decae 3dB. A este punto se le atribuye de forma genérica el hecho de contener la información de cual es el ancho de banda del sistema. Lo que hicimos entonces fue fijarnos cual es la frecuencia en este punto. La frecuencia como pueden ver en la figura 2.6 es de $2,13 \times 10^5 rad/s$ y queremos pasar este valor a Hz: $1Hz$ equivale a $6,28 rad/s$ aproximadamente. Finalmente, el ancho de banda resulta ser de $33,9kHz$ y una vez mas se cumple con lo que se esperaba.

Segundo caso: $y=1$

Función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-47}{s * 5,17 * 10^{-5} + 11}$$

Observemos el diagrama de bode obtenido en la figura 2.7.

Capítulo 2. Hardware de medición

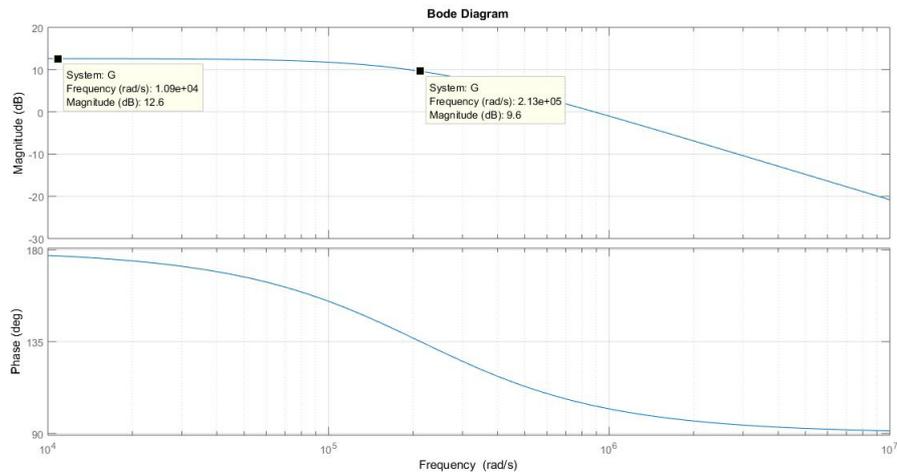


Figura 2.7: Diagrama de bode para $y=1$.

Se seleccionaron dos puntos de importante relevancia. En el primero vemos cual es la ganancia en decibeles: $12,6\text{dB}$. Este es el valor de ganancia máximo. Lo pasamos a unidades no logarítmicas:

$$20\log(x) = 12,6$$

$$\log(x) = 0,63$$

$$x = 4,27$$

Vemos que se cumple nuevamente la hoja de datos.

Analizamos ahora el segundo punto de la gráfica, el cual se seleccionó donde la ganancia decaía 3dB . A este punto se le atribuye de forma genérica contener la información de cual es el ancho de banda del sistema. Nos fijamos cual es la frecuencia en este punto. La frecuencia como pueden ver en la figura 2.7 es de $2,13 \times 10^5 \text{rad/s}$ al igual que en el caso para $y=0$, obteniendo nuevamente los $33,9\text{Hz}$ y verificando lo esperado.

Votaje de offset del sistema amplificador:

Lo último que estudiamos del medidor de voltaje es cual es el voltaje de offset introducido por el sistema amplificador. Analizamos la respuesta a una entrada constante:

$$V_{OUT} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_3y) - KR_1}{R_2 + R_3y}$$

Observamos en esta ecuación que el voltaje de offset depende tanto de la componente de continua a la entrada como de x e y . Es fácil ver que para $x = 0$ se obtiene el máximo y para $x = 1$ se obtiene el mínimo.

Finalizamos aquí el estudio teórico sobre el funcionamiento del medidor de voltaje.

2.2.2. Medidor de corriente

Este medidor utiliza también el efecto hall para sensar la corriente. Al igual que para el medidor de voltaje, lo primero que hicimos fue pensar cómo sería la implementación práctica y qué requisitos desde la red (valores a sensar) debe tener el medidor. Calculamos entonces cual puede llegar a ser el consumo de corriente de un ambiente residencial. Nos situamos en el consumo típico de una residencia en Uruguay, donde la potencia contratada suele ser de 4,4kW monofásica 230V. Calculando la corriente:

$$P = 4,4kW$$

Suponemos un peor caso de $\cos(\varphi) = 0,95$

$$P = S \times \cos(\varphi) \Rightarrow S = \frac{P}{\cos(\varphi)} = \frac{4400}{0,95}$$

$$S = 4,6kW$$

$$S = V \times I \Rightarrow I = \frac{S}{V} = \frac{4,600}{230}$$

Despejamos y obtenemos $I = 20A$ aproximadamente

El medidor se pensó para ser colocado en serie con la línea de entrada al hogar. Elegimos el sensor "LTS-25NP" del fabricante "LEM". En la figura 2.8 podemos ver el medidor. En la figura 2.9 se puede ver el esquemático del sensor, extraído de la hoja de datos. Este sensor no requiere ningún componente adicional para su operación.

Capítulo 2. Hardware de medición



Figura 2.8: LEM LTS25-NP.

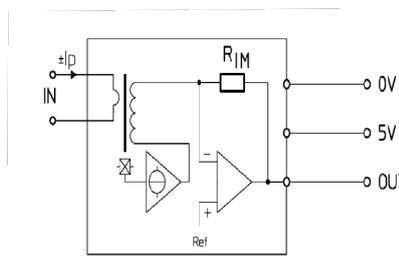


Figura 2.9: Esquemático de sensor de corriente.

Características eléctricas:

- Permite medir corriente alterna y continua.
- Corriente primaria nominal $I_{PN} = 25 A$.
- 100 kHz de ancho de banda.
- $2 k\Omega$ de resistencia de carga.
- $3 kV_{rms}$ de aislación de voltaje.
- 5 V single suply operation.
- 25 m V/A sensibilidad de salida.
- Voltaje de salida proporcional a la corriente de entrada.

Este medidor tiene la singularidad de que se puede elegir la cantidad de vueltas que da la corriente de entrada a través del bobinado principal. En la imagen 2.10 extraída de la hoja de datos se puede ver cómo elegir este parámetro. La elección en nuestro caso fue la configuración 3 para realizar medidas de laboratorio, y la configuración 1 para realizar las medidas a nivel residencial.

Number of primary turns	Primary nominal current rms I_{PN} [A]	Nominal output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	± 25	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 12	2.5 ± 0.600	0.81	0.05	
3	± 8	2.5 ± 0.600	1.62	0.12	

Figura 2.10: Posibles conexiones para el sensor LEM LTS25-np.

Transferencia del sistema

La transferencia del circuito extraída de la hoja de datos puede observarse en la figura 2.11

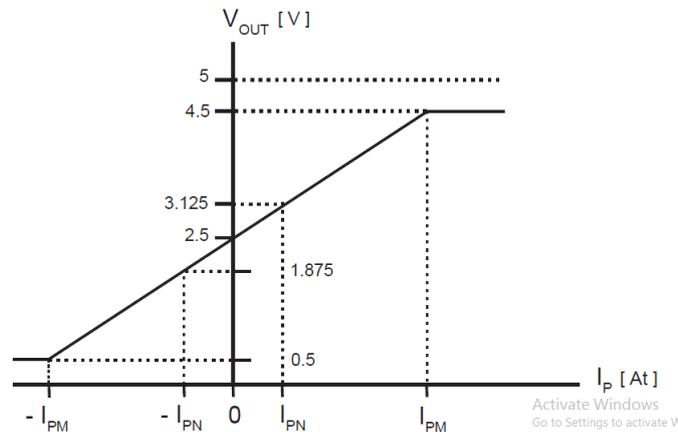


Figura 2.11: Transferencia sensor de corriente.

Armado del sensor

Fue necesario diseñar y mandar a hacer un PCB para este circuito. Siguiendo lo referido a la sección 2.2.2 y pensando en realizar primero las pruebas de laboratorio, elegimos y diseñamos la configuración 3 de la figura 2.10. Para realizar las pruebas a nivel residencial, se pueden adaptar las mismas placas.

2.2.3. ADC

Describimos las principales características del convertor analógico-digital a ser utilizado: ADS1015 de “Adafruit”.

Características eléctricas

- Comunicación puerto I2C, mediante 4 canales posibles.
- Alimentación: $V_{DD} = 2 V$ a $5,5 V$.
- Voltaje analógico de entrada máximo: $-0,3 V$ a $V_{DD} + 0,3 V$.
- Modos “continuous mode” y “single-shote mode”.
- Ganancia ajustable: $G = 2/3, 1, 2, 4, 6, 16$.

Capítulo 2. Hardware de medición

- Cuantización de 12 bits.

Vemos en la figura 2.12 como es el conversor.



Figura 2.12: Conversor analógico digital ADS1015.

2.3. Calibración de los instrumentos

En esta sección veremos como calibrar los instrumentos para prepararlos para las pruebas experimentales, y para su aplicación en el campo. El medidor de corriente no precisa calibrado, su configuración es directa y se define con la placa PCB que se diseñe. El conversor ADC se comanda directamente desde el software instalado en la Raspberry Pi (se verá en los capítulos 3 y 5). Nos dedicaremos entonces exclusivamente al calibrado del medidor de Voltaje.

Lo primero que vimos fueron las recomendaciones del fabricante respecto a cómo calibrar el sistema entero. Éste se basaba en la configuración de los potenciómetros R_3 y R_4 , que en nuestro caso se traduce a los valores de “ y ” y “ x ” como vimos en la sección 2.2.1

2.3.1. Calibración según fabricante del sensor de voltaje

El método recomendado por el fabricante entonces es el siguiente:

1. Anular la entrada al medidor ($I_{entrada} = 0$).
2. Regular el voltaje de offset del sistema variando el valor de x .
3. Conectar a la entrada un valor de corriente continua de valor $I = 100 \text{ mA}$.
4. Regular el valor de y hasta obtener el valor de ganancia deseado.

Recordemos la ecuación que relaciona la salida con la entrada de este sensor, compuesta por la transferencia del medidor ACS712 y la transferencia del sistema amplificador, observar la figura 2.5 y las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

2.3. Calibración de los instrumentos

$$V_{out} = \frac{-R_1 V_{in}}{(R_2 + R_3 y)(j\omega R_1 C_1 + 1)} \quad (2.1)$$

$$V_{OUT} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_3 y) - K R_1}{R_2 + R_3 y} \quad (2.2)$$

La salida del sistema debe corresponder con lo que puede soportar el convertidor ADC, el cual se estudió en la sección 2.2.3. Alimentando al convertidor con 3,3 V vemos que la salida máxima debe estar en el rango entre -0,3 V y 3,6 V, elegimos un rango de 0,4 V y 3,0 V para dejar un margen de seguridad.

El valor medio de la salida del sensor de voltaje debe ser entonces de $(3,0 + 0,4)/2 = 1,7$ V, con una amplitud máxima de $(1,7 - 0,4) = 1,3$ V. Observamos luego la calibración del fabricante:

1. Alimentamos el sensor. No le conectamos ninguna corriente a medir. Viendo la figura 2.5 vemos que la salida en el medidor ACS712 es de 2,5 V. Este voltaje entra luego al sistema amplificador: $K = 2,5$ V.
2. Sabiendo que la entrada del sistema amplificador tiene un valor de $K = 2,5$ V, modificamos el valor de x hasta llegar a la salida deseada: 1,7 V. Vemos aquí el primer error del fabricante: el valor de offset de la tensión de salida no depende exclusivamente de x , también depende de y . Supusimos entonces $y = 0$.
Graficamos para ver cómo varía la salida respecto de x , ver imagen 2.13. Con esta gráfica pudimos observar que la variación en x se transfiere en una variación muy brusca de la salida de voltaje. La salida se encuentra limitada por la saturación del amplificador entre 0 y 5V

Resolviendo la ecuación llegamos al valor exacto de $x = 0,5033$

3. Conectamos a la entrada un valor de corriente continua de valor $I = 100$ mA.
4. En esta parte se trata de dejar constante el valor hallado de x para no modificar el valor de offset de voltaje de la salida del sensor. Sin embargo, como se vio en 2.2.1, el valor de y influye en el valor de offset. Por este motivo se concluye que este método no es efectivo y se dedujo un nuevo método de calibración.

2.3.2. Nuevo método de calibración

Diseñamos un nuevo sistema para calibrar el sensor:

1. Conectamos a la entrada del sensor una corriente sinusoidal de amplitud 200 mA y valor medio 0. Esta corriente se eligió por ser la que se pretendía medir en el campo.

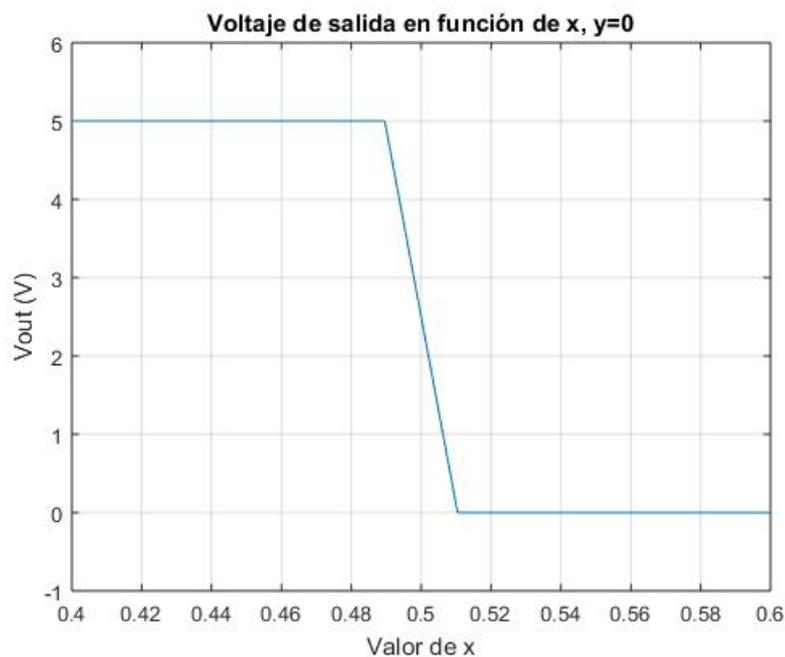


Figura 2.13: Voltaje de salida en función de x , con $y=0$.

2. Variando el valor de y obtenemos la ganancia deseada. Podemos ver en la ecuación 2.1 que la respuesta a la señal alterna no depende del valor de x , por lo que la amplitud de la señal de entrada queda sujeta al valor de y .
3. En el ítem anterior se obtuvo la amplitud querida. Ahora debemos elegir el voltaje de offset de salida deseado. Para esto variamos x (dejando fijo y) hasta obtener el valor deseado.

Como se especificó anteriormente, el objetivo es a partir de una señal sinusoidal de corriente de amplitud 200mA y valor medio nulo, obtener un voltaje sinusoidal de amplitud $1,3\text{V}$ y valor medio $1,7\text{V}$.

Una vez ideado el método de calibración, estudiamos su aplicación y los valores en los que hay que setear x y y :

1. Conectamos a la entrada del sensor una corriente sinusoidal de amplitud 200mA y valor medio 0.
2. El primer filtro por el que pasa esta señal es el medidor ACS712 cuya respuesta a la entrada es la de la figura 2.14. La salida para los valores de corriente que le ingresamos no puede apreciarse en la transferencia gráfica brindada por el fabricante. En este punto entonces se realizó un ensayo para evaluar la transferencia del medidor ACS712 y es de ahí que se extrae

2.3. Calibración de los instrumentos

el valor salida del mismo. Esto puede verse en la sección de “Prueba experimentales” 2.4.1. Observando entonces la imagen 2.17 y resolviendo el sistema de forma matemática, vemos que salida para la señal de entrada es un voltaje sinusoidal de valor medio $2,445\text{ V}$ y valores máximos y mínimos de $2,483\text{ V}$ y $2,406\text{ V}$ respectivamente. Hasta aquí la amplitud de la señal es de $(2,483 - 2,406)/2 = 38,5\text{ mV}$.

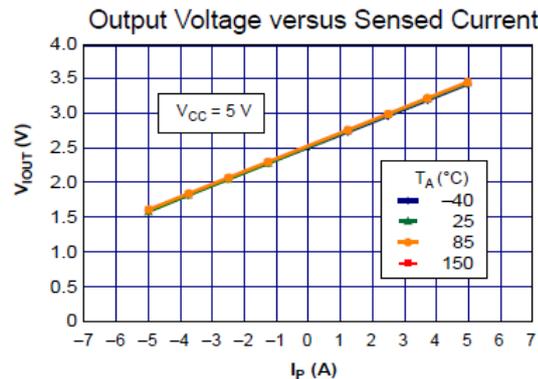


Figura 2.14: Transferencia del medidor ACS712.

Pasamos ahora al segundo filtro: el sistema amplificador. Queríamos llevar ahora la amplitud de $38,5\text{ mV}$ a $1,3\text{ V}$.

La figura 2.15 muestra cómo varía (en valor absoluto) la salida en función de y . Una vez más notamos que el medidor es muy sensible a los cambios en el valor de y . Considerando que la frecuencia de entrada del sistema es de 50 Hz , podemos despejar el valor de y de la ecuación 2.1, lo que nos da un valor de $y = 0,0392$.

- Una vez más graficamos la salida para una entrada DC de valor $k = 2,445\text{ V}$. Queríamos llevar ahora este valor a $1,7\text{ V}$. Por el punto anterior, el valor de y ya estaba ajustado. Graficamos la salida en función de x , ver imagen 2.16 y el resultado exacto es $x = 0,51531$.

El sistema queda calibrado.

Cálculo de la resistencia y análisis de potencia disipada

Realizamos el cálculo de la potencia disipada para la corriente deseada: 200 mA . Luego, en base a la corriente y potencia calculamos la resistencia a colocar entre las líneas de tensión de entrada.

La potencia disipada por el sistema resulta ser: $P = V \times I = 230 \times 0,2 = 46\text{ W}$

La resistencia debe ser: $R = V/I = 230/0,2 = 1,150\text{ k}\Omega$ y disipar 46 W . Con esta resistencia se obtienen los 200 mA deseados. Según $I = V/R$, si disminuimos el

Capítulo 2. Hardware de medición

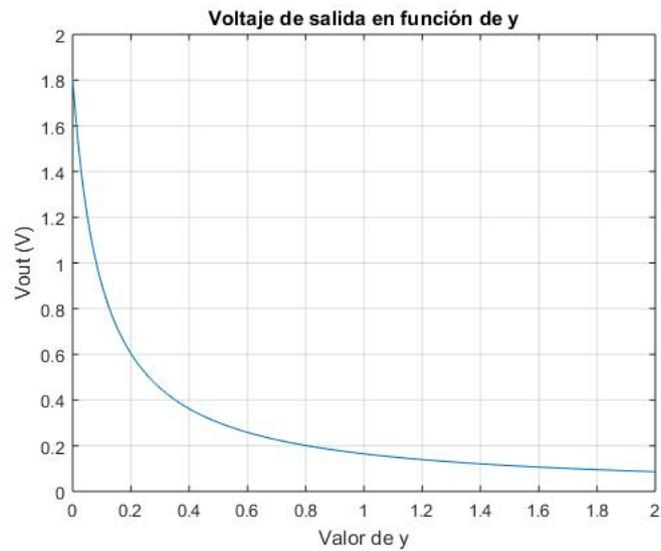


Figura 2.15: Voltaje de salida en función de y para entrada sinusoidal de amplitud 38,5mV y 50Hz.

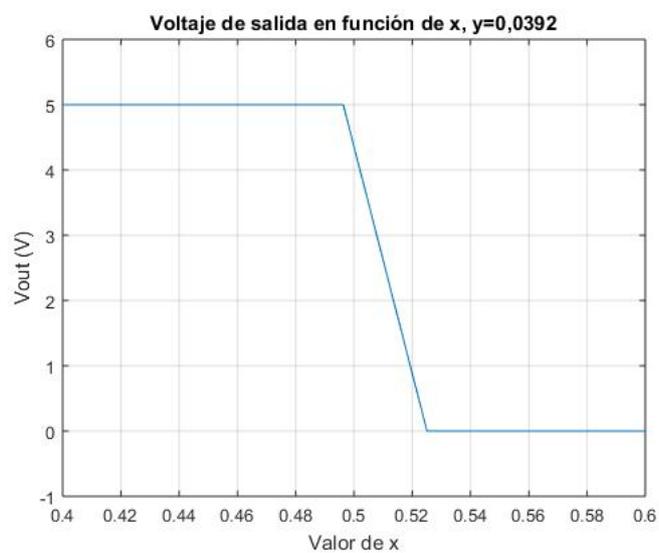


Figura 2.16: Voltaje de salida en función de x con $y=0,0392$.

valor de R , entonces aumenta la corriente. Esta resistencia resulta ser la resistencia mínima tal que se obtiene una corriente máxima de 200mA . Si aumentamos la resistencia, disminuye la corriente y también la potencia disipada.

2.4. Pruebas experimentales

Realizamos medidas experimentales en el laboratorio. Presentamos la metodología y resultados obtenidos.

2.4.1. Sensor ACS712

Objetivo

- Corroborar que el medidor ACS712 tiene una respuesta lineal a la entrada.
- Comparar la respuesta obtenida experimentalmente con la brindada por el fabricante.

Capítulo 2. Hardware de medición

Herramientas utilizadas

- Medidor ACS712.
- Voltímetro.
- Fuente de continua QJE QJ3005XIII con amperímetro incluido.
- Resistencia R compuesta por tres resistencias en paralelo de $10\ \Omega$, $5\ W$;
 $R = \frac{10}{3} = 3,333\ \Omega$

Procedimiento experimental

El procedimiento experimental fue el siguiente:

1. Alimentamos el medidor ACS712 a 5 V con la fuente de continua.
2. Alimentamos el circuito con la fuente de voltaje continuo hasta lograr -2 A.
3. Medimos la salida de el medidor ACS712 con el voltímetro.
4. Fuimos aumentando la corriente y midiendo nuevamente la salida hasta llegar a 2 A.

Resultados experimentales

Los resultados obtenidos fueron los de la tabla 2.1.

I_{in}	V_{out}
-1,74	2,114
-1,61	2,134
-1,44	2,166
-1,29	2,197
-1,11	2,231
-0,96	2,260
-0,8	2,289
-0,64	2,319

I_{in}	V_{out}
-0,48	2,348
-0,32	2,379
-0,17	2,409
0	2,446
0,17	2,448
0,32	2,511
0,48	2,539
0,64	2,569

I_{in}	V_{out}
0,80	2,600
0,96	2,631
1,11	2,660
1,29	2,694
1,44	2,723
1,61	2,754
1,74	2,781

Tabla 2.1: Puntos experimentales de la transferencia del medidor ACS712.

Con estos datos realizamos una aproximación a una función del tipo $y = ax + b$ y lo graficamos. Observar la figura 2.17.

2.4. Pruebas experimentales

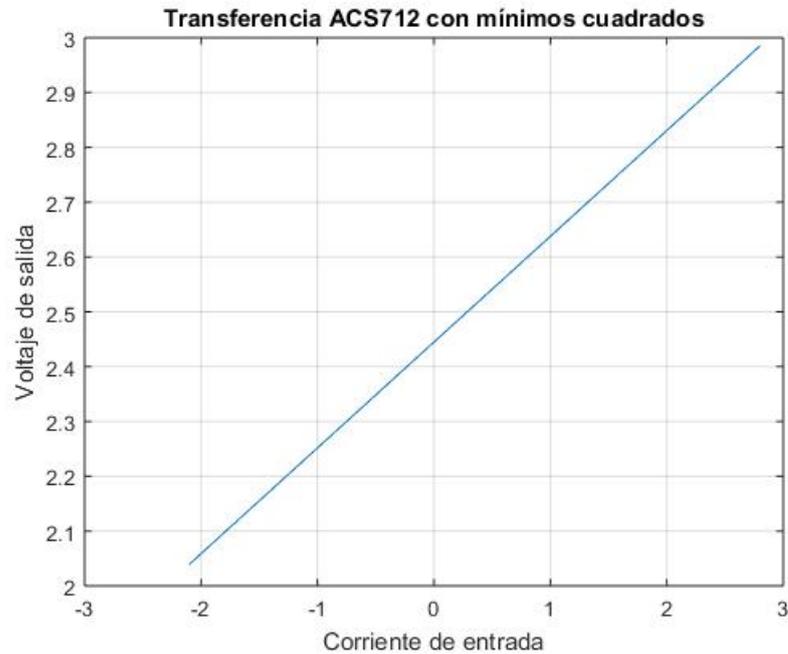


Figura 2.17: Transferencia del ACS712 mediante mínimos cuadrados.

Conclusiones

Pudimos observar que la respuesta del medidor ACS712 es efectivamente lineal, pero al compararla con la brindada por el fabricante (Figura 2.14), podemos observar que para una entrada de corriente nula, la respuesta no es $2,5\text{ V}$, sino de $2,446\text{ V}$.

2.4.2. Medidor de voltaje en DC

Objetivo

Analizar la relación entrada-salida del sensor de voltaje, en función de la perilla de voltaje de referencia V_{ref} , es decir: el potenciómetro R_4 . Según el fabricante esta perilla regulará el valor medio del voltaje de salida.

Herramientas utilizadas:

Las herramientas utilizadas fueron:

- Sensor lineal de efecto hall código sparkfun SEN-08883.
- Osciloscopio GwInstek GDS-2062.

Capítulo 2. Hardware de medición

- Fuente de continua QJE QJ3005XIII. Resistencia R compuesta por tres resistencias en paralelo de $10\ \Omega$, $5\ W$, $R = \frac{10}{3} = 3,33\ \Omega$.

Procedimiento experimental

El procedimiento experimental fue el siguiente:

1. Alimentamos el sensor a $5\ V$ de continua mediante la fuente de continua.
2. Medimos la salida del sensor V_{OUT} con el osciloscopio.
3. Ajustamos el valor V_{ref} :
 - a) Posicionamos el valor de la perilla de la ganancia en el valor mínimo con el fin de tener un punto de referencia para el V_{ref} .
 - b) Variamos la perilla de V_{ref} hasta observar en el osciloscopio el valor deseado: potenciómetro $R4$, el valor de x .
4. Le ingresamos una corriente a través de un circuito conformado por una fuente de voltaje continuo V_{IN} , la resistencia R y la entrada al sensor. Consideramos la resistencia de entrada despreciable para los efectos prácticos de esta prueba. La corriente de entrada al sensor es $I_{IN} = \frac{V_{IN}}{R}$. Empezamos de $0\ V$ y relevamos la salida.
5. Aumentamos progresivamente la salida relevando los datos hasta el punto en que el medidor entra en saturación.

Resultados experimentales:

Realizamos medidas para 6 puntos diferentes de V_{ref} , repitiendo los puntos 4 y 5 para cada medida.

Las medidas las representamos gráficamente. En la misma gráfica pusimos una recta lineal por mínimos cuadrados que mejor aproxima todos los puntos menos el último, debido a que en este el sensor ya entró en saturación.

Los valores de V_{ref} fueron $0,438\ V$; $0,934\ V$; $1,2\ V$; $2,07\ V$; $3,2\ V$ y $3,92\ V$.

Los resultados experimentales y sus gráficas pueden observarse en las tablas 2.2 y 2.3 e imágenes 2.18 y 2.19.

2.4. Pruebas experimentales

$V_{ref} = 0,438V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
0.0	0,757
0.015	1,14
0,030	1,63
0,045	2,05
0,06	2,55
0,075	2,95
0,090	3,39
0,105	3,78
0,120	4,23
0,135	4,69
0,150	4,82

$V_{ref} = 0,934V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(A)$
0,000	1,04
0,015	1,41
0,030	1,89
0,045	2,30
0,060	2,72
0,075	3,29
0,090	3,62
0,105	4,05
0,120	4,48
0,135	4,84
0,150	4,96

$V_{ref} = 1,2V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
0	1,28
0,030	2,16
0,060	3,04
0,090	3,92
0,120	4,81
0,129	5,04

Tabla 2.2: Resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 0,438; 0,934 y 1,2 V.

$V_{ref} = 2,07V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
0,00	2,17
0,030	2,90
0,060	3,92
0,090	4,82
0,099	5,04

$V_{ref} = 3,2V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
0,000	3,36
0,030	4,16
0,060	4,96
0,063	5,04

$V_{ref} = 3,92V$	
$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
0,00	4,08
0,015	4,39
0,030	4,80
0,042	5,00

Tabla 2.3: Resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 2,07; 3,2 y 3,92 V.

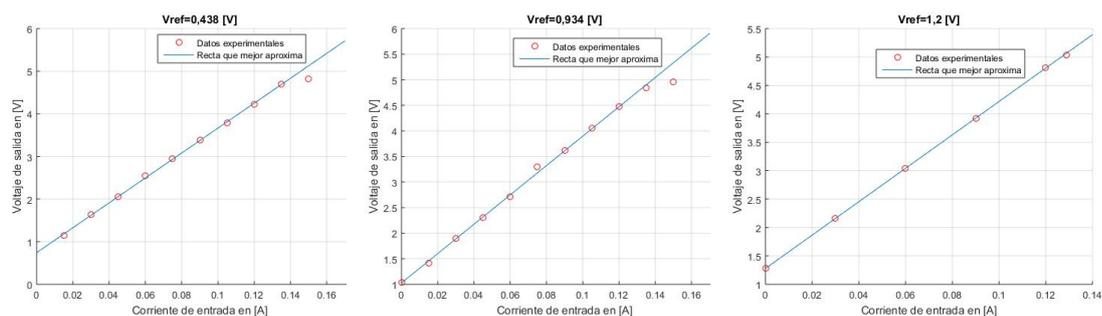


Figura 2.18: Gráfica de resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 0,438; 0,934 y 1,2V

Conclusiones:

Concluimos que la relación corriente de entrada – voltaje de salida, sigue una relación lineal, como era de esperar según la descripción dada por el fabricante.

Capítulo 2. Hardware de medición

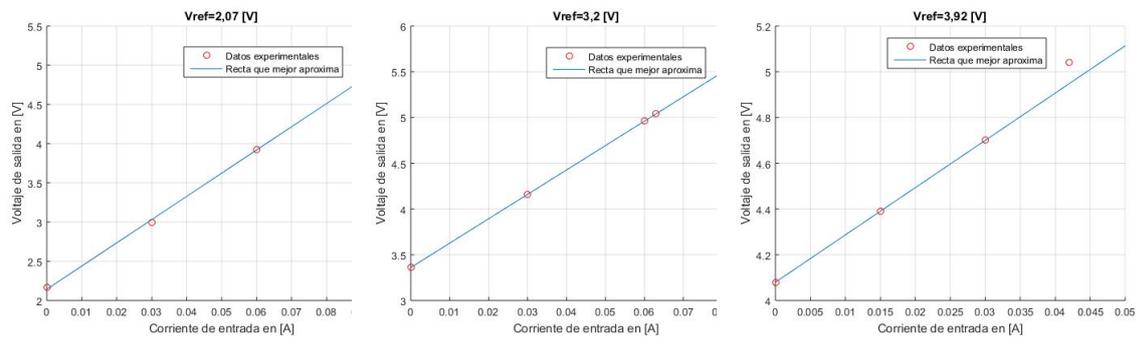


Figura 2.19: Gráfica de resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 2,07; 3,2 y 3,92 V

Vimos que el aporte del ruido tanto de la señal de entrada como el aportado por el sensor mismo es muy apreciable y deberá tenerse en cuenta a la hora de analizar los datos medidos en instancias posteriores. También se observó en la práctica que al variar los potenciómetros muy poco, la salida cambia mucho. Destacamos este resultado ya que la extrema sensibilidad de el sensor hace muy difícil aplicar la calibración teórica pensada.

2.4.3. Medidor de voltaje en AC

Objetivo:

Estudiar la respuesta del sensor de voltaje a una entrada sinusoidal. Familiarizarnos con el funcionamiento del sensor. En particular cómo ajustar la ganancia de la salida con la perilla de “Ganancia” (potenciómetro $R_3 - y$) y cómo puede llegar a modificar otros parámetros (en particular V_{ref}).

Herramientas utilizadas:

Las herramientas utilizadas fueron:

- Sensor lineal de efecto hall código sparkfun SEN-08883.
- Osciloscopio GwInstek GDS-2062.
- Fuente de continua QJE QJ3005XII.
- Fuente de alterna Tektronix CDC250.
- Resistencia $R = 10 \Omega$, $5 W$.

Procedimiento experimental:

1. Ajustamos V_{ref} a un valor deseado mediante el procedimiento de 2.4.2.
2. Le ingresamos al sensor una corriente a través de un circuito conformado por una fuente de voltaje alterna V_{in} , la resistencia R y la entrada al sensor.
3. Con un canal del osciloscopio medimos el voltaje sobre la resistencia R y con el otro canal medimos la salida del sensor. Considerando la resistencia de entrada del sensor depreciable: $I_{in} = \frac{V_{in}}{R}$, y el voltaje de entrada decae todo sobre la resistencia R .
4. Observando el osciloscopio, ajustamos la perilla de la ganancia hasta obtener una señal de salida deseada. Calculamos dos casos distintos con ganancias distintas.
5. Aumentamos progresivamente la ganancia y adquirimos los valores de la ganancia $G = \frac{V_{out}}{I_{in}}$.

Resultados experimentales

Se realizaron dos medidas, ambas con un $V_{ref} = 0,7 V$. Se registraron los valores tomados experimentalmente y graficamos una recta que mejor los aproxima de forma lineal mediante mínimos cuadrados.

Se pudo observar experimentalmente que la ganancia comenzaba a ser constante para valor de corriente de entrada mayores a 220mA. Por este motivo, para la

Capítulo 2. Hardware de medición

aproximación por mínimos cuadrados se tomaron valores de corriente de entrada mayores a 220mA.

Ver tabla 2.4 y figura 2.20

$I_{in}(A)$	$V_{out}(V)$	Ganancia
0,042	0,080	1,905
0,104	0,152	1,462
0,118	0,168	1,424
0,148	0,200	1,351
0,196	0,232	1,184
0,212	0,256	1,208
0,234	0,264	1,128
0,276	0,304	1,101
0,304	0,344	1,132
0,342	0,392	1,146
0,376	0,424	1,128

Segunda medida		
$I_{in}(A)$	$V_{out}(V)$	Ganancia
0,090	0,400	4,444
0,122	0,440	3,607
0,148	0,500	3,378
0,182	0,680	3,736
0,216	0,760	3,519
0,232	0,710	3,060
0,266	0,800	3,008
0,296	0,900	3,041
0,326	0,980	3,006
0,350	1,040	2,971

Tabla 2.4: Datos experimentales y ganancia de sensor de voltaje en AC

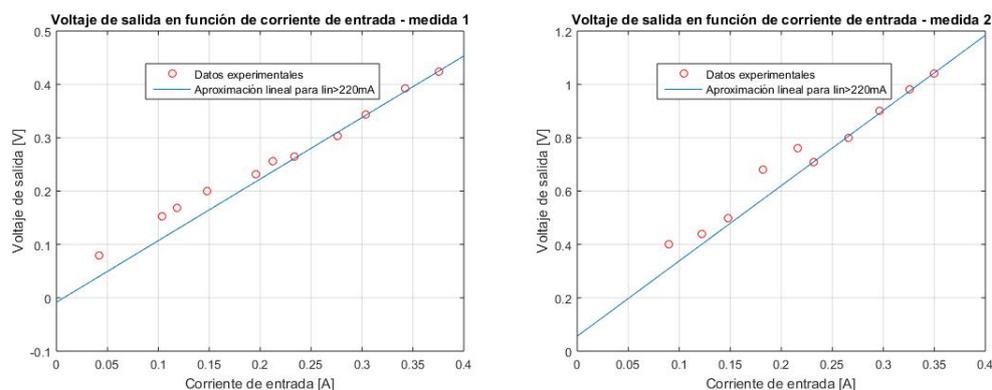


Figura 2.20: Gráfica de datos experimentales de sensor de voltaje en AC

Conclusiones:

Pudimos observar que el variar la ganancia (potenciometro R_3), se modifica tanto la ganancia como el voltaje V_{ref} .

Lo más relevante a los efectos del uso de este sensor fue ver la extrema sensibilidad del sistema a los cambios en los parámetros de los potenciómetros. Al modificar muy poco estos, su efecto fue de extrema notoriedad a la salida.

En el planteo teórico de la calibración del instrumento, nos basamos en poder modificar los valores de los potenciómetros a cierto porcentaje de estos mediante las

2.4. Pruebas experimentales

variables que creamos x e y .

Vista esta extrema sensibilidad y las conclusiones de la sección 2.4.1 donde constatamos que la transferencia del medidor ACS712 no se comporta de forma idealmente teórica, pudimos deducir cual es la mejor forma de utilizar el instrumento. Concluimos entonces que no es posible calibrar al instrumento según el planteo teórico, lo que nos lleva a tener que calibrar de forma experimental el instrumento, inyectándole la corriente a la cual funcionará y cambiando los parámetros hasta obtener una salida satisfactoria; con la ayuda de una herramienta que permita visualizar las señales de entrada y salida; como por ejemplo un osciloscopio.

2.4.4. Medidor de Corriente LTS 25-NP

Objetivo

Familiarizarnos con el sensor de corriente. Estudiar su respuesta de forma práctica y compararla con el estudio teórico.

Herramientas utilizadas

- Sensor de corriente LTS 25-NP.
- Osciloscopio GwInstek GDS-2062.
- Fuente de voltaje continua QJE QJ3005XIII.
- Resistencia R compuesta por tres resistencias en paralelo de 10Ω , $5W$, $R = \frac{10}{3} = 3,33\Omega$.

Procedimiento experimental

1. Alimentamos al sensor de corriente con una de las salidas de la fuente de continua (a 5 V).
2. Mediante la fuente de continua V_{IN} y la resistencia R le ingresamos al sensor una corriente $I_{IN} = \frac{V_{IN}}{R}$. Empezamos con $-2,3A$ y registramos el valor de voltaje de salida.
3. Fuimos aumentando la corriente de entrada progresivamente y registrando los valores de voltaje de salida hasta llegar a $+2,3A$.

Resultados experimentales

Los resultados experimentales pueden verse en la tabla 2.5.

Capítulo 2. Hardware de medición

$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{IN}(V)$	$V_{OUT}(V)$	$I_{IN}(A)$	$V_{OUT}(V)$
-2,3	2,306	-0,7	2,426	0,9	2,548
-2,2	2,313	-0,6	2,434	1,0	2,555
-2,1	2,321	-0,5	2,441	1,1	2,563
-2,0	2,328	-0,4	2,449	1,2	2,57
-1,9	2,336	-0,3	2,456	1,3	2,578
-1,8	2,343	-0,2	2,464	1,4	2,585
-1,7	2,351	-0,1	2,472	1,5	2,593
-1,6	2,358	0	2,479	1,6	2,6 00
-1,5	2,366	0,1	2,487	1,7	2,608
-1,4	2,374	0,2	2,495	1,8	2,616
-1,3	2,381	0,3	2,502	1,9	2,623
-1,2	2,389	0,4	2,51	2,0	2,631
-1,1	2,396	0,5	2,517	2,1	2,638
-1	2,404	0,6	2,525	2,2	2,646
-0,9	2,411	0,7	2,533	2,3	2,653
-0,8	2,419	0,8	2,54		

Tabla 2.5: Medidas experimentales del sensor de corriente

Graficamos los puntos experimentales con una aproximación por mínimos cuadrados y los comparamos con la curva de transferencia teórica brindada por el fabricante. En la figura 2.21 podemos ver la comparación: a la izquierda la brindada por el fabricante, y a la derecha la experimental.

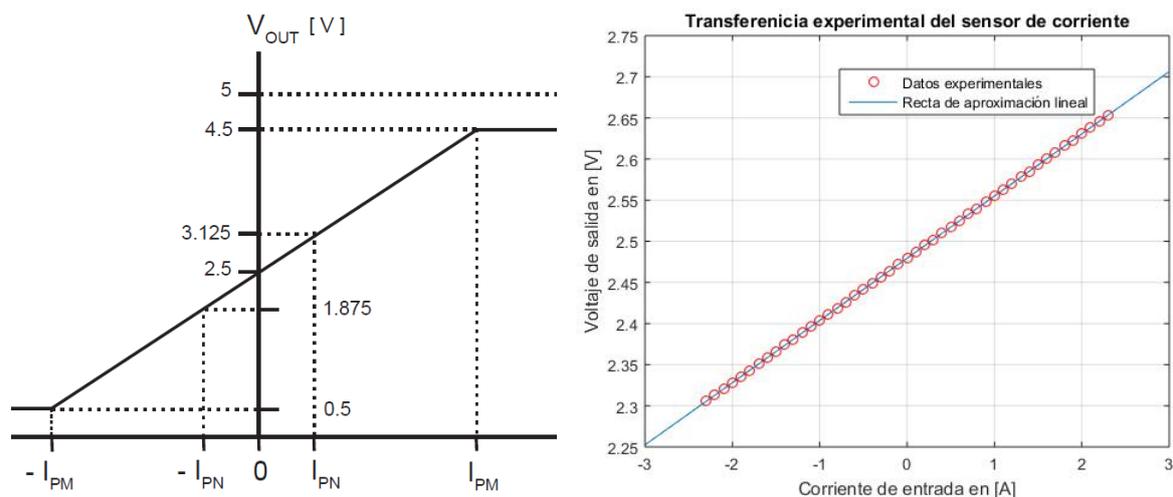


Figura 2.21: Transferencia teórica vs transferencia experimental.

2.4. Pruebas experimentales

Conclusiones:

Concluimos que la transferencia experimental se comporta como se esperaba y se asemeja a la recta teórica, si bien no es idéntica.

Pudimos observar que el manejo del sensor es muy simple.

2.4.5. Conversor ADS1015

Para las medidas experimentales del conversor analógico-digital es preciso realizar primero un estudio del software.

El software utilizado junto con **medidas experimentales son mostradas** en el Capítulo 5.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Raspberry Pi

3.1. Introducción

Una de las principales características de este proyecto es la recolección y el procesamiento de datos e información. Surge entonces la necesidad de definir una unidad de procesamiento y almacenamiento (UPA). Se propone la plataforma Raspberry Pi, dada su simplicidad y bajo costo. Se trata de una mini pc con placa reducida creada en Reino Unido. Su propósito inicial fue de fines académicos, promoviendo la robótica y la programación en los jóvenes. Esta plataforma también se utiliza en varios proyectos de domótica (automatizando los electrodomésticos del hogar).

3.2. Hardware

Existen múltiples modelos con diferentes especificaciones. En la tabla 3.1 se resumen las especificaciones según el modelo de cada placa [1] [2].

Capítulo 3. Raspberry Pi

	Raspberry Pi 1 Modelo A	Raspberry Pi 1 Modelo B	Raspberry Pi 1 Modelo B+	Raspberry Pi 2 Modelo B	Raspberry Pi 3 Model B
Chip	Broadcom BCM2835 SoC full HD multimedia applications processor	Broadcom BCM2835 SoC full HD multimedia applications processor	Broadcom BCM2835 SoC full HD multimedia applications processor	Broadcom BCM2836 32Bit Quad Core Processor powered Single Board Computer running at 900MHz	Broadcom BCM2837 64Bit Quad Core Processor powered Single Board Computer running at 1.2GHz
Velocidad Procesador	700 MHz Low Power ARM1176JZ-F Applications Processor	700 MHz Low Power ARM1176JZ-F Applications Processor	700 MHz Low Power ARM1176JZ-F Applications Processor	QUAD Core @900 MHz	QUAD Core @1.2 GHz
RAM	256MB SDRAM	512MB SDRAM	512MB SDRAM	1GB SDRAM @ 400 MHz	1GB SDRAM @ 400 MHz
Almacenamiento	SD, MMC, SDIO card slot	SD, MMC, SDIO card slot	MicroSD	MicroSD	MicroSD
USB	1	2	4	4	4
Consumo / Alimentación	500mA @ 5V	700 mA @ 5V	600 mA @ 5V	1.8A @ 5V	2.5A @ 5V
GPIO	26 pins	26 pins	40 pins	40 pins	40 pins
Puerto Ethernet	NO	Onboard 10/100 Ethernet RJ45 jack	Onboard 10/100 Ethernet RJ45 jack	SI	SI
Wifi	NO	NO	NO	NO	Incluido
Bluetooth	NO	NO	NO	NO	Incluido
Dimensiones	8.6cm x 5.4cm x 1.5cm	8.6cm x 5.4cm x 1.5cm	8.6cm x 5.4cm x 1.5cm	8.6cm x 5.4cm x 1.5cm	8.6cm x 5.4cm x 1.5cm

Figura 3.1: Especificaciones Raspberry Pi detalladas por modelo.

Empezamos trabajando con el Modelo 1 B+. Realizando operaciones básicas con paquetes esenciales de Python, y algunas pruebas simples, no encontramos mayores dificultades. A medida que empezamos a profundizar en la complejidad de las operaciones, nos enfrentamos a problemas de procesamiento, así como incompatibilidad de los paquetes de Python necesarios. Llegamos a la conclusión de que era necesario elegir una versión mas potente de esta plataforma, como lo es el Modelo 3 B, mostrada en la figura 3.2.

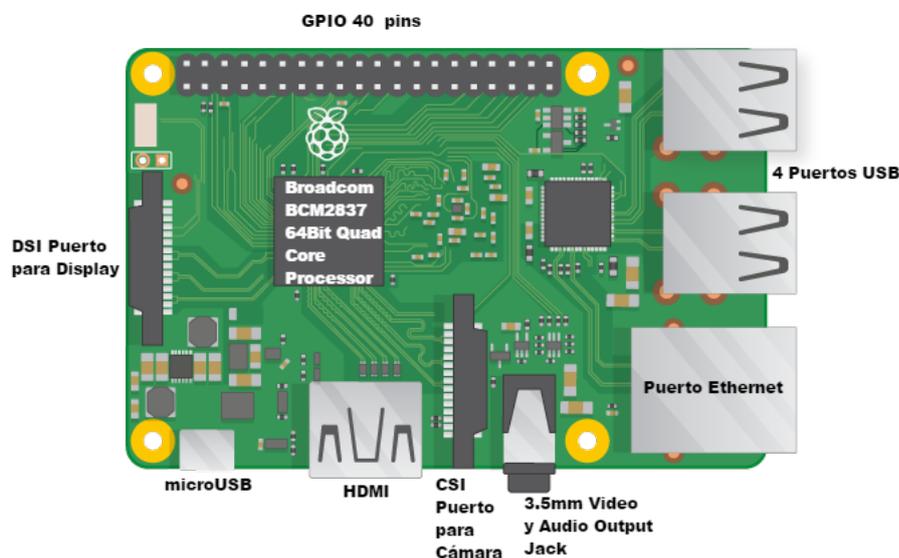


Figura 3.2: Raspberry Pi 3 Modelo B.

Las ventajas que tiene este modelo son:

- Memoria RAM suficiente para nuestras necesidades (1 GB).
- Módulos Wifi y Bluetooth incorporados.
- Compatibilidad con sistema operativo Ubuntu Mate.

En la sección 3.3 se verá la importancia de estas ventajas.

3.2.1. USB

Los puertos USB permiten la conexión de periféricos como teclado, mouse y cámara web, los cuales proporcionan funcionalidades adicionales a la Raspberry Pi. Hay algunas diferencias entre el hardware USB en Raspberry Pi y el hardware USB en una PC o dispositivos portátiles o tablet. La Raspberry Pi fue pensada originalmente para los dispositivos móviles y utiliza el puerto USB tipo OTG (On The Go) ¹. El hardware OTG es mas simple que el hardware en una PC. OTG soporta en general a la mayoría de los dispositivos USB, pero para proporcionar un nivel adecuado de funcionamiento, el software del sistema necesita realizar mas trabajo [3].

¹Extensión de la norma USB 2.0 que permite a los dispositivos USB tener mayor flexibilidad en la gestión de la interconexión.

Capítulo 3. Raspberry Pi

Los dispositivos USB tienen requisitos de alimentación definidos, de 100 mA a 500 mA. El dispositivo anuncia sus requisitos de alimentación al host USB al conectarse por primera vez. Los puertos USB de una Raspberry Pi tienen una carga diseñada de 100 mA cada uno suficiente para alimentar dispositivos de “baja potencia” como mouses y teclados.

Dispositivos como adaptadores WiFi, unidades de disco duro USB, pen drives USB consumen mucho más corriente y deben ser alimentados desde un concentrador externo. Si bien es posible conectar un dispositivo 500 mA en una Raspberry Pi y hacer que funcione con un suministro de potencia suficiente, no se garantiza un rendimiento fiable. Además, la conexión de dispositivos de alta potencia en los puertos USB puede provocar un apagón, haciendo que el sistema se reinicie.

3.2.2. Fuente de Alimentación

Raspberry Pi 3 se energiza mediante la fuente de +5.1 V del puerto microUSB. La cantidad de corriente que requiere en mA depende de los periféricos que tenga conectados. Normalmente, el modelo B utiliza entre 700-1000 mA. El modelo A puede utilizar aproximadamente 500 mA sin periféricos adjuntos. La corriente máxima que puede consumir la Raspberry Pi es de 1 A. Si necesita conectar un dispositivo USB que tenga los requisitos de alimentación superiores a 1 A, debe conectarse a un concentrador USB alimentado externamente. Los requisitos de potencia aumentan a medida que las diversas interfaces son usadas. Los pines GPIO ² pueden consumir 50 mA de forma segura, distribuidos a través de todos los pines. El puerto HDMI utiliza 50 mA, el módulo de cámara requiere 250 mA, y los teclados y mouse entre 100 mA y 1000 mA. Por lo que se debe comprobar la potencia de los dispositivos a conectar y adquirir una fuente de alimentación adecuada.

3.2.3. Reloj de tiempo real

Ninguno de los modelos de Raspberry Pi tiene incorporado un reloj de tiempo real, por lo que no se puede realizar el seguimiento de la hora del día independientemente. Se puede agregar un reloj de tiempo real externo, conectándolo mediante la interfaz I2C ³.

3.2.4. GPIO

Es un conector de propósito general de entrada/salida. Los pines GPIO pueden configurarse como propósito general de entrada, propósito general de salida o como una de las 6 configuraciones especiales. Como se observa en la tabla 3.1 los modelos 1 A y B cuentan con 26 pines para dicho propósito mientras que los modelos 2B y 3B cuentan con 40 pines.

²Pines de de proposito general de entrada/salida.

³Bus serie de datos utilizado principalmente para la comunicación entre diferentes partes del circuito.

3.2. Hardware

En la figura 3.3 se detallan las funciones de cada pin. Nosotros utilizamos los pines correspondientes a la interfaz I2C para la conexión del convertor analógico/digital (ADS1015 de Adafruit) ya que Raspberry Pi no lo tiene incorporado. En la sección 3.5 se detalla la conexión del convertor a los pines I2C de Raspberry Pi.

Modelos 1 A y B

Name	Name	Pin#	Pin#
3.3V (DC Power)	5V (DC Power)	1	2
SDA (I2C)	5V (DC Power)	3	4
SCL (I2C)	GND (Ground)	5	6
4	TXD (UART)	7	8
GND (Ground)	RXD (UART)	9	10
17 (GPIO_GEN0)	18 (GPIO_GEN1)	11	12
27 (GPIO_GEN2)	GND (Ground)	13	14
22 (GPIO_GEN3)	23 (GPIO_GEN4)	15	16
3.3V (DC Power)	24 (GPIO_GEN5)	17	18
MOSI (SPI)	GND (Ground)	19	20
MISO (SPI)	25 (GPIO_GEN6)	21	22
CLK (SPI)	CS0 (SPI)	23	24
GND (Ground)	CS1 (SPI)	25	26

Modelos 1 B+, 2B y 3B

Name	Name	Pin#	Pin#
3.3V (DC Power)	5V (DC Power)	1	2
SDA (I2C)	5V (DC Power)	3	4
SCL (I2C)	GND (Ground)	5	6
4	TXD (UART)	7	8
GND (Ground)	RXD (UART)	9	10
17 (GPIO_GEN0)	18 (GPIO_GEN1)	11	12
27 (GPIO_GEN2)	GND (Ground)	13	14
22 (GPIO_GEN3)	23 (GPIO_GEN4)	15	16
3.3V (DC Power)	24 (GPIO_GEN5)	17	18
MOSI (SPI)	GND (Ground)	19	20
MISO (SPI)	25 (GPIO_GEN6)	21	22
CLK (SPI)	CS0 (SPI)	23	24
GND (Ground)	CS1 (SPI)	25	26
ID_SD(I2C ID EEPROM)	ID_SC(I2C ID EEPROM ID)	27	28
GPIO05	GND (Ground)	29	30
GPIO06	GPIO12	31	32
GPIO13	GND (Ground)	33	34
GPIO19	GPIO16	35	36
GPIO26	GPIO20	37	38
GND (Ground)	GPIO21	39	40

Figura 3.3: Pines GPIO

3.3. Sistema Operativo

Existen varios sistemas operativos compatibles con Raspberry Pi. Alguno de ellos no puede utilizarse en ciertos modelos debido a los requerimientos de memoria y procesamiento. El sistema operativo oficial es Raspbian. Se basa en Debian⁴ optimizado para el hardware de Raspberry Pi.

También se encuentra disponible el sistema operativo Ubuntu Mate. Dicho SO es compatible con Raspberry 2 y 3. Es basado en Ubuntu regular, y permite utilizar aplicaciones como LibreOffice y Firefox. Ubuntu Mate soporta la incorporación de Bluetooth y Wifi en Raspberry Pi 3. Brinda mas prestaciones frente al Raspbian y resulta mas eficiente a la hora de trabajar con el lenguaje de programación Python (Ver Sección 3.4).

Al comienzo del proyecto, contábamos con Raspberry Pi 1 B+, para la cual el sistema operativo mas adecuado es el Raspbian. Surgieron varios inconvenientes e incompatibilidades al querer instalar paquetes de Python esenciales para el desarrollo del software. Debido a lo anterior decidimos utilizar Raspberry Pi 3B con Ubuntu Mate. Ubuntu Mate se asemeja a la version de Ubuntu completa, lo cual nos resolvió los inconvenientes con la instalación de paquetes Python y aportó flexibilidad a la hora de trabajar.

3.4. Python

3.4.1. Generalidades del lenguaje

Python es un lenguaje de programación orientado a objetos. Es de código abierto, fácil de asimilar, intuitivo y práctico. Permite trabajar mas rápido e integrar los sistemas eficientemente.

Las ventajas de este lenguaje son: amigable y fácil de aprender, de código abierto, eficiente, robusto y rápido al mismo tiempo. También contiene una numerosa cantidad de paquetes desarrollados por terceros.

Las principales características del lenguaje Python son:

1. Se encuentran disponibles una gran variedad de tipos de datos, como números (puntos flotantes, complejos y longitud ilimitada de enteros), cadenas (ASCII y Unicode), listas y diccionarios.
2. Soporta la programación orientada a objetos con clases y herencia.
3. Utiliza indentación para delimitar bloques, en lugar de utilizar llaves o paréntesis como lo hacen otros lenguajes. Un aumento en la indentación,

⁴Sistema Operativo de software libre.

viene después de ciertas afirmaciones, mientras que una disminución de la misma significa el fin del bloque actual [4].

Dadas las características antes mencionadas decidimos elegir este lenguaje para el desarrollo del software de nuestro proyecto.

3.4.2. Paquetes

Python cuenta con una amplia biblioteca de paquetes, los cuales proporcionan herramientas de diversas tareas. También se encuentran disponibles los paquetes desarrollados por terceros para Python. Se pueden encontrar más de 107.000 paquetes [5] que ofrecen una amplia gama de funcionalidades.

Los paquetes utilizados para el desarrollo del software de este proyecto se pueden ver en el apéndice E.

3.5. Conexión

Raspberry Pi no cuenta con un convertor analógico/digital incorporado, por lo que para la lectura de corriente y voltaje mediante los sensores descritos en el Capítulo 2 , es necesario conectarlos mediante un convertor analógico/digital externo, a través de los pines I2C. En la figura 3.3 se detallan los pines correspondientes para dicho propósito. Se utilizó el convertor ADS 1015 de Adafruit como ya se vió en el Capítulo 2. La conexión se realizó según la figura 3.4

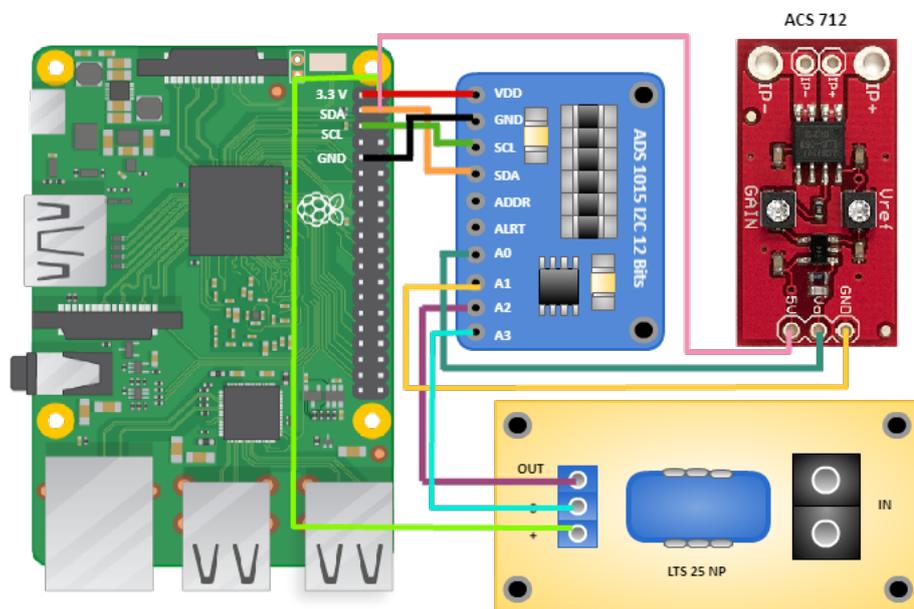


Figura 3.4: Conexión Raspberry Pi - ADS1015 - Medidores.

Capítulo 4

Algoritmo Predictivo

En el presente capítulo veremos distintos modelos teóricos, para el análisis y predicción de series temporales. Comenzaremos con una introducción sobre los elementos que componen a una serie temporal, y como clasificarlas.

Veremos dos métodos para el estudio y predicción de las series. El primero consiste en hacer un análisis descriptivo de la serie y reconocer elementos característicos. Si descomponemos la serie en los elementos que la componen, resulta más fácil poder predecir el comportamiento futuro. Este sistema funciona correctamente, cuando la serie presenta ciertos patrones identificables a lo largo del tiempo.

Para el segundo método, se utilizan modelos estadísticos, que ven a la serie como un proceso estocástico, y predicen el futuro en base al comportamiento pasado. En particular veremos el modelo ARIMA.

Poder predecir el consumo eléctrico es de vital importancia para las Smart Grids. Por un lado no permite tener un control y una visión general sobre la red, donde tenemos una estimación de la demanda futura. Esto nos permite adecuar la generación para satisfacer la demanda de los usuarios. Por otro lado, nos permite prever futuras fallas y sobre-picos de consumo que puedan dañar la red. La famosa “catástrofe de voltaje” que tanto se ha anunciado, puede ser prevenida gracias a las Smart Grids en conjunto con el uso de medidores inteligentes.

4.1. Series Temporales

Una serie temporal, es una secuencia de valores ordenados, usualmente registrados en intervalos de tiempos equidistantes (Ver ecuación 4.1). Por ejemplo, una serie temporal, puede ser el número de egresados por año en la Facultad de Ingeniería.

Las series temporales se utilizan para estudiar la relación entre diversas variables que cambian con el tiempo y se influyen entre sí. Estrictamente hablando una serie temporal es: [18]

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

Una sucesión ordenada, a lo largo del tiempo, de un conjunto de variables aleatorias.

$$\begin{aligned}x_t & \quad t = 1, 2, \dots, N. \\X & = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Donde x_t es la observación número t ($1 \leq t \leq N$) de la serie, y N es el número de observaciones (tamaño o longitud). Si es posible predecir exactamente los valores de la serie, se dice que es *determinística*. En cambio, si el futuro sólo se puede determinar de modo parcial por las observaciones pasadas y no se pueden hallar exactamente, la serie es *estocástica*.

Con el análisis de las series temporales, podemos extraer regularidades que se observan en el comportamiento pasado, y obtener un mejor entendimiento de la serie en el tiempo. Además, bajo el supuesto de que las condiciones que generaron la serie permanecen constantes, podemos predecir el comportamiento futuro.

Para comenzar el análisis de una serie temporal, es necesario establecer algunos conceptos fundamentales, tales como su tendencia, existencia de ciclos, presencia de valores atípicos.

Las series pueden tener una periodicidad anual, semestral, trimestral, mensual, etc. Las componentes de la serie, van a depender de como consideramos la periodicidad de los valores [12]. Por ejemplo, para el consumo eléctrico en un hogar, si consideramos un día en particular, vamos a notar grandes cambios a corto plazo. Sin embargo, si tomamos un mes entero de muestras, se observará un comportamiento similar día a día. Esta característica viene dada por como se genera la serie. Las personas vivimos en ciclos de rutina diaria, por lo que es correcto asumir que el consumo eléctrico presentará periodicidad diaria.

4.1.1. Componentes de una Serie Temporal

- **Nivel:**

El nivel de una serie temporal es la media en cada período de tiempo que consideremos. Como depende del período considerado, se dice que es una medida local de la tendencia. Por ejemplo, podemos tener una serie en la cual día a día el nivel medio va aumentando (Ver figura 4.1). Si calculamos el nivel medio de toda la semana va a dar muy distinto al nivel medio día a día.

- **Variabilidad:**

La variabilidad de la serie temporal, indica que tan dispersos o concentrados se encuentran los datos respecto al nivel, en un período dado. La variabilidad de una serie se puede apreciar con una gráfica de cajas como el de la figura 4.2.

4.1. Series Temporales

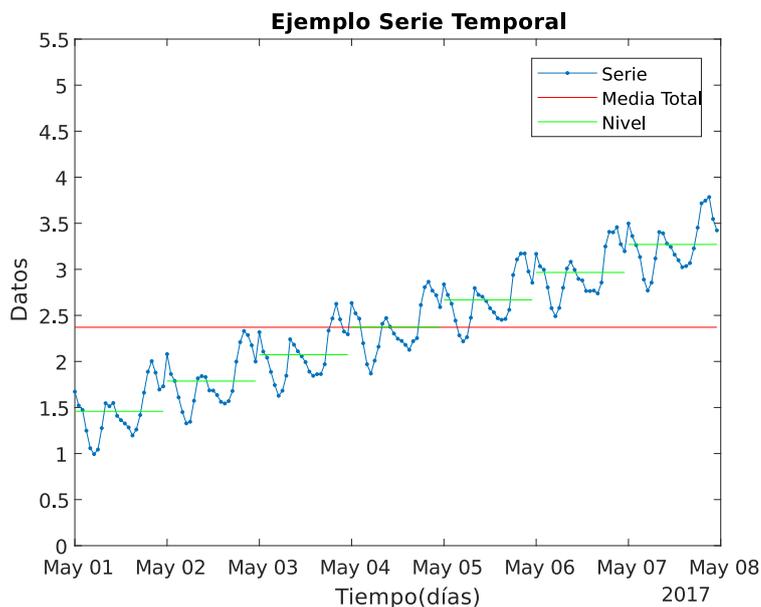


Figura 4.1: Ejemplo de Serie Temporal, con nivel.

La gráfica de cajas muestra para cada día, una línea roja que representa el nivel, una caja azul que representa donde se distribuyen el 50 % de los datos, dos líneas negras que representan donde se distribuyen el 25 % de los datos hacia cada lado, y unas marcas que muestran los máximos y mínimos de la serie (Ver figura 4.3). También se representa a veces los valores atípicos con una cruz.

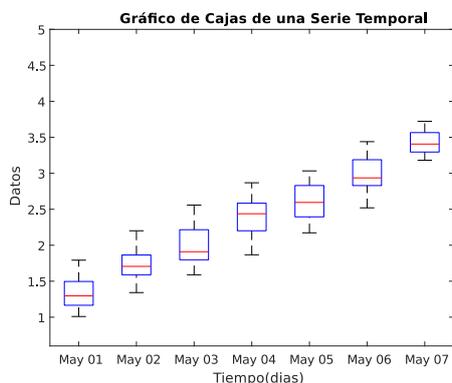


Figura 4.2: Gráfico de cajas para apreciar la variabilidad de una Serie temporal.

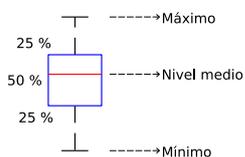


Figura 4.3: Leyenda para un gráfico de cajas.

■ **Tendencia:**

Se define la tendencia como el cambio a largo plazo en relación al nivel medio. La tendencia se identifica con un movimiento suave de la serie en tiempos largos. Una vez calculado el nivel de la serie, debemos observar su estabilidad; ver si la media tiene valores similares en los períodos de tiempo en los que dividimos el calendario. También debemos ver si la serie presenta una tendencia o dirección constante de cambio de nivel. En la figura 4.4, se aprecia una serie con tendencia creciente.

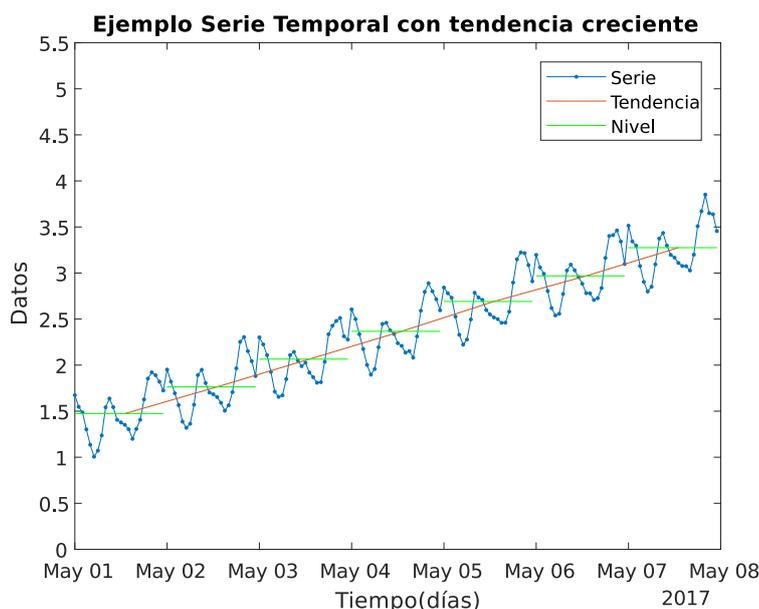


Figura 4.4: Ejemplo de serie temporal con tendencia creciente.

Una serie temporal, según su nivel, puede ser estable, inestable o circunstancial, como se muestra en el esquema de la figura 4.5.

■ **Componente Estacional:**

Refleja comportamientos con un patrón recurrente y periódico. Decimos que una serie es estacional cuando podemos observar en ella un patrón sistemático que se repite periódicamente (cada año, mes, día, etc. dependiendo de las unidades de tiempo en que vengan recogidos los datos).

En el ejemplo del consumo eléctrico, tendremos que cada día se repite un patrón de comportamiento similar, donde habrá horas de consumo pico y horas de bajo consumo. Es importante notar; como se mencionó anteriormente, que los ciclos de tiempo con que se toma la serie, afecta sus componentes. Si tomamos el consumo de un solo día, no va a haber componente estacional, en cambio en un mes o una semana, va a haber un patrón que se repite día a día.

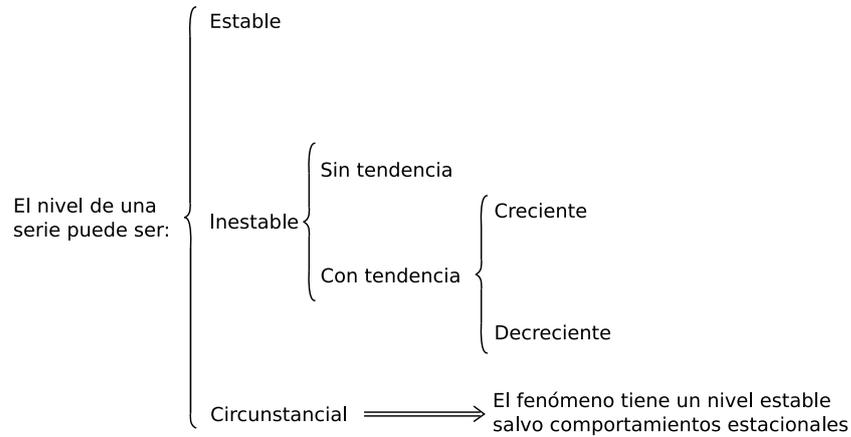


Figura 4.5: Tipos de series temporales según su nivel.

Continuando con el ejemplo de la figura 4.4 , si graficamos juntos los siete días de la semana, se puede apreciar la similitud ¹(Ver figura 4.6). Antes de poder ver las componente estacional, es necesario eliminar la tendencia de la serie, como veremos más adelante.

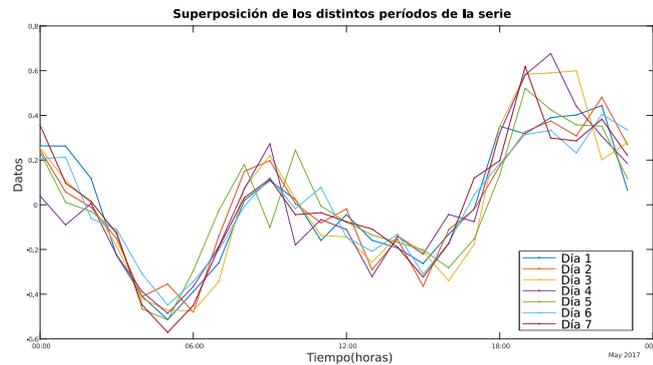


Figura 4.6: Análisis de la componente estacional de una serie.

■ **Componente Cíclica:**

Esta componente también refleja comportamientos recurrentes, pero no tienen por que ser exactamente periódicos. Son más difíciles de reconocer y analizar, y mayormente no se tienen en cuenta. Por ejemplo, suelen darse por factores de bonanza económica o crisis. Es decir, cada cierto tiempo largo, hay un crecimiento o una baja en la serie, que si bien no es periódico, es

¹Estos valores son solamente demostrativos para el estudio de las series, sacados del consumo promedio de un hogar en un solo día, y simuladas las varianzas. En una gráfica de consumo real, es difícil que se note la similitud tan explícitamente, como veremos en el próximo capítulo.

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

recurrente. Volviendo al ejemplo del consumo eléctrico, podría suceder, que en un cierto momento, por factores políticos o económicos aumente el precio de la energía. Como consecuencia hay una baja en el gasto mensual, para ahorrar costos. Usualmente se agrupa junto con la tendencia y se habla de “*ciclo-tendencia*”.

■ **Componente Irregular:**

Recoge alteraciones en la serie, pequeñas en su incidencia, y sin pauta periódica o tendencia reconocible. Es la componente de la serie que no puede estimarse mediante métodos descriptivos y debe recurrirse a un análisis estocástico.

Podemos entonces, representar la serie como la suma de las tres componentes principales según la ecuación 4.2. La componente cíclica la incluimos dentro de la tendencia para simplificar el análisis. Este es un modelo aditivo, que como veremos más adelante no siempre tiene porqué ser así.

$$X_t = T_t + E_t + I_t \quad (4.2)$$

donde T_t es la tendencia, E_t la componente estacional, e I_t la componente Irregular.

4.1.2. Otros aspectos a estudiar

■ **Comportamientos Anómalos:**

También conocidos como “*Outliers*”, representan cambios abruptos o extraños, que no pueden ser explicados dentro del comportamiento normal de la serie. Si no son tratados de manera especial, pueden dominar los resultados y alterar la predicción.

Se reconocen tres tipos de “*Outliers*”: cambios de tendencia extraños, subidas bruscas de nivel o aparición de valores raros.

Las causas de los comportamientos anómalos pueden ser diversas, desde un error en la medida, hasta algún factor externo que altera los datos. Por ejemplo, en el consumo de un hogar, puede suceder que un día particular las personas se retiren de la vivienda y apaguen la llave general. Surge una baja repentina en el consumo, sin correlación con los datos anteriores, en la serie que representa el consumo mensual.

Existen distintas maneras de tratar con estos comportamientos anómalos. En este proyecto no vamos a tenerlos en cuenta, simplemente durante las pruebas simularemos uno, y veremos como se comporta el algoritmo predictivo.

- **Dependencia entre variabilidad y nivel:**

Como mencionamos anteriormente la variabilidad y el nivel, son factores locales, que dependen del período de tiempo considerado.

Si la variabilidad de una serie no depende del nivel, significa que los componentes de la serie se combinan de forma aditiva, es decir, el cambio debido a la estacionalidad siempre es el mismo, aunque varíe el nivel y exista tendencia creciente o decreciente como en la figura 4.4. Para este caso, es posible utilizar el modelo aditivo de la ecuación 4.2.

Sin embargo, si la variabilidad y el nivel dependen entre sí, los elementos de la serie se combinan de manera multiplicativa. En ese caso, va a haber un cambio en la estacionalidad que va a depender de cómo varíe la tendencia (Ver figura 4.7). Realizando un gráfico de cajas como el de la figura 4.8, también podemos observar este tipo de comportamiento, donde la variabilidad aumenta al aumentar el nivel. La ecuación que relaciona los componentes para este caso queda :

$$X_t = T_t E_t I_t \quad (4.3)$$

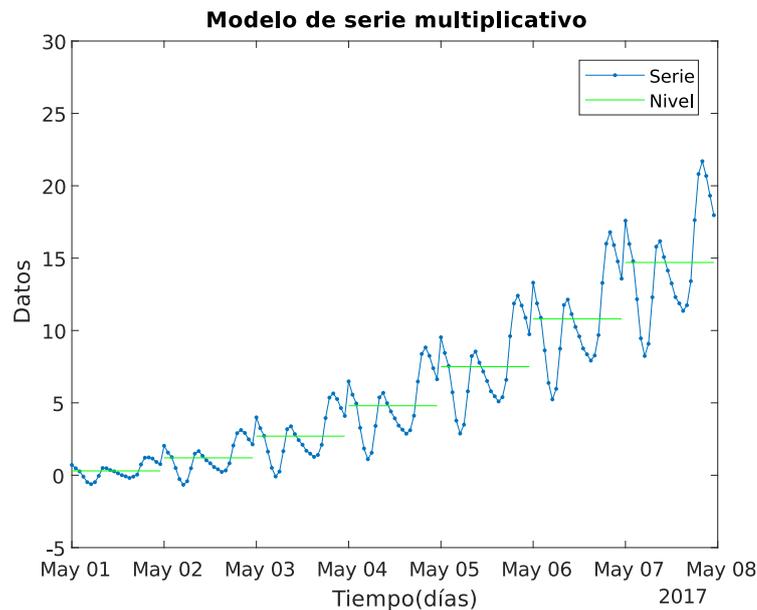


Figura 4.7: Serie temporal cuyos niveles y variabilidad dependen entre sí.

Se suelen utilizar dos enfoques para poder analizar el comportamiento de X_t , y lograr una predicción confiable ²:

²Asumiendo hipótesis aditiva.

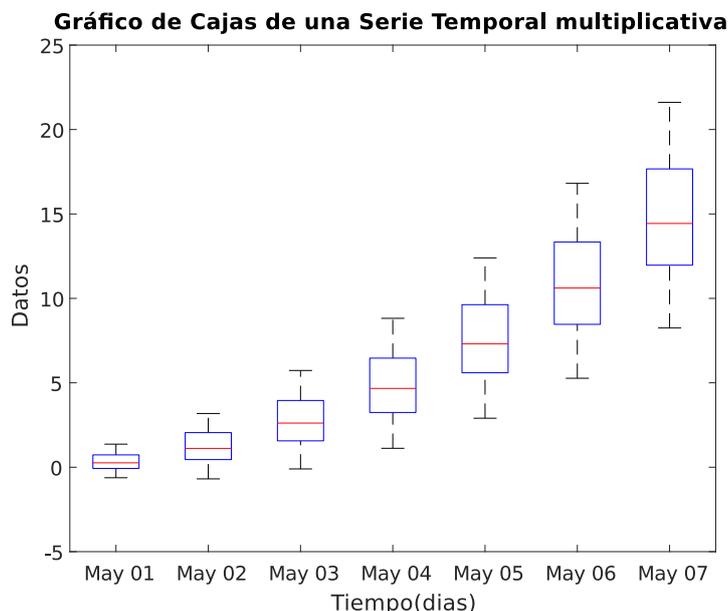


Figura 4.8: Serie temporal cuyos niveles y variabilidad dependen entre sí.

1. **Enfoque Descriptivo:** Se estima la tendencia T_t , y la componente estacional E_t , y se obtiene la componente irregular I_t despejando:

$$I_t = X_t - T_t - E_t$$

2. **Enfoque de Box-Jenkins:** Se elimina de X_t la tendencia y la parte estacional (mediante transformaciones o filtros) y queda sólo la parte probabilística. A esta última parte se le ajustan modelos paramétricos. Este enfoque, permite aislar la componente aleatoria de la serie (I_t), y estudiar que modelo probabilístico es el más adecuado para la predicción.

4.1.3. Clasificación de Series Temporales

Podemos clasificar las series temporales según el comportamiento del nivel y de la variabilidad [10].

1. **Serie temporal estacionaria:**

Una serie temporal es **estacionaria** cuando la media y la variabilidad se mantienen constante a lo largo del tiempo. Esto se refleja gráficamente en que los valores de la serie tienden a oscilar alrededor de una media constante. Además, la variabilidad con respecto a la media también permanece constante en el tiempo (Ver figura 4.9). Como el nivel medio de la serie se mantiene constante, las series estacionarias no tienen tendencia.

4.1. Series Temporales

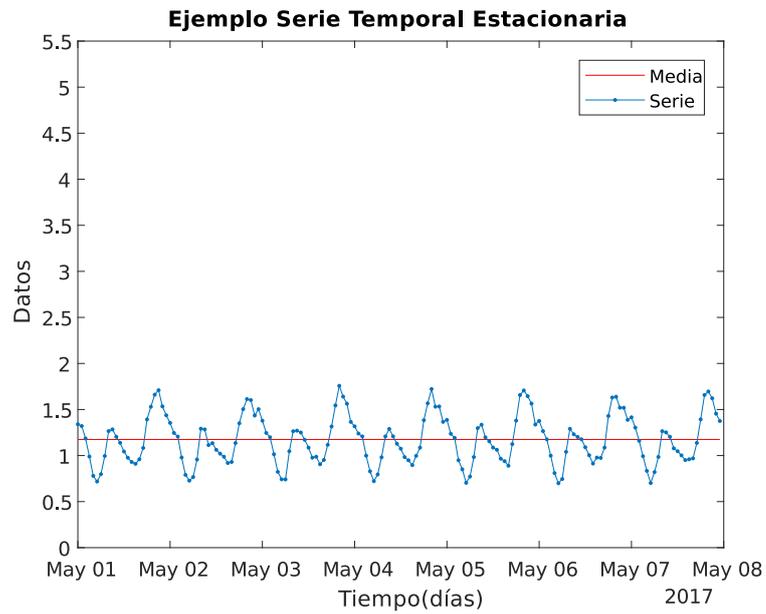


Figura 4.9: Serie temporal estacionaria.

2. Serie temporal no estacionaria:

Una serie temporal es **no estacionaria**, cuando la media y/o la variabilidad cambian a lo largo del tiempo. Los cambios en la media determinan una tendencia a crecer o decrecer a largo plazo, como se observa en la figura 4.4.

4.2. Análisis Descriptivo

En este enfoque debemos estimar los valores de la tendencia (T_t) y la componente estacional (E_t). Veremos varios métodos posibles para estimar estos parámetros. Para saber que método se ajusta mejor a nuestra serie, es necesario analizar el gráfico y ver el comportamiento de la tendencia y de la variabilidad.

4.2.1. Análisis de Tendencia

4.2.1.1. Análisis de Tendencias Deterministas

Este método funciona para series cuya tendencia sigue alguna función conocida, ya determinada. Por ejemplo, podemos ajustarla por una función lineal:

$$T_t = a + bt \quad (4.4)$$

Los coeficientes a y b se pueden estimar mediante el método de los mínimos cuadrados.

Cuando la tendencia no sigue una línea recta, se puede utilizar el modelo de tendencia polinómica. El mismo consiste en ajustarla por un polinomio de orden r :

$$T_t = a_0 + a_1t + \dots + a_rt^r \quad (4.5)$$

Nuevamente se calculan estimadores de los coeficientes a_i mediante el método de los mínimos cuadrados.

4.2.1.2. Análisis de Tendencia Evolutiva (Media Móvil):

A menudo la tendencia no sigue una línea recta o un polinomio. Sin embargo, es bastante acertado pensar que evoluciona lentamente, y que se puede aproximar en intervalos cortos por una función simple.

Supongamos que la representación de la tendencia como una recta, es válida para tres períodos consecutivos de tiempo. Podemos representar la tendencia en estos tres períodos de la siguiente manera (4.6):

$$\begin{aligned} T_{t-1} &= T_t - \Delta T \\ T_t &= T_t \\ T_{t+1} &= T_t + \Delta T \end{aligned} \quad (4.6)$$

Si hacemos la media de tres observaciones consecutivas:

$$m_t = \frac{x_{t-1} + x_t + x_{t+1}}{3} \quad (4.7)$$

Como sólo tomamos tres valores, no considero la componente estacional, entonces para las tres muestras consecutivas, la ecuación 4.2 queda:

4.2. Análisis Descriptivo

$$\begin{aligned}x_{t-1} &= T_{t-1} + I_{t-1} \\x_t &= T_t + I_t \\x_{t+1} &= T_{t+1} + I_{t+1}\end{aligned}\tag{4.8}$$

Si sustituimos las ecuaciones 4.6 en 4.8 y luego utilizamos los valores en la ecuación 4.7 llegamos a:

$$m_t = T_t + \frac{I_{t-1} + I_t + I_{t+1}}{3}\tag{4.9}$$

Como la media de la componente irregular (I_t) vale cero, es válido suponer que la media de solo tres valores de I (I_{t-1}, I_t, I_{t+1}) es despreciable en comparación con m_t . Entonces m_t representa la tendencia en ese instante (Ver figura 4.10). Esta operación se denomina media móvil de orden 3. Es posible calcular medias móviles de valores más altos. Cuanto más grande sea el orden, el valor de m_t cambia más suavemente. Si queremos ver la tendencia a largo plazo, tenemos que hacer medias móviles de orden mayor al período estacional. Para estimar la tendencia mediante media móvil, utilizamos q valores pasados:

$$m_{t+1} = \frac{x_{t-1} + x_{t-2} + \dots + x_{t-q}}{q}\tag{4.10}$$

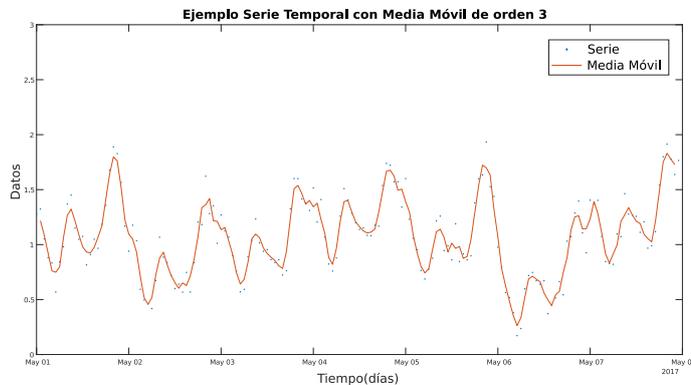


Figura 4.10: Media móvil de orden 3.

4.2.2. Análisis de estacionalidad

Para poder estimar el efecto estacional lo que hacemos es considerar como varía la media del período respecto a la media global.

Por ejemplo, en el caso del consumo eléctrico de un hogar. Tomamos medidas en una semana completa, 24 medidas por día, una a cada hora. Para este ejemplo, el consumo medio en la semana es constante, todos los días fueron similares (no

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

		Días						
		1	2	...	7	Medias	S	
Horas	00:00	$x_{00,1}$	$x_{00,2}$	...	$x_{00,7}$	\bar{x}_{00}	S_{00}
	01:00	$x_{01,1}$	$x_{01,2}$	...	$x_{01,7}$	\bar{x}_{01}	S_{01}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	23:00	$x_{23,1}$	$x_{23,2}$	...	$x_{23,7}$	\bar{x}_{23}	S_{23}

Tabla 4.1: Tabla de coeficientes estacionales, para una serie ejemplo.

se consideran feriados, días que no hay gente, etc.). Hay una tendencia constante, y una componente estacional diaria (Ver figura 4.9).

Armos la tabla 4.1 con los valores medidos a cada hora, en cada día. Calculamos los promedios por franja horaria, para toda la semana

Los coeficientes estacionales son:

$$S_i = \bar{x}_i - M \quad \forall i = 00, 01, \dots, 23 \quad (4.11)$$

Donde M es la media total de las observaciones. Es importante notar que antes de calcular los coeficientes estacionales, hay que quitarle la tendencia a la serie.

Se denomina *serie desestacionalizada* a una serie donde se ha eliminado el efecto de cada “estación” (en este caso días). Si graficamos los coeficientes estacionales, obtenemos una estimación de como es el comportamiento día a día de la serie, como en la figura 4.11.

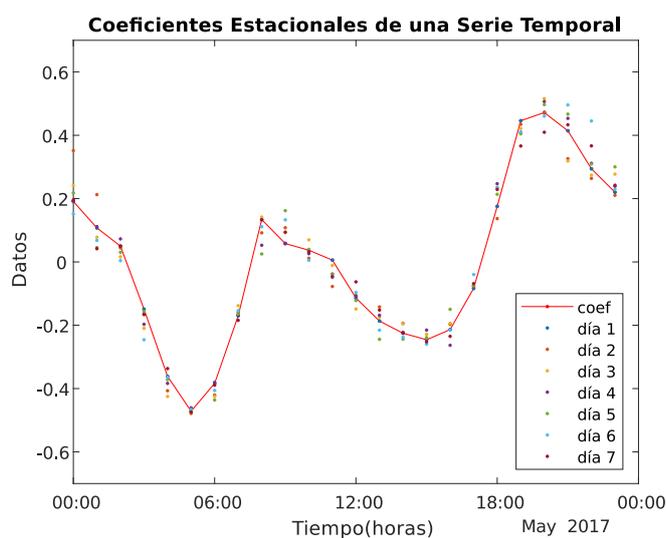


Figura 4.11: Componentes estacionales de una Serie Temporal.

4.2.3. Predicción mediante descomposición:

Una vez que eliminamos la tendencia y la estacionalidad con los métodos descritos anteriormente, la serie obtenida muestra como es la componente irregular. Si queremos saber el valor de la serie en un tiempo h después de la última muestra n , sumamos la estimación de la tendencia con la componente estacional correspondiente. La componente irregular, nos va a decir que tanto es probable que se aleje la serie real, de la predicción. Nos va a dar un intervalo de confianza, en el cual no tenemos certeza, pero sí hay grandes posibilidades que se encuentre la serie futura.

Supongamos que nuestra serie tiene un período estacional l , donde la cantidad de muestras es $n = m \cdot l$. Es decir tenemos m períodos de duración l . Queremos hacer una predicción del próximo período. Los valores estimados quedan:

$$\hat{x}(n+i) = T_{n+i} + S_i \quad \forall i = 1, \dots, l \quad (4.12)$$

Siguiendo con el ejemplo de la figura 4.12 que es un ejemplo ³ que no presenta tendencia constante, calculamos la tendencia con una media móvil de orden 36 (un día y medio). Calculamos los coeficientes estacionales (Ver figura 4.13) con la serie sin tendencia. Queremos predecir el consumo del próximo día, realizamos la predicción de la tendencia mediante media móvil de orden 36 con la ecuación 4.10, y le sumamos los coeficientes estacionales calculados.

El resultado obtenido se aprecia en la figura 4.14.

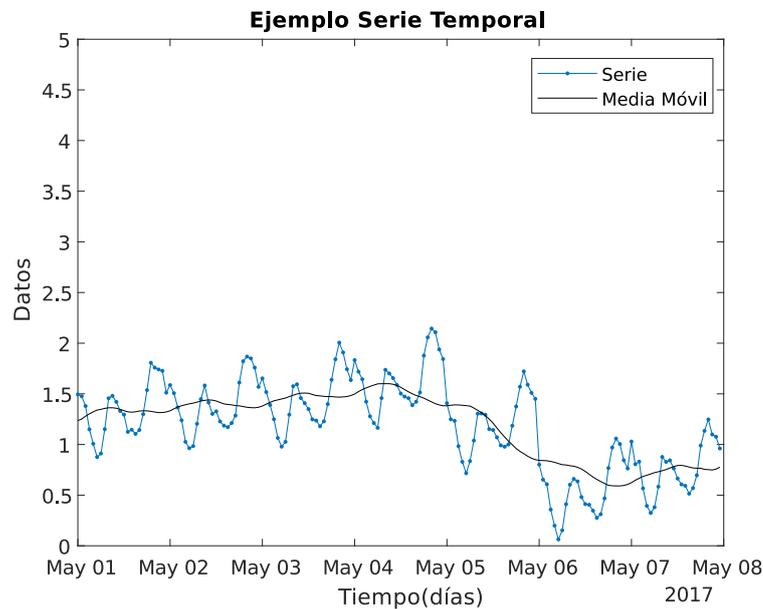


Figura 4.12: Ejemplo de serie temporal sin tendencia clara.

³A efecto de observar la componente estacional y la tendencia, este ejemplo fue simulado con poco ruido, por consiguiente la componente irregular es baja y no tiene sentido observar los intervalos de confianza, pero sí va a ser fundamental al predecir con datos reales

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

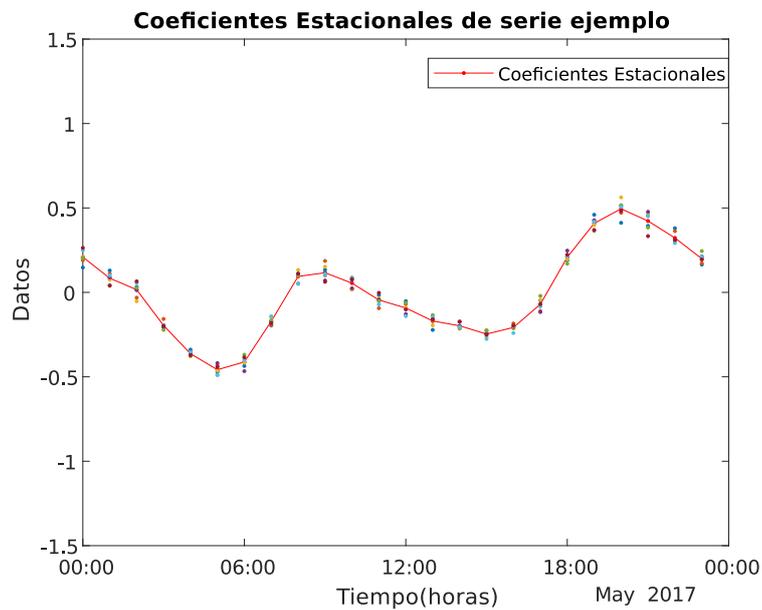


Figura 4.13: Coeficientes estacionales de la serie ejemplo.

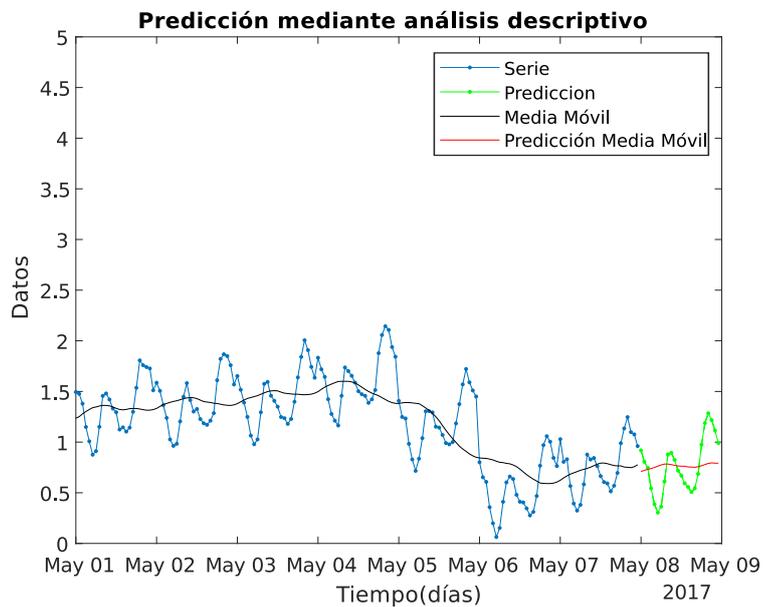


Figura 4.14: Predicción mediante Análisis Descriptivo.

Para estudiar el enfoque de predicción de Box-Jenkins, primero tenemos que repasar algunos conceptos que se utilizan para estos modelos. En el apéndice D se verán que son los procesos estocásticos, y herramientas fundamentales para el

modelado de series temporales.

4.3. Modelo ARMA:

Dentro de los más simples y utilizados modelos para procesos estocásticos estacionarios, se encuentra el modelo ARMA. Un “*Autoregressive moving-average model*” está compuesto de dos modelos menores que veremos en detalle en las próximas secciones.

Un modelo autoregresivo (AR) es una ecuación lineal diferencial de coeficientes constantes, donde la función de entrada es un proceso de ruido blanco.

Un modelo de media-móvil (MA), expresa una secuencia estocástica como una combinación lineal de valores pasados de un proceso de ruido blanco ⁴.

Un modelo ARMA es una ecuación diferencial cuya función de entrada es un proceso de media-móvil [30].

4.3.1. Modelo de Media móvil (MA):

Un proceso de media-móvil de orden q o $MA(q)$, es definido por la siguiente ecuación ⁵:

$$y(t) = \theta_0\varepsilon(t) + \theta_1\varepsilon(t-1) + \dots + \theta_q\varepsilon(t-q) \quad (4.13)$$

donde $\varepsilon(t)$ es un proceso de ruido blanco (Proceso Idénticamente distribuido y de media nula). La ecuación se puede normalizar eligiendo $\theta_0 = 1$.

También puede ser escrita de manera sumariada, como:

$$y(t) = \theta(L)\varepsilon(t) \quad (4.14)$$

$\theta(L) = \theta_0 + \theta_1L + \dots + \theta_qL^q$ es un polinomio donde L es el operador de retardo, tal que $L^j f(t) = f(t-j)$. En la figura 4.15 se observa el diagrama de filtros para un proceso MA.

Todo proceso MA es por definición estacionario, ya que dos elementos y_t e y_s representan la misma función de secuencias idénticamente distribuidas $\{\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_{t-q}\}$ y $\{\varepsilon_s, \varepsilon_{s-1}, \dots, \varepsilon_{s-q}\}$.

Usualmente también se pide que el proceso sea invertible:

$$\varepsilon(t) = \theta^{-1}(L)y(t)$$

Donde $\theta^{-1}(L) = \psi(t)$ es una serie cuyos coeficientes cumplen la condición de absoluta sumabilidad:

⁴No confundir con el método de análisis de la tendencia mediante media móvil, visto en la sección 4.2

⁵A la serie $y(t)$ se le removió la media μ para simplificar cálculos.

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

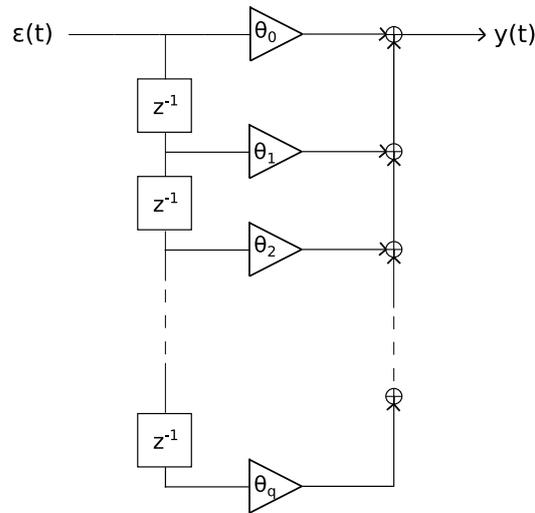


Figura 4.15: Diagrama de filtros para un proceso MA.

$$\sum_i |\psi(t)_i| < \infty$$

Esta es una representación del modelo MA, como un modelo autoregresivo (AR) de orden infinito. Solo es posible realizar la inversión, si todas las raíces del polinomio $\theta(z) = \theta_0 + \theta_1 z + \dots + \theta_q z^q = 0$ quedan afuera del círculo unidad.

Algunas propiedades de los procesos de media móvil:

- La función de autocorrelación simple de un proceso de Media Móvil se hace cero a partir del valor de retardo $q+1$.
- La función de autocorrelación parcial de un proceso de Media Móvil tiende a cero rápidamente.

4.3.1.1. Media-móvil de orden 1

Cuando el orden (q) del modelo MA es igual a uno, y normalizamos con $\theta_0 = 1$ la ecuación 4.13 queda:

$$y(t) = \varepsilon(t) + \theta_1 \varepsilon(t - 1)$$

Podemos calcular las variables características del proceso:

- Media: $E\{y(t)\} = E\{\varepsilon(t)\} + \theta_1 E\{\varepsilon(t - 1)\} = 0$
- Varianza: $Var\{y(t)\} = \sigma_\varepsilon^2 (1 + \theta_1^2)$
- Función de Autocorrelación:

$$\rho_1 = \frac{\theta_1}{1 + \theta_1^2}, \quad \rho_k = 0 \quad \forall k \geq 2$$

4.3. Modelo ARMA:

La función de autocorrelación de un proceso MA(1) ⁶ vale cero para todos los valores mayores a uno. Por lo tanto, si analizamos una serie temporal cuyo correlograma presenta una característica similar, es correcto asumir que es va a comportar como un modelo MA(1).

4.3.1.2. Media-móvil de orden 2

De manera similar que para el modelo MA(1), elegimos q igual a dos y normalizamos la ecuación 4.13:

$$y(t) = \varepsilon(t) + \theta_1\varepsilon(t-1) + \theta_2\varepsilon(t-2)$$

Calculamos las variables características del proceso:

- Media: $E\{y(t)\} = 0$
- Varianza: $Var\{y(t)\} = \sigma_\varepsilon^2(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2)$
- Función de Autocorrelación:

$$\rho_1 = \frac{\theta_1 + \theta_1\theta_2}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2}, \quad \rho_2 = \frac{\theta_2}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2}, \quad \rho_k = 0 \quad \forall k \geq 3$$

Similar análisis, se puede hacer para el correlograma del proceso MA(2), vale cero para los valores mayores a dos. Cualquier serie estacionaria cuyo correlograma presente características similares, se puede modelar como un MA(2).

4.3.1.3. Media-móvil de orden q

En el caso genérico del modelo, se concluye, que el correlograma va a ser cero para todos los valores mayores que el orden q.

La función de autocorrelación, para el caso MA(q) queda:

$$\rho_k = \frac{\sum_{i=0}^q \theta_i \theta_{k+i}}{\sum_{i=0}^q \theta_i^2} \quad \forall k = 1, \dots, q$$

$$\rho_k = 0 \quad \forall k > q$$

También es posible demostrar (no se hará en esta documentación), que la autocorrelación parcial (PACF) de un proceso MA(q) es distinta de cero para todos los valores de retardos. Sin embargo, se cumple que va a decaer a cero exponencialmente.

⁶Para más información sobre la función de autocorrelación simple y parcial ver apéndice D.

4.3.2. Modelo Auto-regresivo (AR):

Un proceso Autorregresivo de orden p o $AR(p)$, se defina por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon(t) = \alpha_0 y(t) + \alpha_1 y(t - 1) + \dots + \alpha_p y(t - p) \quad (4.15)$$

Opera bajo la premisa de que valores pasados tienen un efecto en los valores presentes. Es decir que un modelo Autorregresivo, es un proceso estocástico en el cual los valores futuros son estimados en base a una suma ponderada de valores pasados y un ruido aleatorio. En la figura 4.16 se observa el diagrama de filtros correspondiente a un proceso AR.

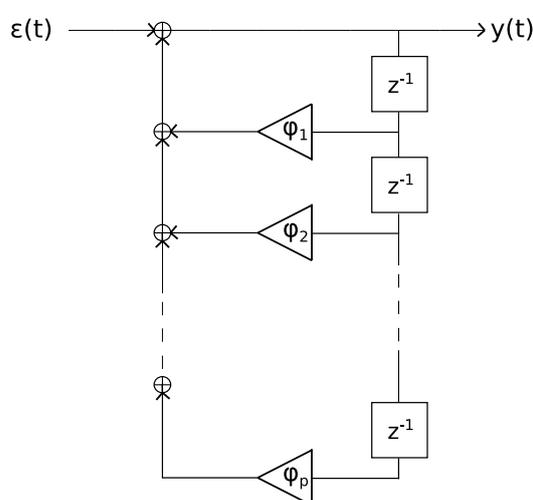


Figura 4.16: Diagrama de filtros para modelo AR

Para dejar esta idea más en claro, se puede reordenar y normalizar la ecuación 4.15:

$$y(t) = \varphi_1 y(t - 1) + \varphi_2 y(t - 2) + \dots + \varphi_p y(t - p) + \varepsilon(t) \quad (4.16)$$

Se puede hacer un mismo estudio que para el MA, y vemos que bajo la condición de que las raíces del polinomio $\alpha(z) = \alpha_0 + \alpha_1 z + \dots + \alpha_p z^p = 0$ quedan fuera del círculo unidad; entonces el proceso AR se convierte en un proceso de media móvil de orden infinito.

Algunas propiedades de los procesos Autorregresivos:

- La función de autocorrelación simple de un proceso Autorregresivo tiende a cero rápidamente.
- La función de autocorrelación parcial de un proceso Autorregresivo se hace cero a partir del valor de retardo $p+1$

4.3. Modelo ARMA:

4.3.2.1. Proceso Autorregresivo de orden 1

Cuando el orden (p) del proceso AR es igual a uno la ecuación 4.16 queda:

$$y(t) = \varphi_1 y(t-1) + \varepsilon(t)$$

- Función de Autocorrelación:

$$\rho_k = \varphi_1^k \quad (4.17)$$

De la ecuación 4.17 se desprende que la función de autocorrelación (ACF) de un proceso AR(1) no se anula para ningún valor de k , pero tiende a cero exponencialmente.

No haremos la demostración, pero la función de autocorrelación parcial de un proceso AR(1) es igual a:

$$\phi_{kk} = \begin{cases} \varphi_1 & k = 1 \\ 0 & k \geq 2 \end{cases}$$

La función de autocorrelación parcial de un proceso AR(1) se hace cero luego del primer valor de retardo. Estas propiedades se pueden extender para el caso de un proceso AR(p).

4.3.3. Autoregressive Moving Average (ARMA)

Un proceso autorregresivo de media móvil, de orden p y q , que se conoce como *ARMA*(p, q), es definido por la siguiente ecuación :

$$y(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i y(t-i) + \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon(t-j) \quad (4.18)$$

En definitiva, un proceso ARMA es una suma de, una combinación lineal de muestras pasadas (proceso AR), con una combinación lineal de error (proceso MA). En la figura 4.17 podemos observar el diagrama de filtros para un proceso ARMA.

4.3.3.1. Modelo ARIMA

El modelo ARMA, solo puede aplicarse para describir series temporales estacionarias y ergódicas. Como en la práctica, las series generalmente no cumplen estas restricciones “fuertes”, surge otro modelo. El modelo ARIMA (“*Autoregressive Integrated Moving-Average*”), permite convertir a la serie a estudiar, en una serie apta para el modelo ARMA.

Los pasos para poder realizar una predicción mediante un modelo ARIMA se observan en la figura 4.18.

Los pasos serían los siguientes:

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

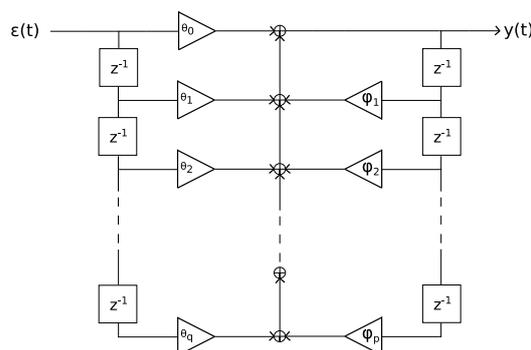


Figura 4.17: Diagrama de filtros para modelo ARMA

1. Graficamos la serie temporal y sus ACF y PACF.
2. Estudiamos si es estacionaria o no. En caso de no ser estacionaria, aplicamos métodos para eliminar la tendencia y las componentes estacionales.
3. Mediante la observación de los correlogramas, elegimos el modelo que mejor se adapta (órdenes p y q).
4. Estimamos los coeficientes del modelo (φ_i y θ_j ⁷).
5. Realizamos un diagnóstico del modelo seleccionado. Existen distintas técnicas, que permiten comprobar si el modelo elegido se ajusta a la serie temporal.
6. Una vez que contamos con los coeficientes, y sabemos que el modelo se ajusta, realizamos la predicción con la ecuación 4.18.
7. Luego de contar con los valores reales, se puede comparar la predicción y evaluar que tan acertada fue.

4.3.3.2. Identificación del Modelo:

Las propiedades para el ACF y PACF que se cumplían en los procesos MA y AR ya no se cumplen en el modelo ARMA. Para este proceso las funciones de autocorrelación simple y parcial tienden a cero muy rápidamente a partir de ciertos valores. Podemos elegir valores de retardo para los cuales las funciones ACF y PACF empiezan a decrecer. El valor a partir del cual la función ACF comienza a decrecer a cero, va a ser un q óptimo para nuestro modelo ARMA. El valor para el cual la función PACF comienza a decrecer a cero va a ser un p óptimo.

⁷Para la estimación de los coeficientes se utilizan técnicas muy complejas que escapan de este proyecto, lo que haremos es calcularlas con paquetes de python ya especializados para esa tarea.

4.3. Modelo ARMA:

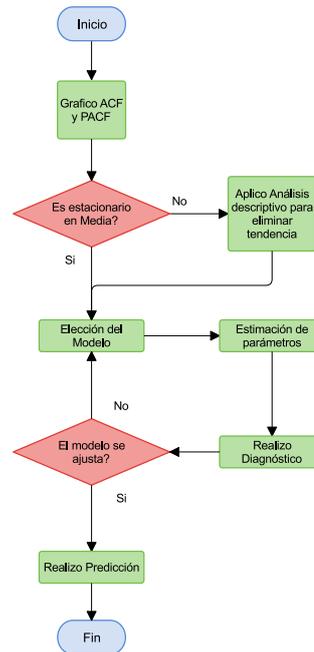


Figura 4.18: Diagrama de flujo para un modelo ARIMA.

4.3.3.3. Evaluación de la predicción:

Se utilizan distintos valores para evaluar la fiabilidad de la predicción. Estos valores deben ser comparados una vez que ya obtenemos los datos reales de la serie.

1. Suma de regresión cuadrática(SSR):

$$SSR = \sum_{i=1}^h y_i - \bar{y}_i \quad (4.19)$$

donde, y son los datos de la serie, \bar{y} son los datos predichos y h el número de muestras estimadas.

2. Error cuadrático medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4.20)$$

3. Desviación media absoluta (MAD):

$$MAD = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h |y_i - \bar{y}_i| - \mu \quad (4.21)$$

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

Siendo μ la media de la serie

4. Porcentaje de error absoluto medio (MAPE):

$$MAPE = \frac{100}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{|y_i|} \quad (4.22)$$

Este último es el más utilizado para comparar la predicción entre diferentes series temporales, ya que es independiente de la escala. Como desventaja está el hecho de que tiene valores muy altos, para datos cercanos a cero.

Para poder lidiar con el problema de las series con valores cercanos a cero, se crearon dos nuevos indicadores de la fiabilidad de una predicción.

5. Porcentaje de error absoluto medio simétrico (sMAPE):

$$sMAPE = \frac{100}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{|y_i| + |\bar{y}_i|} \quad (4.23)$$

6. Error absoluto medio escalado (MASE):

$$MASE = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{\frac{1}{h-1} \sum_{i=2}^h |y_i - y_{i-1}|} \quad (4.24)$$

4.3.3.4. Ejemplo de modelo ARIMA

Vamos a continuar con los ejemplos de la sección 4.2. En la figura 4.19 tenemos un ejemplo de serie temporal a la cual queremos realizar un modelo ARIMA y predecir el comportamiento futuro.

El primer paso es deshacernos de las componentes estacionales y de la tendencia de la serie, para lograr un proceso estocástico estacionario y ergódico. Los valores resultante son las componentes irregulares de la serie, y es la que presenta elementos aleatorios (Ver figura 4.20).

El siguiente paso es graficar los ACF y PACF para poder elegir el modelo adecuado. Como se observa en la figura 4.21, la serie presenta un rápido decaimiento a valores cercanos a cero para retardos mayores a uno, tanto en el ACF como en el PACF. Por esta razón elegimos un modelo ARMA (1,1) ⁸.

Luego de elegir el modelo, calculamos los coeficientes y realizamos la predicción (Ver figura 4.22).

⁸Es de suponerse este comportamiento, ya que a una serie de valores establecidos le sumamos un ruido blanco aleatorio, entonces los valores no están correlacionados entre sí.

4.3. Modelo ARMA:

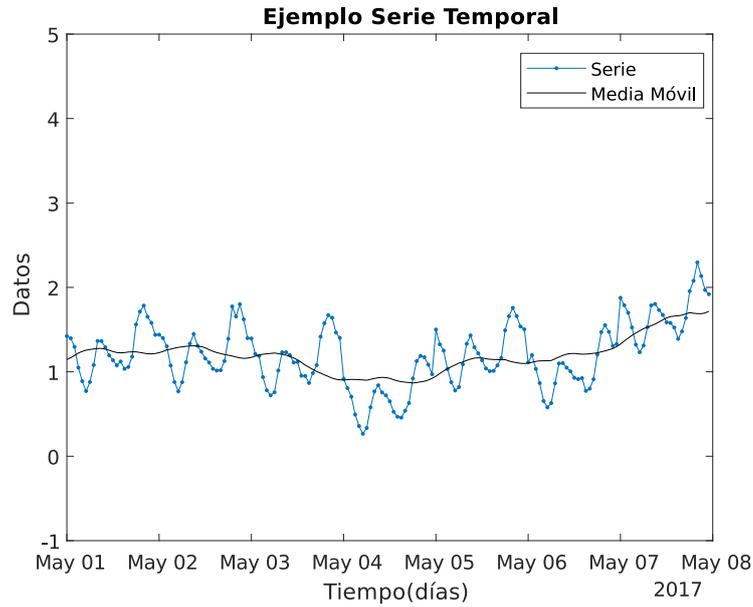


Figura 4.19: Serie Temporal de ejemplo a predecir.

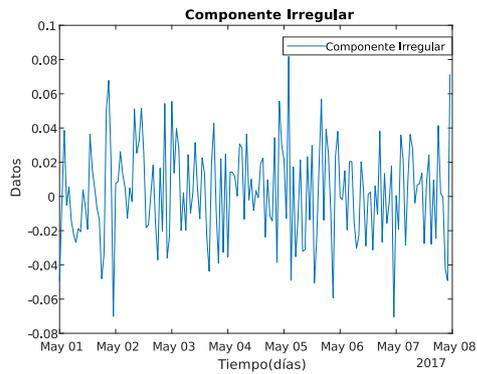


Figura 4.20: Componente Irregular de la serie temporal.

Una vez que tenemos la predicción de los componentes irregulares, sumamos la estimación de la tendencia, y los coeficientes estacionales, como se explicó en la sección 4.2 . Obtenemos una predicción del próximo día de la serie, que se puede ver en la figura 4.23. En la figura 4.24 se observa la comparación entre la serie en el día ocho y la predicción. Se puede observar que la predicción sigue con bastante certeza a la serie original, pero hay un pequeño error en la predicción de la media. La diferencia en la media se debe a que en esta serie ejemplo se tomó una media aleatoria y es difícil de predecir, en el caso real del consumo eléctrico vamos a ver que la media en un mes va a permanecer constante.

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

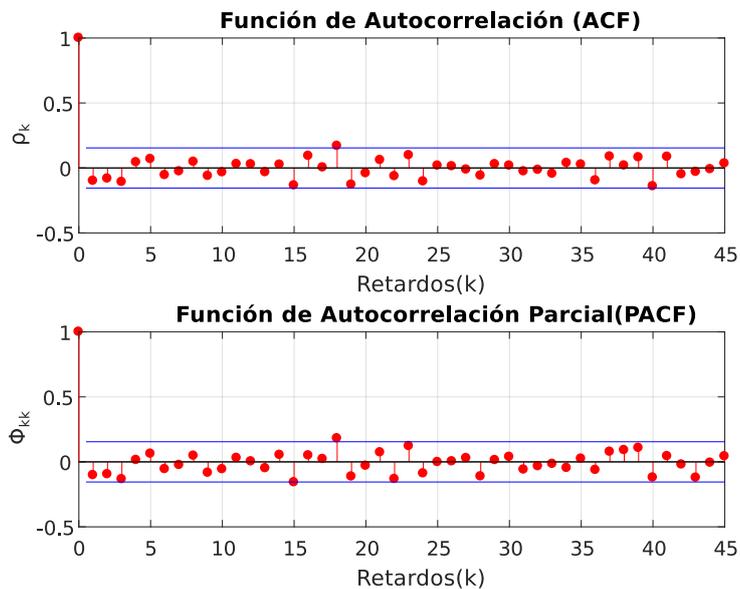


Figura 4.21: Función de Autocorrelación Simple (arriba) y Parcial(abajo) de la serie ejemplo.

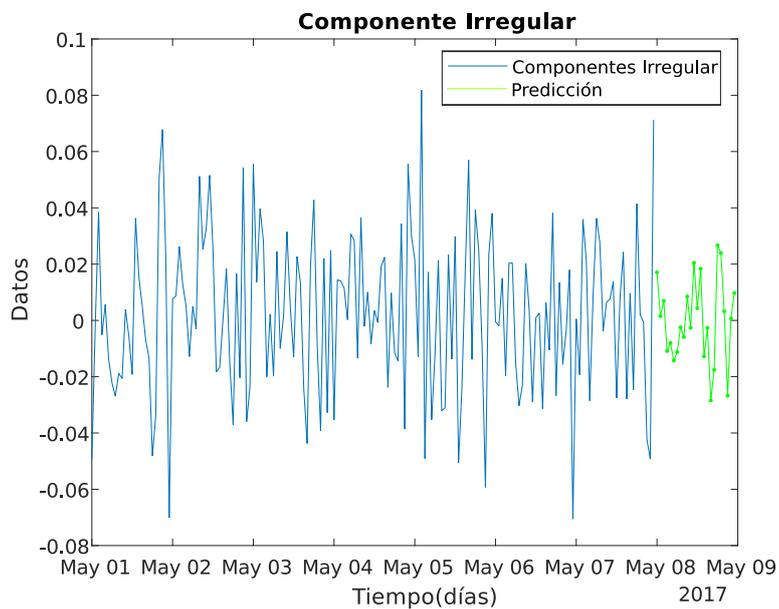


Figura 4.22: Predicción para la componentes Irregular de la Serie, mediante modelo AR-MA(1,1).

Por último, podemos hallar el MAPE de nuestra predicción, mediante la ecuación 4.22:

4.3. Modelo ARMA:

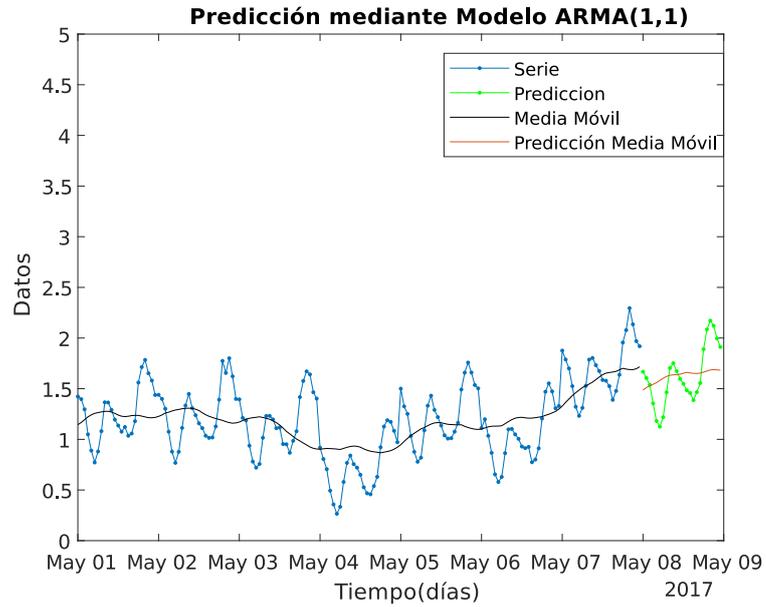


Figura 4.23: Predicción del octavo día de la serie ejemplo mediante modelo ARMA(1,1).

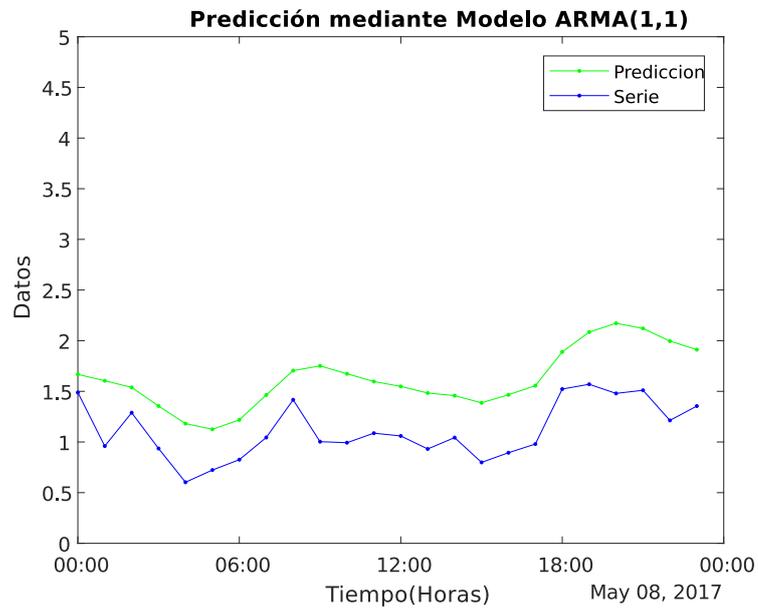


Figura 4.24: Comparación entre la serie en el octavo día y la predicción mediante modelo ARMA(1,1).

$$MAPE = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{24} \frac{100(|serie_i - \overline{prediccion_i}|)}{|serie_i|} \quad (4.25)$$

Capítulo 4. Algoritmo Predictivo

El resultado obtenido es de un MAPE de un 21.2% de error.

Capítulo 5

Software

5.1. Código General

El código general de la plataforma se puede representar mediante un diagrama de flujo como el de la figura 5.1. Al empezar, el sistema solicita al usuario que se ingresen dos datos, T_{sleep} y T_{medida} . T_{sleep} es el tiempo en segundos entre dos mediciones de potencia, es decir el sistema realiza una medición y luego queda inactivo durante un tiempo T_{sleep} antes de volver a realizar otra medida. T_{medida} es la cantidad de días que queremos que dure la medición total.

El sistema se divide en 2 etapas, Etapa A y Etapa B. La Etapa A es la encargada de realizar la medida de potencia, mientras que la Etapa B es la que ejecuta la predicción. Dado que se efectúan varias medidas, la Etapa A va a entrar en bucle, repitiéndose cada T_{sleep} segundos. Mientras que la Etapa B se va a realizar tantas veces como predicciones quiera hacer el usuario.

Una vez ingresados los tiempos, el sistema comienza a medir hasta que se alcanza la hora de finalizar, momento en el cual solicita h , la ventana de tiempo futura para la cual se va a realizar la predicción. Con los datos de potencia medidos en la Etapa A y la ventana de tiempo h recientemente ingresada, la Etapa B efectúa la predicción y grafica los resultados. Finalmente es posible ingresar un nuevo valor de h para crear una nueva predicción.

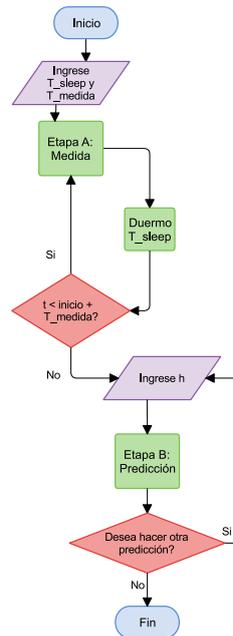


Figura 5.1: Diagrama de flujo general del Software

5.1.1. Tiempos de ejecución

La etapa A realiza la medición de corriente y voltaje durante un segundo, y tiene aproximadamente veinte segundos de procesamiento, razón por la cual T_{sleep} no puede ser inferior a ese valor. El sistema ya tiene en cuenta estos valores, por lo que el tiempo en que realmente duerme, es T_{sleep} menos los veinte segundos de medida y procesamiento (Ver figura 5.2). Para quedar libres de dudas, si a la plataforma se le ingresa un T_{sleep} menor a 25 segundos, el sistema va a solicitar que se digite nuevamente un valor mayor. No hay restricciones para el valor de T_{medida} . Para no saturar la etapa B, es recomendable que si se van a medir varios días, no tomar las muestras demasiado seguidas.

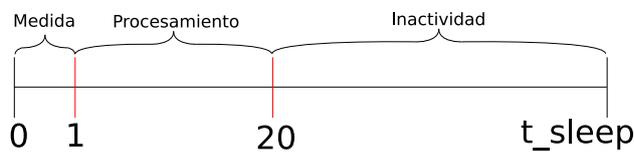


Figura 5.2: Diagrama temporal de la etapa A.

Luego de finalizado los repetido ciclos de Etapas A, y superado el tiempo T_{medida} , se solicita por el valor de h y se realiza la etapa B (Ver figura 5.3). La Etapa B la maneja el usuario, por lo que la duración no va a depender de la máquina.

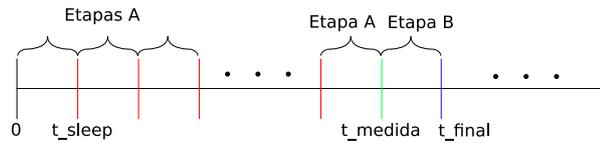


Figura 5.3: Diagrama temporal de un ciclo del sistema.

Un ejemplo del ciclo completo de la plataforma es el siguiente:

- A las 08:00 se inicia el sistema y el mismo solicita los valores de T_medida y T_sleep
- El usuario ingresa $T_final=7$, esperando obtener una semana entera de medidas.
- El usuario ingresa $T_sleep=60$, para conseguir muestras de potencia cada 60 segundos.
- Con esos valores ingresados el sistema entra en bucle hasta las 08:00 de la semana siguiente.
- Se finaliza el ciclo de las repetidas etapas A y se guardan $10.080(60 * 24 * 7)$ datos en un archivo de texto.
- Se solicita al usuario que ingrese el valor de la ventana de tiempo futura que quiere estimar.
- El usuario quiere saber el consumo estimado del día próximo, por lo que ingresa $h=24:00:00$.
- Se ejecuta la Etapa B, y al finalizar se obtiene un gráfico con los resultados.
- Como el usuario no desea hacer más predicciones contesta que no a la consulta de hacer nueva estimación.

La conexión entre ambas etapas se da a través de un archivo de texto. Durante el proceso de medición el algoritmo va guardando los datos de potencia en un `.txt`, que posteriormente la Etapa B utiliza para desarrollar la predicción. El archivo se abre solo para realizar la escritura y luego se cierra. Otorgando la posibilidad de que ante una falla o desconexión del sistema, no queda dañado y se puedan recuperar los datos medidos hasta el momento.

5.1.2. Implementación del Código

Para generar este ciclo de medidas y predicciones en Python, creamos dos clases, una por cada etapa. El cuerpo principal del código es el encargado de solicitar

Capítulo 5. Software

los datos al usuario, realizar el bucle de la Etapa A, realizar la Etapa B y finalmente desplegar los resultados. En la figura 5.4 se observa el pseudocódigo del sistema.

```
Ingresar T_medida y T_sleep
Hora_Inicial = tiempo
Hora = Hora_Inicial
while Hora - Hora_Inicial  $\leq$  T_medida do
    Etapa A
    Duermo T_sleep
    Hora = tiempo
end while
while Quiera hacer predicciones do
    Ingresar h
    Etapa B
end while
```

Figura 5.4: Pseudocódigo del sistema general.

Cada una de las etapas a su vez se dividen en 3 fases bien diferenciadas, que cumplen objetivos específicos. En las próximas secciones entraremos en detalle en cada una de estas fases, pero se pueden resumir de la siguiente manera:

- Etapa A - Medida:
 - **Fase A1 - Adquisición de Datos:** Se adquieren los datos de Corriente y Voltaje a través del BUS I2C de Raspberry Pi. Además se registran los tiempos en que se realiza cada muestreo. También permite guardar datos en un archivo de texto para luego leerlo, esto fue especialmente útil para realizar pruebas y simulaciones.
 - **Fase A2 - Tratamiento de Señales:** Realiza la reconstrucción de la señal mediante el teorema de muestreo. La señal reconstruida tiene una frecuencia mayor que la original.
 - **Fase A3 - Cálculo de Potencia:** Se miden los máximos de cada señal, se ven los desfases entre ellos y finalmente se calcula la potencia activa con los datos anteriores. Nuevamente se mide el reloj para saber el momento en que se calculó la potencia. Los datos de potencia y tiempo son registrados en un archivo de texto.
- Etapa B - Predicción:
 - **Fase B1 - Lectura de Datos:** Se leen los datos de potencia del archivo de texto creado por la fase A3.

- **Fase B2 - Modelado:** Primero se adecua la señal para poder estimar. Mediante distintos métodos estadísticos se calculan los mejores P y Q para el modelo del ARMA. Gracias al paquete Python Pyflux se hallan los coeficientes del modelo.
- **Fase B3 - Predicción:** Con los valores de P, Q, coeficientes y datos de la potencia, se realiza una predicción de una ventana "h" hacia el futuro.

5.2. Etapa A: Medición

La Etapa A es la encargada de conectarse con el ADC, tomar las medidas de los canales correspondientes, guardar esa información, y procesarla para obtener el valor de la potencia. Como se mencionó anteriormente este proceso se divide en tres fases secuenciales y obligatorias. Diseñamos una sola clase de Python que permite ejecutar todas las fases. El diagrama de bloques para esta etapa se observa en la figura 5.5. La clase EtapaA cuenta con diferentes métodos que en conjunto implementan las distintas fases que se especifican en el diagrama de bloques 5.5. A continuación listamos cada una de estos métodos y su función principal:

- **leer_BUS:** Método que alternativamente lee los canales del ADC, acondiciona el resultado y lo guarda en memoria. Además consulta la hora en que se realiza la medida.
- **escribir_TEXTO:** Sirve para escribir los resultados de una medida en un archivo de texto. Pueden ser los resultados finales de la potencia, o los valores de corriente y voltaje medidos. Esto es especialmente útil al momento de realizar medidas en el laboratorio y probar otras funciones luego.
- **leer_TEXTO:** Se ocupa de leer los archivos de texto que fueron escritos mediante escribir_TEXTO.
- **Reconstruir:** Método para reconstruir la señal mediante el teorema de muestreo.
- **CalculoPotencia:** Calcula la Potencia Activa con las dos señales reconstruidas.

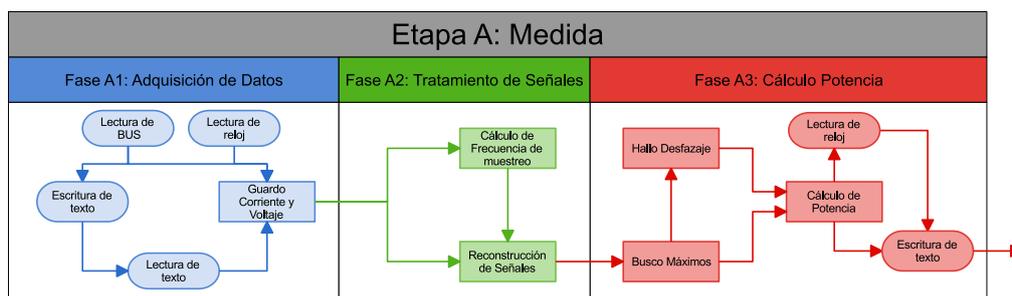


Figura 5.5: Diagrama de bloques de la Etapa A.

El Pseudocódigo de la EtapaA es bastante simple(Ver figura 5.6) ya que se da de manera secuencial, en principio sin bucles o ciclos ¹:

```

Creo instancia EtapaA
Datos = EtapaA.leer_BUS
Datos_reconstruidos = EtapaA.Reconstruir(Datos)
Potencia = EtapaA.CalculoPotencia(Datos_reconstruidos)
EtapaA.escribir_TEXTO(Potencia)
    
```

Figura 5.6: Pseudocódigo de la Etapa A.

5.2.1. Fase A1: Adquisición de Datos

5.2.1.1. Implementación

Las principales librerías de Python que utilizamos en esta etapa se pueden ver en el apéndice E. Con las librerías ADS1x15 y Time, generamos el método `leer_BUS` que muestrea alternativamente los canales del ADC, mide el tiempo en segundos desde que comienza la lectura, ajusta los valores de voltaje y corriente y los guarda en memoria. En la figura 5.8 observamos el diagrama de flujo para este método. A continuación, en la figura 5.7 mostramos el pseudocódigo utilizado:

De los modos posibles del ADS1015 elegimos utilizar el modo Singular Diferencial. Diferencial porque las salidas de los medidores son diferenciales como se explica en el capítulo 3. En cuanto a la razón del uso Singular, nos encontramos con algunos problemas que pasamos a explicar a continuación.

El modo continuo diferencial logra velocidades máximas de 3300 Hz. El problema surge cuando queremos utilizar alternativamente los canales del ADC. El modo continuo diferencial inicia la lectura de la resta de los canales 0 y 1, solicitamos el último resultado con `get_last_result()`, y ahora debemos terminar la lectura con `stop_adc()` antes de poder iniciar la lectura en los canales 2 y 3. Esto genera una gran pérdida de tiempo entre los procesos de encender la lectura, tomar el

¹Internamente cada función realiza bucles, pero se verán próximamente.

```

tiempo_cero = time.time()
tiempo = tiempo_cero
while tiempo - tiempo_cero  $\leq$  1 do
    voltaje = adc.read_adc_difference(0, gain=1)
    corriente = adc.read_adc_difference(3, gain=1)
    tiempo = time.time() - tiempo_cero
end while
Ajusto valores
Guardo en memoria

```

Figura 5.7: Pseudocódigo del método leer_BUS.

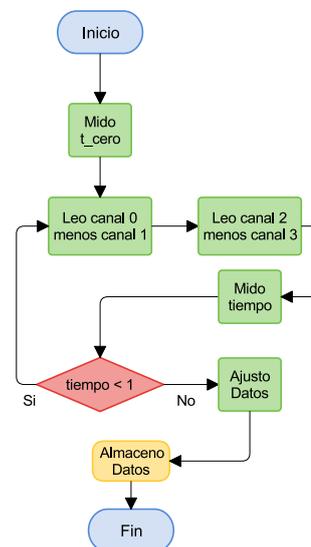


Figura 5.8: Diagrama de flujo del método leer_BUS.

resultado y detener la lectura. Los tiempos aproximados con este modo son de 5.3 ms (189 Hz de frecuencia).

Con el Modo Singular logramos bajar estos tiempos a 3.2 mili-segundos (312 Hz), pero aún siguen siendo bastante altos. El hecho de que el ADS1015 cuenta con un solo convertor analógico digital hace necesario alternar los canales para medir, y las altas frecuencias de muestreo que se especifican en la “datasheet” del integrado sean engañosas. Implementamos un código para realizar estas pruebas, los resultados obtenidos los podemos observar en la figura 5.9.

Elegimos utilizar ganancia igual a 1 ya que con este valor se cubre el full scale de la salida de los medidores como se indica en la tabla 5.1.

Capítulo 5. Software

```
dimari@dimari-desktop:~/codigos/pruebas$ python3 velocidadlectura.py

La diferencia de tiempo entre dos medidas con Modo Singular Diferencial es : 0.003190279
006958008

La diferencia de tiempo entre dos medidas con Modo Continuo Diferencial es : 0.005338430
404663086
```

Figura 5.9: Pruebas de velocidad de lectura del ADS1015.

Ganancia (G)	FS (V)
2/3	± 6.144V
1	± 4.096V
2	± 2.048V
4	± 1.024V
4	± 0.512V
4	± 0.256V

Tabla 5.1: Rangos de Full-Scale según el valor de la ganancia.

El ajuste de valores del pseudo-código 5.7 hace referencia a tres modificaciones que son necesarias:

- **Ajuste de Cuantización:** La salida del convertor esta codificada como indica la figura 5.10, donde FS es el “Full-Scale” y depende del valor elegido de la ganancia según la tabla 5.1. En nuestro caso elegimos una ganancia de 1, por lo que nuestro Full-Scale es 4.096. Multiplicando la salida por el Full-Scale y dividiendo entre la cantidad de intervalos obtenemos el valor de la entrada. En nuestro caso la ecuación 5.1 es la que se tiene que realizar mediante software para recuperar los datos de la entrada.

$$entrada = \frac{salida * FS}{2^{bits-1}} = \frac{salida * 4,096}{2^{11}} \quad (5.1)$$

- **Ajuste de Medidor:** Los medidores a la salida, tienen una componente continuo sumado a la pequeña señal sinusoidal, como se explicó en la sección 2.2. Además tienen una ganancia que amplifica la señal de entrada. Debemos restar el valor de continua y dividir entre la ganancia del medidor. Esta operación depende del medidor, por lo que varía con la elección del mismo.
- **Ajuste de Conexión:** Este ajuste representa la diferencia entre lo que el medidor está midiendo y lo que se quiere obtener a partir de esta medida. Es decir si el medidor de voltaje obtiene el valor de corriente que pasa por un divisor resistivo y queremos saber el voltaje, debemos realizar la operación necesaria para calcularlo.

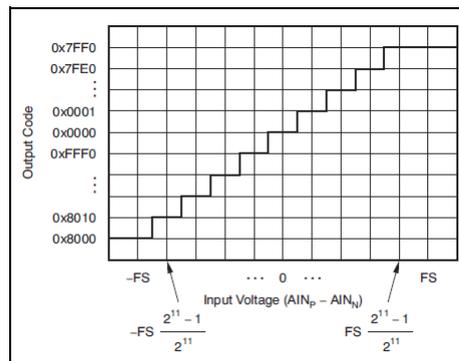


Figura 5.10: Gráfico de cuantización del ADS1015.

Los otros métodos que se pueden implementar durante esta fase, son los de escritura y lectura de texto. Son métodos simples que crean o abren un archivo de texto, y línea a línea van escribiendo o leyendo el contenido.

5.2.2. Fase A2: Tratamiento de Señales

La necesidad de esta fase surge ante el problema de las bajas frecuencias de muestreo que se alcanzan con el ADC, al querer medir dos señales en paralelo. Como se demostró en la sección anterior, la mayor velocidad que se consiguió es de 312 Hz.

Este resultado es incluso peor cuando avanza el tiempo, llegando a valores de 200 Hz luego de pasado un segundo de medida. Una frecuencia de muestreo de 200 Hz, implica que en una señal de 50 Hz vamos a tener cuatro muestras por ciclo. Al tener tan pocos valores, el cálculo de la potencia se hace complicado y poco preciso.

Es necesario entonces, a partir de las muestras obtenidas, reconstruir la señal y evaluarla a una frecuencia mayor para poder hacer cálculos con mayor exactitud.

5.2.2.1. Teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon

El teorema de muestreo es uno de los más populares dentro de las telecomunicaciones. Fue publicado por Harry Nyquist en 1928, en un documento denominado "Certain topics in telegraph transmission theory". En su artículo, Nyquist mostraba que pulsos de muestreo de hasta $2B$ podrían ser transmitidos por un canal de ancho de banda B .

Nyquist no consideraba el problema de muestrear señales continuas y luego reconstruirlas. Este idea fue introducida y demostrada por V. Kotelnikov en su trabajo "On the transmission capacity of the ether and of cables in electrical communications" (1933). Sin embargo no fue hasta el año 1949, que Claude Shannon publicó dos artículos fundamentales que crearon la Teoría de la Información, y de-

Capítulo 5. Software

mostraron el Teorema de muestreo. Desde entonces se ha vuelto una herramienta esencial en las comunicaciones y en la digitalización de señales [25].

El Teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon especifica que:

“Dada una señal continua en el tiempo, con un ancho de banda delimitado B , que es muestreada a una frecuencia F_m . Es posible reconstruir perfectamente la señal original a partir de sus muestras, siempre y cuando F_m sea igual o mayor que $2B$ ”(Ver ecuación 5.2).

$$F_m \geq 2B \quad (5.2)$$

En caso de querer reconstruir la señal a partir de las muestras se utiliza la ecuación 5.3

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x(nT) \cdot \frac{\sin[\pi F_m(t - nT)]}{\pi F_m(t - nT)} \quad (5.3)$$

5.2.2.2. Implementación

Antes de implementar el código que reconstruya la señal, debemos asegurarnos que se cumplan las hipótesis para el Teorema de Muestreo. Estas hipótesis no son tan rígidas, y se pueden evitar con cierta rigurosidad, resultando en un error a la hora de la reconstrucción.

Hipótesis:

- La señal es de ancho de banda acotado:
Si bien nuestra señal es de 50 Hz, contiene componentes de alta frecuencia (ruido y transitorios) que al inicio del proyecto deseábamos medir. Al samplear nuestra señal a 330 Hz, se pierde gran parte de esas componentes, quedándonos en principio con la componente principal de 50 Hz.
- El período de muestreo es constante:
El teorema de muestreo puede generalizarse para el caso en que la señal es muestreada a una tasa no constante, como en nuestro caso. En esta situación se promedia la frecuencia de muestreo, y si el promedio cumple la condición de Nyquist-Shannon, entonces se puede reconstruir la señal. Como mencionamos anteriormente, el conversor no logra samplear a un tiempo exactamente constante, por lo que es necesario medir esos tiempos entre muestras y luego promediarlos. Para no propagar demasiado el error, decidimos no realizar medidas de más de un segundo.
- La señal es acotada en el tiempo:
Se puede considerar que una señal acotada en el tiempo con duración T , es una señal infinita multiplicada por un pulso rectangular de ancho T centrado en $T/2$. En frecuencia se traduce como convolucionar a nuestro espectro

5.2. Etapa A: Medición

por un seno cardinal (transformada de Fourier del pulso rectangular). Como el seno cardinal es de ancho de banda infinito, hace que nuestra señal también sea de ancho de banda infinito, pero tendiendo a cero. Estaríamos en conflicto con la hipótesis de tener ancho de banda acotado. Al muestrear en el tiempo, lo que realizamos es periodizar el espectro de frecuencia; luego mediante la reconstrucción, aplicamos un filtro pasa bajos y obtenemos el espectro original. El problema se presenta cuando la señal no es acotada en banda, al periodizarla hay interferencia entre las distintas componentes y la reconstrucción no es perfecta.

Teniendo en cuenta estos efectos, creamos un método dentro de la clase Etapa A, llamado “Reconstruir”, cuyo pseudocódigo se observa en la figura 5.11. Decidimos no utilizar ninguna librería de Python para reconstruir la señal, ya que nos parecía sencillo y educativo hacerlo nosotros mismos.

```
for i = 0 to i = muestras - 1 do
    Tmuestreo[i] = tiempo[i+1] - tiempo[i]
end for
Calculo el promedio de Tmuestreo
Fmuestreo = 1/Tmuestreo
Creo nuevo vector tiempo con frecuencia 1 kHz
for t = 0 to t = muestras_expandidas do
    for n = 1 to n = muestras do
        sumatoria = muestras[nTmuestreo]*sinc(t-nTmuestreo)
    end for
    datos[t] = sumatoria
end for
```

Figura 5.11: Pseudocódigo del método Reconstruir.

El método comienza midiendo los tiempos entre cada muestra, para calcular el período de muestreo. Promediando y haciendo el inverso, obtenemos la frecuencia de muestreo promedio de la señal.

Creamos un nuevo vector de tiempo que inicia en cero y finaliza en el mismo momento que el vector de tiempos anterior. Elegimos para este vector de tiempos un período entre muestras de 1 mili segundo (1 kHz de frecuencia). La elección de esta frecuencia, fue simplemente por observación, más adelante se realizarán distintas pruebas, donde concluimos que 1 kHz es suficiente para reconstruir bien la señal, sin saturar el sistema.

El bucle principal del método va realizando la ecuación 5.3 para cada valor de la función evaluada en el nuevo vector de tiempo.

5.2.3. Fase A3: Cálculo de Potencia

Una vez finalizadas las fases A1 y A2, el sistema tiene en memoria dos señales (voltaje y corriente) de un segundo de duración con muestras separadas cada un

Capítulo 5. Software

mili segundo. El objetivo de la Etapa A3, es a partir de estas señales, calcular un promedio de la potencia activa medida en ese segundo. La potencia activa que entrega o consume cierto elemento de un circuito eléctrico de corriente alterna, se puede calcular como:

$$P = \frac{V_m}{2} * I_m * \cos(\varphi) \quad (5.4)$$

Siendo V_m la amplitud de la señal de voltaje, I_m la amplitud de la señal de corriente y $\cos(\varphi)$ el coseno del desfase entre ambas señales.

Teniendo la ecuación 5.4 en mente, diseñamos un método dentro de la clase EtapaA, llamado CalculoPotencia, cuya función es hallar los máximos de cada señal, ver el desfase entre ellos y luego calcular la potencia.

5.2.3.1. Búsqueda de Máximos

La búsqueda de los máximos se realizó como indica el diagrama de flujo de la figura 5.12. La idea es bastante simple, y consiste en ir recorriendo muestra a muestra los vectores de voltaje y corriente. Si hay una muestra que es mayor al valor anterior y al siguiente; entonces es un máximo. Al encontrar un máximo, no sólo guardamos en memoria el valor del mismo, sino también el valor temporal en que ocurre. Esto nos servirá luego para el cálculo de la fase.

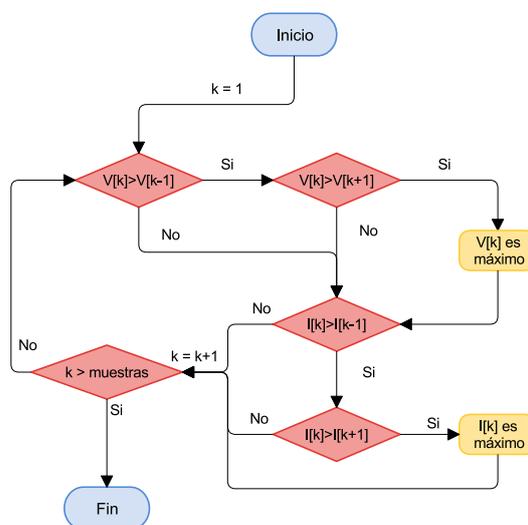


Figura 5.12: Cálculo de los máximos de las señales.

Para la siguiente parte del cálculo de la potencia es necesario que los vectores que contengan a los máximos de corriente y voltaje, sean de igual tamaño. Como no es posible controlar en que estado se encuentran las señales cuando comienza o termina la medición; realizamos un ajuste para igualar la cantidad de máximos. El ajuste consiste en fijarse cual de los vectores que contienen los máximos es mayor, y eliminar muestras hasta que queden de igual tamaño.

5.2.3.2. Cálculo de fase

Una vez conocidos los máximos, podemos calcular el desfase entre ellos de manera sencilla. Recorremos los vectores que tienen almacenados los tiempos en que se dieron los máximos, y vamos restando uno a uno los elementos. El desfase φ se evalúa como el cociente entre la diferencia de tiempos sobre el período de la señal (Ver ecuación 5.5). Este valor de φ va a ser un vector que tiene tantos elementos, como máximos hallados.

$$\varphi = \frac{t_{maxV} - t_{maxI}}{T} \quad (5.5)$$

5.2.3.3. Cálculo de la Potencia

Finalmente contamos con todos los datos necesarios para calcular la potencia con la ecuación 5.4. El resultado va a ser un vector que indica para cada período de las señales, cual es la potencia activa. Para saber los Watts que se consumieron en un segundo, promediamos nuestro vector de potencia.

Además de implementar el método que calcula la potencia, debemos registrar el tiempo en que se realiza el cálculo con el paquete `time`, para las posteriores etapas. También debemos invocar el método `escribir_TEXTO()`, para almacenar los valores en un archivo de texto. El primer valor que se guarda en el archivo de texto es la cantidad de medidas de potencia que se realizaron.

5.3. Etapa B: Predicción

La Etapa B es la que nos permite realizar una estimación a futuro próximo del consumo eléctrico del hogar. Se nutre de los datos obtenidos en la Etapa A, y corre un algoritmo que predice con cierto error los valores de potencia próximos. Como se muestra en la figura 5.13, esta etapa al igual que la anterior se puede dividir en tres fases secuenciales y obligatorias. Se desarrolló una clase Python, llamada “EtapaB” que con distintos métodos ejecuta los cálculos necesarios para la predicción. A continuación listamos los métodos que la clase “EtapaB” contiene:

- leer_POTENCIA: Método de lectura del archivo de texto creado durante la fase A3. Contiene los valores de potencia medidos durante la etapa A; y el tiempo en formato segundos desde el “epoch” en el cual se efectuaron las medidas.
- Autocorrelación: Ajusta los datos de la serie (eliminando tendencias y componentes estacionales) y calcula la autocorrelación de las muestras para poder hacer un estudio estadístico.
- ACF: Método para calcular el orden Q óptimo para el modelo.
- PACF: Similar a ACF, pero calcula el orden P óptimo.

Capítulo 5. Software

- Modelo: Es el método que construye el modelo ARMA, a partir de los datos de potencia y los órdenes P y Q. Con el modelo armado, el método devuelve los valores de los coeficientes.
- Predecir: A partir del modelo y los datos del pasado, predice los datos en una ventana de tiempo “h” hacia el futuro.

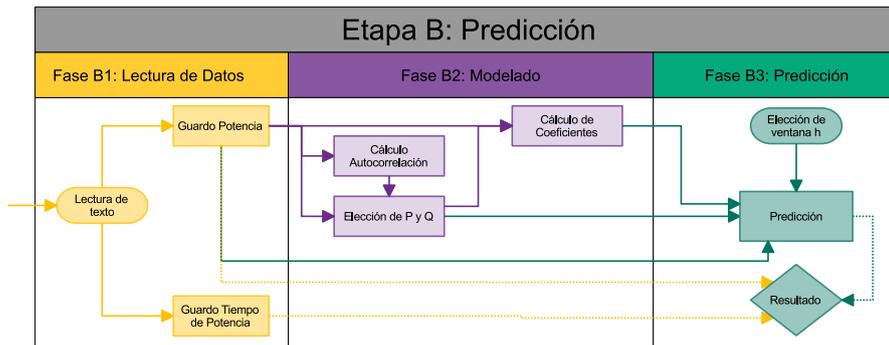


Figura 5.13: Diagrama de bloques de la Etapa B.

El pseudocódigo general de la Etapa B es sencillo, ya que hace uso de los métodos mencionados anteriormente (Ver figura 5.14).

```
Creo instancia de la clase EtapaB()
Potencia = EtapaB.leer_Potencia()
ρ = EtapaB.autocorrelacion(Potencia)
P = EtapaB.PACF(ρ)
Q = EtapaB.ACF(ρ)
EtapaB.modelo(Potencia,P,Q)
EtapaB.prediccion(Potencia,P,Q,h)
Grafico resultados
```

Figura 5.14: Pseudocódigo de la EtapaB.

5.3.1. Fase B1: Lectura de Datos

Fase sencilla, que realiza el proceso inverso que la fase A3. Se diagramó el archivo de texto para que en la primera línea contenga la cantidad de medidas de potencia realizadas. Luego todos los datos de potencia, y a continuación los datos del tiempo. Es decir que el archivo de texto va a tener $2*n + 1$ líneas, siendo n la cantidad de medidas de potencia. El método leer_POTENCIA, abre el archivo Potencia.txt, lee la primera línea y comienza un bucle de lectura. Lee los datos hasta alcanzar el final del archivo y luego devuelve los resultados. El pseudocódigo para esta fase se muestra en la figura 5.15.

```

Abro el archivo Potencia.txt
n = leo_primer_línea
for i=1 to i=2*n do
  datos = leo_línea[i]
end for
Potencia = datos[0 a n]
tiempo_Potencia = datos[n a 2*n]

```

Figura 5.15: Pseudocódigo de la Fase B1: Lectura de Datos.

5.3.2. Fase B2: Modelado

La fase encargada de hacer el tratamiento estadístico de la señal, es más compleja y larga que las otras. Hace uso de la mayoría de los métodos implementados en esta Etapa, y consume la mayor parte del tiempo de procesamiento.

Como se mencionó en la sección 5.1, debido a la complejidad matemática que presentaban los algoritmos ARMA, no nos fue posible hacer esta fase completamente por nuestra cuenta. Por consiguiente algunas de las funciones las realizamos mediante paquetes Python, mientras que otras las hacemos manualmente. El resultado es un modelo Híbrido, que tal vez no es del todo eficiente pero funciona, y nos sirvió para aprender y entender un montón de aspectos de la matemática que hay por detrás. Uno de las librerías Python a la que recurrimos fue Pyflux, en el apéndice E.7 detallamos su funcionamiento.

5.3.2.1. Implementación

Como primer enfoque, para poder utilizar la librería Pyflux, debemos elegir los órdenes P y Q que mejor se adapten a nuestro modelo. El método autocorrelación se encarga de hallar un estimador para la función de auto-correlación, que luego va a ser utilizado en los métodos ACF y PACF. Un estimador natural para la auto-correlación se halla mediante la ecuación 5.6. La autocovarianza puede ser estimada mediante la ecuación 5.7.

$$\hat{\rho}(k) = \frac{\hat{\gamma}(k)}{\hat{\gamma}(0)} \quad (5.6)$$

$$\hat{\gamma}(k) = \frac{1}{N} * \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (5.7)$$

El pseudocódigo para el método auto-correlación se puede observar en la figura 5.16. Los datos antes fueron ajustados para poder realizar la predicción, con el método que se explicó en el capítulo 4 (eliminar tendencia y componente estacional).

Capítulo 5. Software

```
for i=0 to N do
     $\bar{x} = \bar{x} + \text{datos}[i]$ 
end for
 $\bar{x} = \bar{x} / N$ 
for k =0 to N do
    for t=0 to N-k do
         $\gamma[k] = (x[t]-\bar{x}) * (x[t+k]-\bar{x}) + \gamma[k]$ 
    end for
     $\gamma[k] = \gamma[k] / N$ 
end for
 $\rho[k] = \gamma[k] / \gamma[0]$ 
```

Figura 5.16: Pseudocódigo del método Autocorrelación.

Como se explicó en el capítulo 4 las funciones de ACF y PACF son prácticamente cero a partir de Q y P. El método ACF hace uso de la autocorrelación y se fija a partir de que valores la función es menor a un error determinado, y considera ese valor como los P y Q óptimos del sistema.

Una vez que tenemos calculados los órdenes P y Q óptimos, procedemos a construir el modelo mediante el comando `modelo = pf.ARIMA(datos,ar=P, ma=Q, family=Normal())`. Luego hacemos el ajuste con MLE: `ajuste = modelo.fit('MLE')`. Para obtener los coeficientes del ajuste hacemos: `valores = ajuste.z.get_z_values()`.

5.3.3. Fase B3: Predicción

El objetivo de esta fase es obtener los valores de la predicción a partir de cinco componentes:

- Las muestras anteriores medidas en la Etapa A.
- Ruido blanco generado aleatoriamente.
- Los órdenes P y Q que mejor se adaptan al modelo.
- Los coeficientes del modelo hallados en la fase B2.
- La ventana de tiempo h, introducida por el usuario.

La ecuación 5.8 es la que calcula la predicción.

$$y = \sum_{i=0}^P AR(i) * x(t-i) + \sum_{i=0}^Q MA(i) * \epsilon(t-i) \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 solo predice una muestra en el tiempo hacia adelante. Una vez que contamos con este valor, lo agregamos a nuestro vector de datos, eliminamos el dato más viejo y corremos la fila (Ver figura 5.17).

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

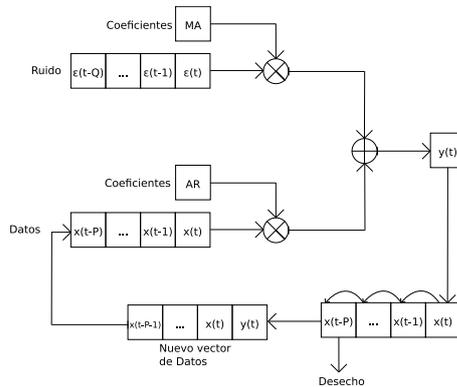


Figura 5.17: Diagrama de predicción.

El método `predecir` se encarga de realizar la ecuación 5.8, guardar los valores de las predicciones (para graficarlos luego), e ir corriendo el vector de datos. En la práctica no modificamos el vector de datos, sino que creamos un vector igual, que se utiliza temporalmente para ir corriendo los datos viejos y sustituirlos por las predicciones. En la figura 5.18 vemos un diagrama de flujo del método `predecir`.

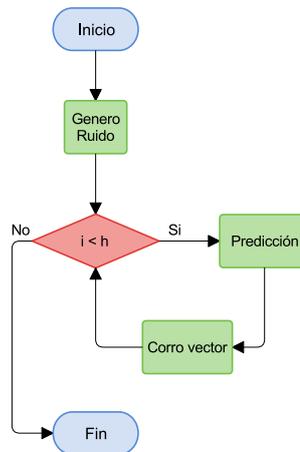


Figura 5.18: Diagrama de flujo del método `predecir`.

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

Las pruebas y simulaciones se fueron realizando de manera secuencial. Cada método del programa lo probamos individualmente y con distintos casos, para ver que no presentaran fallas. Luego probamos en conjunto el software completo y realizamos distintas medidas para ver como responde el algoritmo.

5.4.1. Métodos Etapa A: Medición

5.4.1.1. Reconstruir:

Vamos a probar como la frecuencia con la que evaluamos la señal afecta su reconstrucción. La ecuación 5.3 es para tiempo continuo, pero como en el universo de las computadoras todo es discreto, tenemos que crear un vector de tiempos. La frecuencia con la que se arma este vector de tiempos va a afectar a la reconstrucción; cuanto más alta sea, más cercana a la función en tiempo continuo va a ser. Para las pruebas utilizamos la señal de 2.4 V de pico a pico y 50 Hz, que fue muestreada a 330 Hz aproximadamente. En la figura 5.19 se observa las muestras en rojo, y en azul la reconstrucción a 1 kHz.

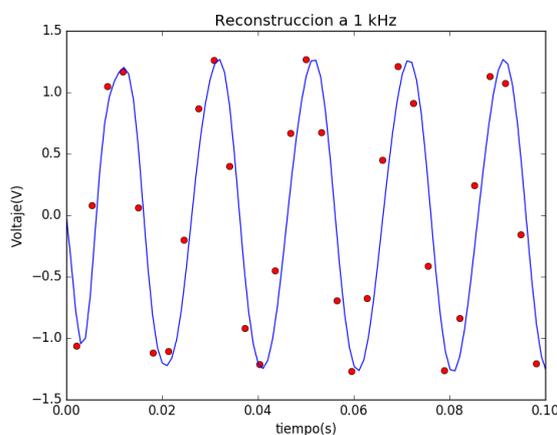


Figura 5.19: Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 1 kHz.

Como se observa en la figura 5.19, la reconstrucción no es perfecta, y se reconocen en los máximos de la señal zonas que no son del todo “suaves”. Además notamos que hay cierto desfase entre las muestras y la reconstrucción. Ese error se hace menos notable cuando la señal avanza en el tiempo 5.20.

Mostraremos como reconstruyendo la señal en distintas frecuencias, afecta el aliasing. Probamos con 500 Hz 5.21 y con 3 kHz 5.22. La señal reconstruida a 3 kHz es la que tiene menos “recortes”, pero a estas frecuencias surge el problema que los tiempos de procesamiento aumentan muchísimo (más de 30 segundos en la etapa A). Por estas razones decidimos quedarnos con la reconstrucción a 1 kHz, no es del todo perfecta, pero ya es suficiente para calcular la potencia con bastante precisión.

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

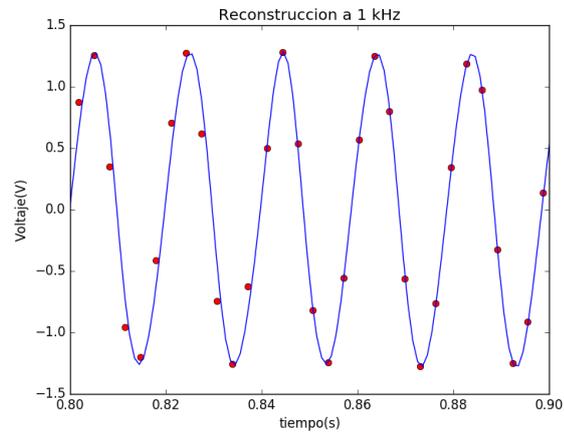


Figura 5.20: Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 1 kHz, observada más adelante.

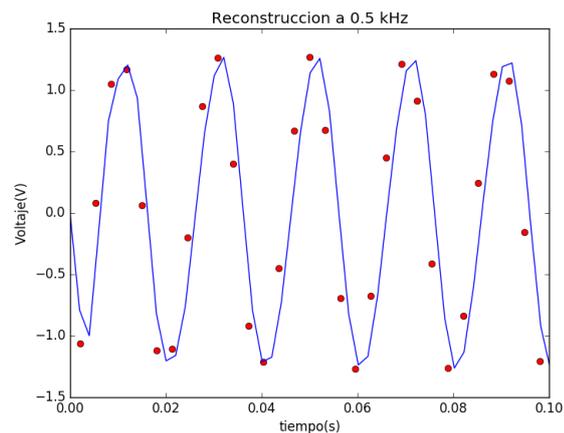


Figura 5.21: Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 500 Hz.

5.4.1.2. CalculoPotencia:

Para el cálculo de la potencia, simulamos dos señales, una señal de voltaje de 50 Hz y 220 Volts de V_{rms} , y una señal de corriente de 50 Hz y 2 Ampere de amplitud. Primero mostraremos como el desfase entre las señales afecta a la potencia, luego como la amplitud de la corriente influye. En la figura 5.23 observamos la señal de corriente desfasada 90 grados de la señal de voltaje. En este caso la potencia es puramente reactiva, por lo que la potencia activa es nula. Es simplemente un ejemplo, en la práctica no debería ocurrir un caso como este. Cuando las señales están desfasadas 45 grados (Ver figura 5.24), el cálculo de la potencia activa queda:

Capítulo 5. Software

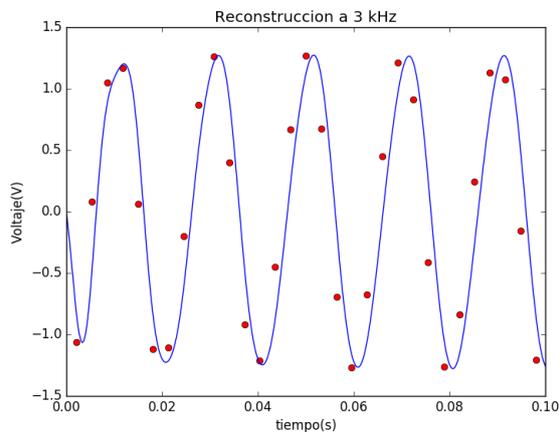


Figura 5.22: Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 3 kHz.

$$P = \frac{V_m}{2} * I_m * \cos(\varphi)$$

$$P = 220 * \sqrt{2} * \cos(\pi/4) = 220 * \frac{\sqrt{2}}{2} * \sqrt{2}$$

$$P = 220 \quad (5.9)$$

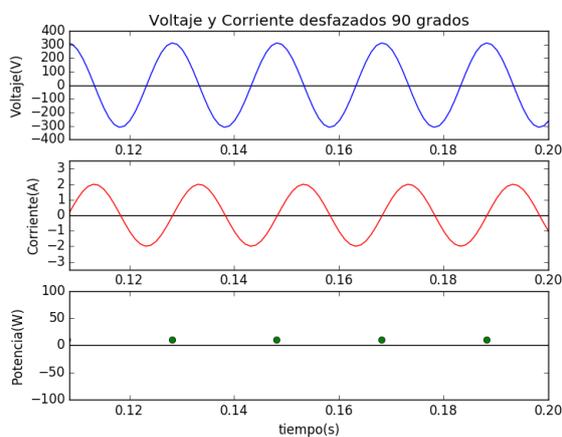


Figura 5.23: Cálculo de Potencia Activa para una corriente desfasada 90 grados del voltaje.

Finalmente si las señales están en fase (Ver figura 5.25), la ecuación 5.10 queda:

$$P = \frac{V_m}{2} * I_m * \cos(\varphi)$$

$$P = 220 * \sqrt{2} * \cos(0) = 311 \quad (5.10)$$

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

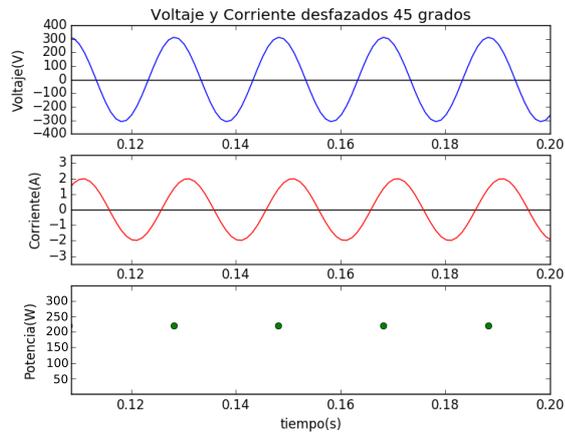


Figura 5.24: Cálculo de Potencia Activa para una corriente desfasada 45 grados del voltaje.

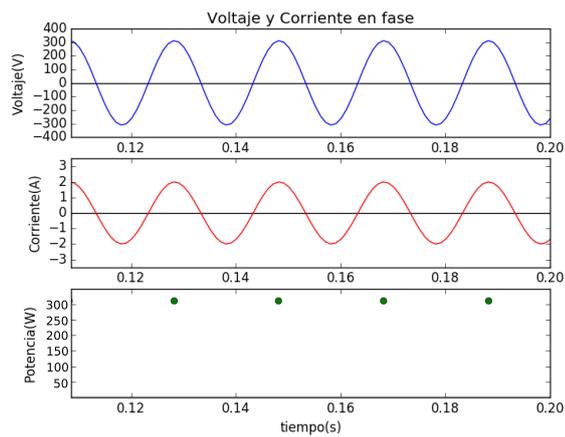


Figura 5.25: Cálculo de Potencia Activa para una corriente en fase con el voltaje.

Como último ejemplo, mostraremos como un cambio de amplitud en la corriente afecta al cálculo de la potencia. Simulamos un señal de corriente que varía de amplitud, comienza con 2 A, baja a 1 A y finalmente sube a los 3 A. En este caso la corriente y el voltaje están en fase (Ver figura 5.26)

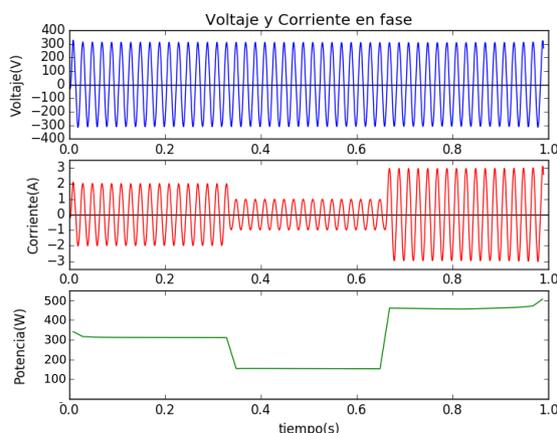


Figura 5.26: Cálculo de Potencia Activa para una corriente en fase con el voltaje, pero de amplitud variable.

5.4.2. Métodos Etapa B: Predicción

En esta sección probaremos el algoritmo predictivo, con distintos valores de consumo. No pudimos utilizar datos de consumo tomados con el hardware, por falta de tiempo, por lo que los datos se sacaron de internet [6].

Los datos representan el consumo eléctrico en una residencia, medida cada una hora, durante el año del 2007 en Francia. Para realizar predicciones, tomaremos un mes de muestras y realizaremos la predicción del día siguiente.

Para cada set de datos realizaremos los dos tipos de predicción vistos en el capítulo 4. Las imágenes las realizamos con los datos del mes de enero, pero se realizaran pruebas para 7 meses. Las gráficas fueron realizadas con Matlab en una PC (por fuera de Raspberry Pi) para que queden más claras. Finalmente compararemos los dos métodos, analizando las distintas medidas de error.

5.4.2.1. Estudio de la Serie

Lo primero a tener en cuenta, es identificar los componentes de la serie (Ver figura 5.27). Observamos que la serie tiene una tendencia prácticamente lineal y constante.

Si analizamos la variabilidad con una gráfica de cajas (Ver figura 5.28), vemos que es bastante constante a lo largo del mes, sin tener en cuenta algunos Outliers que ocurrieron durante los días 07, 13 y 22. Como la variabilidad no depende del nivel, podemos asumir que se puede utilizar el modelo aditivo, visto en el capítulo 4. Para ver si la serie posee componentes estacionales, graficamos el correlograma de la serie (Ver figura 5.29). Como se observa, cada 24 muestras de retardo el correlograma presenta un patrón similar. Esto quiere decir que las muestras están fuertemente relacionadas con las del día siguiente.

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

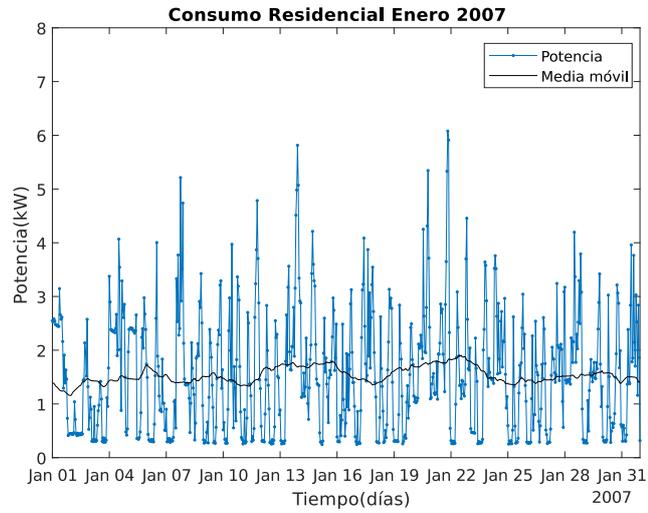


Figura 5.27: Consumo Residencial durante el mes de enero de 2007.

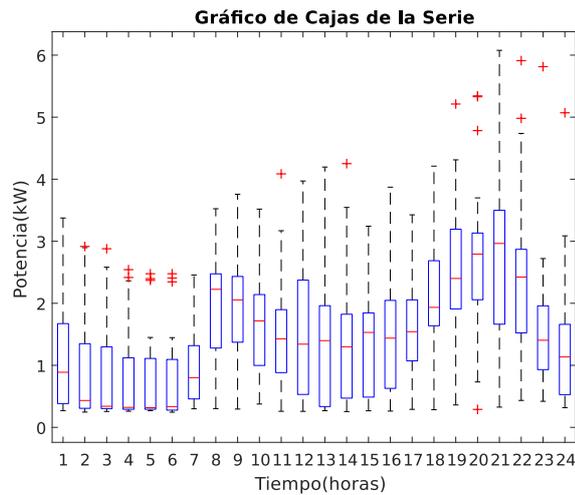


Figura 5.28: Gráfico de cajas para la serie en enero 2007.

Concluimos entonces que la serie es estacionaria, la media y la variabilidad se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Para el análisis descriptivo, debemos remover la tendencia de la serie y analizar las componentes estacionales (Ver figura 5.30). Se observa que hay dos crestas en el consumo, una en la mañana cuando la gente se despierta, y comienza la actividad diaria, y otra cuando regresa del trabajo. También hay dos valles, uno en horario de la noche, cuando se duerme, y otro en el horario de la tarde, cuando la gente trabaja o duerme siesta.

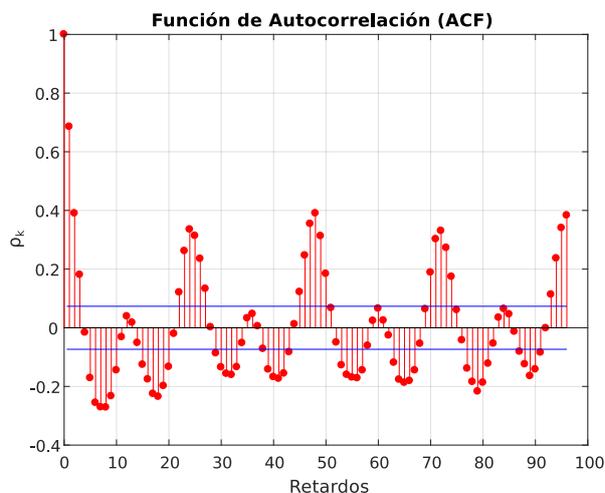


Figura 5.29: ACF de la serie sin desestacionalizar.

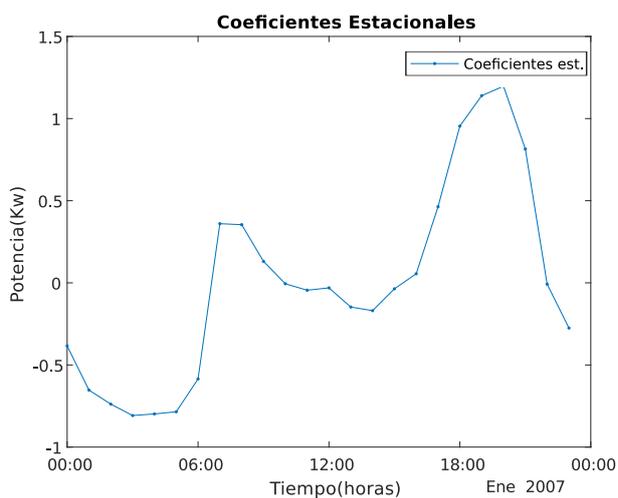


Figura 5.30: Coeficientes estacionales para la serie en Enero de 2007.

5.4.2.2. Predicción mediante Análisis Descriptivo

Para la predicción mediante análisis descriptivo, estimamos la tendencia de la serie, mediante una media móvil de orden 96 ². Predecimos el consumo eléctrico del día primero de febrero de 2007, sumando la estimación de la tendencia con las componentes estacionales obtenemos la predicción (Ver figura 5.31). En la figura 5.32, se aprecia la última semana de la serie, junto con la predicción y los valores reales del primero de febrero.

²Con cuatro días de muestras alcanza para ver que la tendencia de la serie se mantiene constante durante el mes.

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

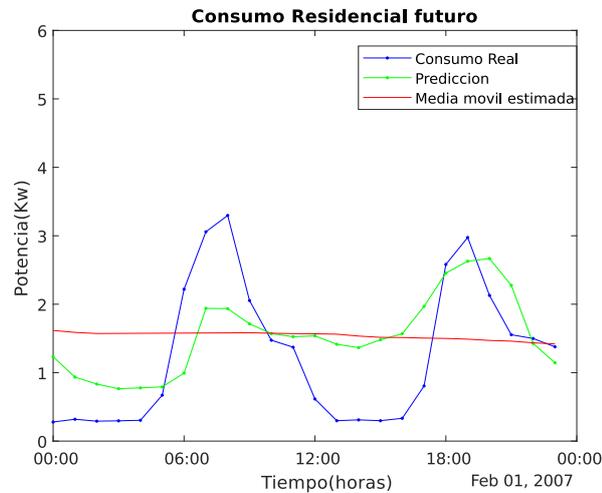


Figura 5.31: Predicción para el 01 de Febrero de 2007 mediante modelo de análisis descriptivo.

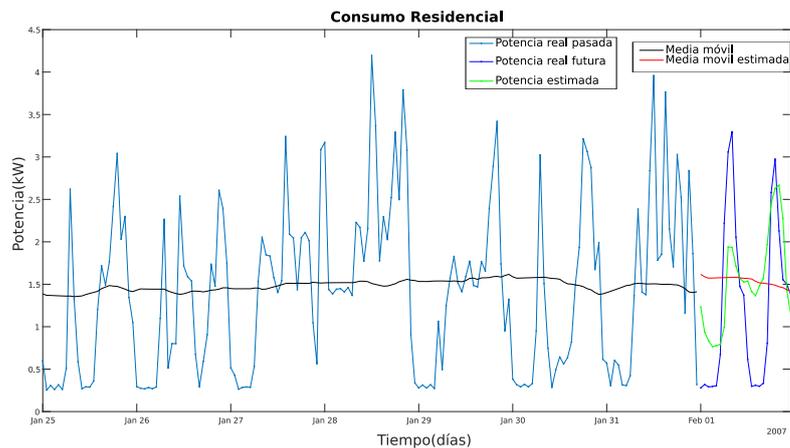


Figura 5.32: Predicción para el 01 de Febrero de 2007 mediante modelo de análisis descriptivo.

5.4.2.3. Predicción Mediante Modelo ARIMA

Para poder aplicar el modelo ARIMA, debemos eliminar las componentes determinísticas de la serie (tendencia y estacionalidad) y observar la componente estadística, la componente Irregular (Ver figura 5.33).

Analizamos las funciones de autocorrelación simple y parcial de la componente irregular (Ver figura 5.34), para elegir los coeficientes del modelo ARMA. Del análisis de los correlogramas, concluimos que un modelo ARIMA(2,0,4) es el que mejor se adapta a nuestra serie.

Al resultado de la predicción del proceso ARIMA(2,0,4), le sumamos la estimación de la tendencia y la componente estacional, obteniendo una predicción (Ver figuras 5.35 y 5.36), más fiable que con el enfoque del análisis descriptivo.

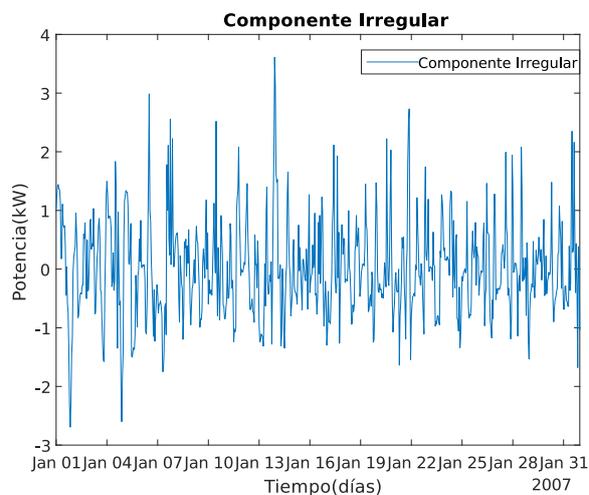


Figura 5.33: Componente Irregular de la serie.

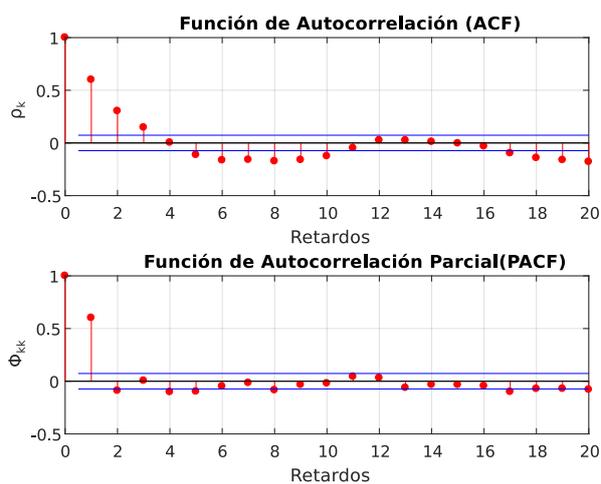


Figura 5.34: Funciones de autocorrelación simple (a) y parcial (b) de la serie temporal desestacionalizada.

5.4.2.4. Análisis del error

Utilizamos tres medidas de error, de las vistas en el capítulo 4:

$$MAPE = \frac{100}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{|y_i|} \tag{5.11}$$

$$MASE = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{\frac{1}{h-1} \sum_{i=2}^h |y_i - y_{i-1}|} \tag{5.12}$$

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

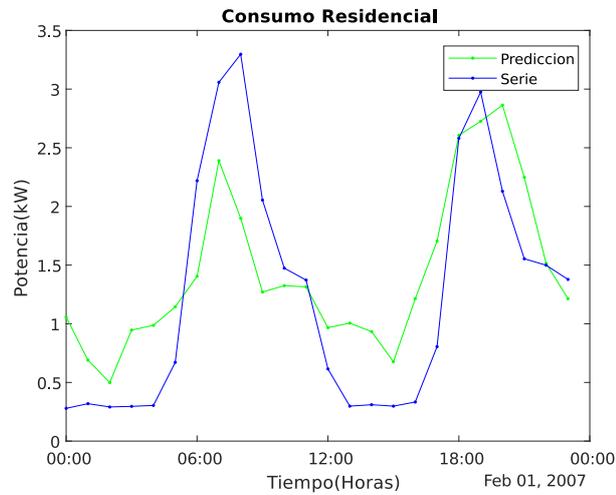


Figura 5.35: Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo ARIMA(2,0,4).

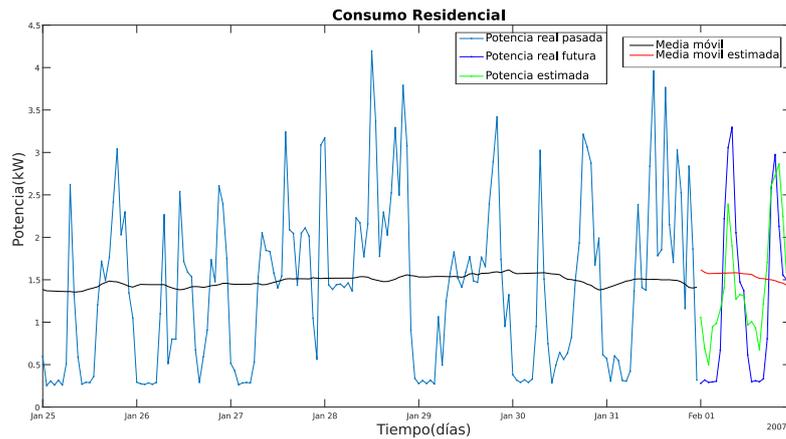


Figura 5.36: Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo ARIMA(2,0,4).

$$sMAPE = \frac{100}{h} \sum_{i=1}^h \frac{(|y_i - \bar{y}_i|)}{|y_i| + |\bar{y}_i|} \quad (5.13)$$

Realizamos el mismo procedimiento para los meses de Marzo, Mayo, Junio, Agosto, Setiembre y Noviembre. Calculamos los MAPE, MASE y sMAPE para cada mes y cada método y los comparamos en la tabla 5.2.

Como se puede observar, hay una mejora (disminución del error) en la mayoría de los meses. Nuestra serie tiene valores cercanos a cero, por lo que el MAPE no es un buen indicador del error en la predicción.

Capítulo 5. Software

		Enero	Marzo	Mayo	Junio	Agosto	Setiembre	Noviembre	Promedio
Descriptivo	MAPE	129	49	78	149	71	77	58	87
	MASE	1.49	1.57	1.71	1.92	1.75	1.28	1.37	1.58
	sMAPE	31.5	35.8	25.5	34.2	33.0	26.4	26.9	30.5
ARMA	MAPE	93	78	93	136	69	76	52	85.3
	MASE	1.18	1.17	1.87	1.88	1.86	1.32	1.21	1.50
	sMAPE	27	25.4	29.4	34.4	33.8	26.4	25.2	28.8

Tabla 5.2: Comparación MAPE, MASE y sMAPE

Si bien el error es bastante grande, está dentro de lo que se espera de una predicción. La serie temporal del consumo eléctrico es muy variante a corto plazo, y depende de muchos factores externos.

El modelo ARMA nos da también un intervalo de confianza, donde hay un 95 % que la serie real se encuentre. En el caso del mes de enero se observa en la figura 5.37, que el intervalo de confianza es de aproximadamente un ± 1.2 kW/h. Es decir que podemos predecir con un 95 % de probabilidad, que la serie se va a encontrar en ese rango. En todos los otros meses, la serie real, quedó dentro del intervalo de confianza del 95 %. Si bien es un valor bastante alto, nos puede dar una idea de lo que va a pasar a futuro.

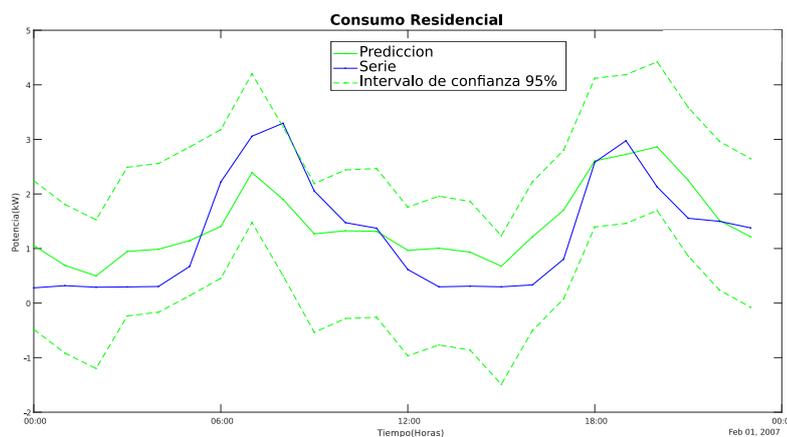


Figura 5.37: Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo con intervalo de confianza 95 %.

5.4.2.5. Estudio de Oversampling

En esta sección estudiaremos como se comporta la predicción al incrementar el número de muestras, en un mismo intervalo de tiempo. De los mismos datos, que para las pruebas anteriores, tomaremos la primera semana de enero y realizaremos dos predicciones del próximo día. En una primera predicción se tendrá una muestra por hora. En la segunda predicción habrá una muestra por minuto.

5.4. Simulación, Errores y Pruebas

La predicción para el primer caso (muestras cada una hora) se obtuvo un MAPE de un 52 % (Ver figura 5.38). En el segundo caso (muestras cada un minuto) se obtuvo un MAPE de 90 % (Ver figura 5.39). En el segundo caso, aparecen transitorios altos y rápidos (de un minuto de duración), que el modelo los ve como “Outliers” no los puede modelar. Esto influye en un aumento del error.

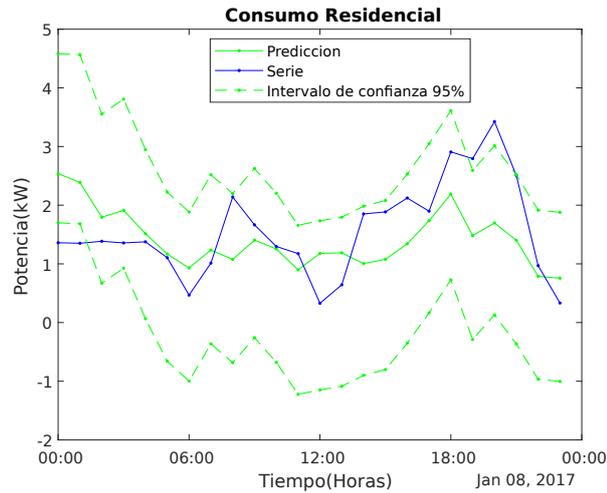


Figura 5.38: Predicción para el 08 de Enero 2007 con una muestra por hora durante una semana.

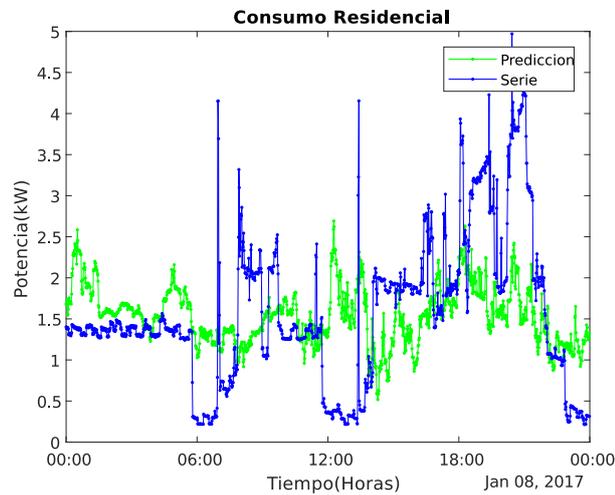


Figura 5.39: Predicción para el 08 de Enero 2007 con una muestra por minuto durante una semana.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Conclusión y Trabajos futuros

Como conclusiones por fuera de lo específico del proyecto, podemos destacar que: desarrollamos la capacidad para trabajar en equipo; aprendimos a manejar los tiempos en un proyecto de extensa duración; mejoramos la manera de expresarnos de forma oral y escrita; aprendimos y mejoramos en los lenguajes Python, Latex, Matlab; generamos un conocimiento profundo de los medidores eléctricos y de algoritmos predictivos de series temporales; adquirimos un conocimiento general, de las redes eléctricas y en particular, de las Smart Grids.

6.1. Conclusiones referentes al hardware

6.1.1. Hardware de medición

Respecto al medidor de corriente, se logró manipularlo de forma eficiente. Hallamos la transferencia del sistema de manera experimental y pudimos observar su linealidad.

También la comparamos con la transferencia brindada por el fabricante, el resultado fue satisfactorio, siendo ambas trasferencias iguales, con una diferencia de solamente 44 mV. En conclusión el sensor LEM LTS25NP es de uso recomendable.

Con el medidor de voltaje tuvimos varios problemas. Primero, al estudiar la calibración recomendada por el fabricante, vimos que su implementación no era posible, debido a la relación entre los potenciómetros y los valores de offset y ganancia. Luego desarrollamos una calibración propia, en este caso, vimos que la extrema sensibilidad de los potenciómetros no permite ajustarlos de forma previa; como consecuencia, se concluyó que la mejor manera de calibrarlo es empíricamente.

La conclusión sobre el manejo del sensor, es que este resulta ser muy complicado. Por otra parte, dado que el ancho de banda del sistema está acotado por el software: 312Hz, ya no es necesario que el sensor tenga un alto ancho de banda. Concluimos que lo ideal es utilizar un transformador de voltaje en su lugar.

Capítulo 6. Conclusión y Trabajos futuros

6.1.2. Conversor analógico digital

El conversor analógico digital presentó algunos inconvenientes. Como primer punto negativo, la hoja de datos del fabricante, da un valor engañoso de frecuencia máxima de muestreo. Si bien es cierto que se pueden alcanzar los 3,3 kHz por segundo, esto sólo es válido para el conversor en modo continuo en un canal, como se explicó en la sección 5.2.1.1. Como el integrado, cuenta con un solo conversor ADC, al trabajarlo en dos canales simultáneos, las velocidades bajan muchísimo. Creemos que el fabricante debió explicar este inconveniente en su hoja de datos.

Un segundo problema, fue que se nos quemaron dos conversores. En ambos casos, por mala manipulación. Al primero, le inyectamos un voltaje mayor del soportado. En el segundo, erróneamente conectamos los pines de alimentación de la Raspberry Pi. Estas equivocaciones fueron nuestra culpa, y la conclusión es, que hay que prestar mayor atención al tratar con estos elementos.

Por fuera de estos problemas, el conversor respondió bien. El software referente al mismo, fue sencillo de entender y manipular. Los datos obtenidos fueron coherentes, y logró su cometido.

6.1.3. Raspberry Pi

Vimos que las primeras versiones de Raspberry Pi no son adecuadas para los requerimientos del proyecto.

Comprobamos que su capacidad de procesamiento no es suficiente para las exigencias que proponíamos, además de las carencias del sistema operativo Raspbian. Este último es un sistema operativo muy básico que dificulta la utilización de los paquetes Python necesarios para nuestros propósitos.

Dados los obstáculos mencionados anteriormente, decidimos utilizar la última versión disponible, que es Raspberry Pi 3 B. Esto nos resolvió los problemas de compatibilidad y la capacidad de procesamiento, ya que nos habilitó la posibilidad de instalar un sistema operativo más potente, Ubuntu Mate. También nos permitió instalar los paquetes de Python necesarios para el desarrollo del software. Además, al contar con más memoria RAM que las versiones anteriores, nos facilitó el trabajo haciéndolo más fluido.

Más allá de las carencias que experimentamos en el transcurso del proyecto, entendemos que es una herramienta útil para el desarrollo de proyectos de distinto tipo y propósito.

6.2. Conclusiones referentes al software

El lenguaje Python, al principio no nos resultó del todo sencillo de manejar, la manera en que hace uso de los bucles nos pareció complicada, y poco práctica. Al

6.3. Conclusiones referentes a la predicción

ser un lenguaje orientado a objetos, simplifica mucho el diagramado del programa; pero inicialmente no supimos hacer buen uso de ello.

Si bien contábamos con un paquete matplotlib, que permitía hacer gráficas de Matlab en Python, lo utilizamos poco, porque no eran del todo agradables visualmente. Preferimos pasar los datos a una PC, y hacer las gráficas directo en Matlab.

En términos generales, el código funciona. Tiene algunas deficiencias, y temas pendientes, pero cumple su tarea.

6.3. Conclusiones referentes a la predicción

Concluimos que realizar una predicción del consumo de un hogar a corto plazo, no es del todo sencillo. Si bien se observaron patrones de comportamiento en el consumo, la variabilidad es lo suficientemente grande, como para generar un error alto en la predicción.

Creemos que esto se debe, al gran número de factores que afectan el uso de la corriente eléctrica. No se puede predecir a ciencia cierta, la aplicación que se le va a dar a los electrodomésticos en el hogar.

Otro de los factores que altera las estimaciones futuras, es el hecho de que las medidas de potencia, presentan transitorios altos, y de rápida frecuencia. Como se pudo comprobar en las pruebas de oversampling, medir estos transitorios, afecta ampliamente a la predicción.

A pesar de estos factores creemos, que se alcanzaron predicciones fiables, y las medidas reales, quedaron dentro del intervalo de confianza estimado.

De los dos enfoques de predicción propuestos, el modelo ARMA, logró mejores resultados. Sin embargo, vemos que las diferencias con el análisis descriptivo no son del todo significativas.

Es decir, el gran aporte a la predicción lo hacen las componentes estacionales y la tendencia. La componente irregular, es demasiado aleatoria, y poco probable de predecir.

Respecto al modelo de predicción ARMA, nos gustaría dar algunas opiniones. El tema nos pareció extremadamente complejo de entender e implementar. La bibliografía relacionada; ya sea libros o artículos, tiene un enfoque muy teórico, y pocas veces hace un acercamiento práctico del tema.

Recolectando la información de distintas fuentes, logramos formar una idea de como efectuar una predicción mediante un modelo ARMA. Sin embargo, no estamos 100% convencidos, de que sea el enfoque correcto. Las predicciones por modelos autorregresivos, es basto, y se necesitaría un proyecto de fin de carrera entero, para abarcarlo por completo.

Por otro lado, en la gran mayoría de los casos, se hace uso de paquetes ya desarrolla-

Capítulo 6. Conclusión y Trabajos futuros

dos, sea statsmodels o pyflux. Si bien nosotros tomamos algunas de sus funciones, no los empleamos en un 100%.

6.4. Trabajos Futuros

Deseamos que este proyecto sea de utilidad a trabajos futuros. Ya sea para el ámbito de las Smart Grids, como para otros campos de la Ingeniería. Esperamos que nuestros aciertos y errores, hagan de cimiento para el desarrollo de otras ideas, y aportar con nuestro granito de arena, a la investigación tecnológica.

Quedan pendiente varios aspectos del proyecto, que hubiese sido bueno tenerlos. Por un lado, nos hubiese gustado hacer una prueba de campo con los medidores. Además de probarlos en el terreno, esto nos permitiría obtener datos propios para la simulación; y no tener que sacarlos de una fuente externa.

Apéndice A

Smart Grids

A.1. Transitorios en el hogar

Como parte del proyecto, estudiamos cuales eran los transitorios de un ambiente residencial ¹.

Se estudiaron 20 tipos de electrodomésticos, y se clasificaron los transitorios en tres tipos:

1. “Single pulse”: Generado cuando los electrodomésticos son prendidos y apagados.
2. “Periodic pulses”: Pulsos periódicos relacionados a la frecuencia o a armónicos de la red (por ejemplo por causa de inversores).
3. “Continuous pulses”: Generados de forma continua, debido a aparatos que tienen motores eléctricos.

Los resultados del estudio se muestran en la tabla A.1 donde se aprecia el ruido que estos electrodomésticos inyectan en la red.

Vemos que el electrodoméstico con mayor amplitud de ruido inyectada a la red eléctrica es la aspiradora con $1457,5mV$, y el que tiene la duración máxima (sin contar la aspiradora) es la estufa eléctrica con $3584,7\mu s$. Siendo el período de la red de $20ms$, vemos que el tiempo de duración máximo del transitorio de la estufa es 0,18 veces mas pequeño. [24]

A.2. Auto eléctrico

A lo largo de los últimos años, junto al avance tecnológico de motores eléctricos, han surgido los autos eléctricos. Estos han cambiando el paradigma de energización de los vehículos viales, del petróleo a la energía eléctrica. Analizaremos cómo

¹El objetivo principal era aportar información de la duración de estos transitorios, para tener en cuenta en el ancho de banda de los medidores a utilizar.

Apéndice A. Smart Grids

Electrodoméstico	Amplitud promedio (mV)	Duración promedio (μs)
(Single pulse)	•	•
calentador de pies	707,8	689,4
estufa eléctrica	686,7	1336,7
horno eléctrico	329,2	1015,8
plancha eléctrica	287,7	794,9
secador pelo caliente	414,4	1053,0
secadora de ropa	357,6	625,2
refrigerador	285,4	755,9
lámpara incandescente	951,1	774,1
lámpara fluorescente	556,7	420,6
stereo	279,1	536,9
ventilador eléctrico	443,6	357,4
lavarropas	363,1	488,8
televisor	824,1	1047,4
(Periodic pulses)	•	•
televisor	197,2	722,4
microondas	505,9	1008,8
dimmer	670,8	140,0
(Continuous pulses)	•	•
secador pelo frío	87,9	105,3
máquina de coser	41,6	148,2
estufa eléctrica	213,8	3584,7
aspiradora	1457,5	siempre

Tabla A.1: Ruido de electrodomésticos inyectado en la red

se desarrolla su implementación en la red eléctrica; cuanto consumen de la misma y de qué forma, y cual es la proyección de su utilización en el futuro.

El stock mundial de vehículos eléctricos (EV por sus siglas en inglés) ha registrado un aumento de 180.000 a finales de 2012, a 1,26 millones para finales del 2015, y para el 2020 se pronostica una cantidad de 20 millones [16] [13].

El gran aumento en la cantidad de EV plantea nuevos retos para la red eléctrica, así como también nuevas estaciones de carga para los vehículos. Una estación de carga para un EV (EVSE por sus siglas en inglés), es la encargada de transferir energía eléctrica desde la red al EV.

Las estaciones de carga son categorizadas de dos formas: “on-board charger station” (OBC), y “off-board charger station”.

A.2. Auto eléctrico

Las OBC son estaciones dentro del auto eléctrico; se conecta el vehículo directamente a red eléctrica en AC, luego la estación interna, convierte la señal alterna a continua, y a partir de ahí cargan el vehículo. Al estar confinadas dentro del EV, tienen limitaciones de tamaño, espacio y costo, lo que deriva en que su carga sea lenta. Por otra parte, tienen la ventaja de poder conectarse directamente a la red eléctrica.

El segundo tipo de EVSE, se encuentra fuera del vehículo. Consta de una plataforma que realiza la conversión de AC de la red, a DC para cargar la batería directamente [16]. Su carga es más rápida que las OBC. La figura extraída de [16] ilustra los dos tipos de EVSE (Ver figura A.1).

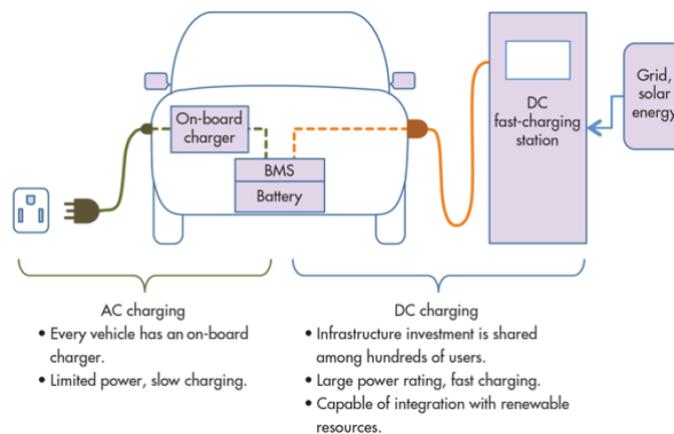


Figura A.1: Estaciones de carga del auto eléctrico.

Para abastecer el creciente consumo eléctrico de la población, las empresas de suministro eléctrico crean tarifas con distintos precios, con el objetivo de incentivar el consumo eléctrico a ciertas horas, y poder así distribuir el mismo. Como regla principal, se trata de trasladar el consumo a horas de la noche. Los propietarios de los EV no escapan a este fenómeno y mientras durante el día son trasladados de un lugar a otro por su EV, durante la noche lo dejan cargando. Un estudio basado en 2.000 EVs que se cargaban durante horas nocturnas en USA, indica cómo es el comportamiento de sus propietarios en relación a su consumo de energía eléctrica. Se puede observar incluso cómo la energía fotovoltaica se adapta de forma perfecta a los EVs.

La figura A.2 realiza una comparación entre el consumo de los propietarios de EVs y el típico de una residencia. En este caso, la tarifa especial nocturna es entre las 00:00 y 07:00. Puede observarse que los primeros tienen un pico de consumo a media noche, de incluso hasta 4 veces más que el promedio típico, aumentando su consumo por tres veces más durante la noche.

Apéndice A. Smart Grids

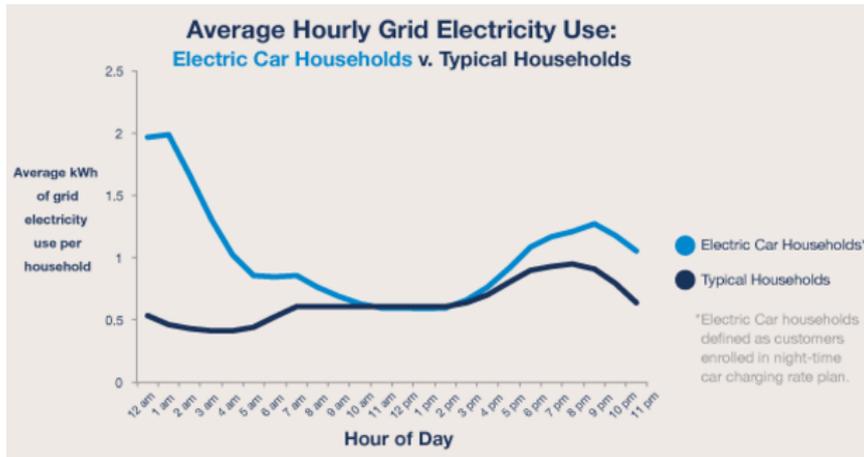


Figura A.2: Consumo eléctrico promedio EVs.

Es interesante observar que luego de finalizada la carga de su vehículo, y pasadas las horas de tarifa especial nocturna, las residencias con EVs continúan consumiendo más que lo típico; hasta un 21 % más durante las 07:00 y las 00:00. El estudio arrojó como resultado, que este consumo más elevado se debe a que los propietarios de EV, tienden a tener mayor poder adquisitivo; teniendo casas más grandes y una costumbre de consumo eléctrico mayor. Sin embargo, el precio de los autos eléctricos tiende a bajar y el acceso a los mismo tiende a subir, lo cual indica que esta tendencia se irá reduciendo en los años próximos [13]. El estudio indicó también que el 32 % de los propietarios de EVs tienden a instalar paneles solares en su residencia, lo que reduce de forma drástica su consumo eléctrico, llegando a equiparar al consumo típico a lo largo de un día entero. [15]

Apéndice B

Tipos de comunicación

B.1. Tecnologías Cableadas

Tradicionalmente, las tecnologías cableadas eran las preferidas porque se consideraban como la opción mas confiable. Las tecnologías mas utilizadas en Smart Grid son:

- **Power Line Communications (PLC):**

PLC utiliza los cables de alimentación para la transmisión de datos e intercambio de información. Permite utilizar una infraestructura única para la transmisión de energía y datos. Razón por la cual los sistemas PLC se propusieron como una solución rentable y directa para las comunicaciones de la red. Mas allá de que esta tecnología se utiliza en la mayoría de los despliegues de AMR (Automatic Meter Reading), hay que enfrentarse a varios desafíos técnicos para proporcionar una transmisión fiable.

Algunos de los problemas que se presentan son: atenuación de las señales e interferencia por fuentes electromagnéticas externas.

- **Fibra óptica (OF):**

En las últimas décadas las comunicaciones ópticas se han comenzado a usar para construir el backbone de comunicación, interconectando subestaciones con centros de control. Las principales ventajas de este tipo de comunicación son: la capacidad de transmitir datos a distancias grandes, del orden de los kilometros, proporcionando un ancho de banda de decenas de Gbps. Su robustez frente a las ondas electromagnéticas e interferencias de las señales de radio, haciéndolo conveniente en ambientes de alto voltaje.

Una de las mayores desventajas de esta tecnología es el alto costo de despliegue y de equipamiento.

- **Digital Subscriber Line (DSL):**

Con DSL se refiere a un conjunto de tecnologías que transmiten datos digitales a través de las líneas telefónicas. La principal ventaja de esta tecnología es que se puede interconectar a los clientes finales con los centros de control

Apéndice B. Tipos de comunicación

mediante líneas telefónicas ya desplegadas, sin necesidad de implementar una infraestructura adicional. Sin embargo, se necesita pagar por el mantenimiento de la red a los operadores de empresas de telecomunicaciones.

Existen distintas variantes de DSL, el mas común es el ADSL el cual soporta hasta 8 Mbps de bajada y 1.3 Mbps en subida. ADSL2+ con un máximo teórico de bajada y subida de 24 Mbps y 3.3 Mbps respectivamente. VDSL (Very High bit rate DSL) provee tasas de transmisión mas altas, de 52Mbps y 16Mbps de bajada y subida respectivamente, pero solamente pueden operar en distancias cortas alrededor de 1.2 km. [33]

B.2. Tecnologías Inalámbricas

Hoy en día existen diferentes tecnologías y estándares, las cuales se pueden clasificar por su rango de transmisión.

- **Wi-fi:**

Son redes basadas en la familia de estándares IEEE 802.11. Sin duda, son el conjunto de comunicaciones inalámbricas mas utilizadas en el hogar y en redes de área local. Las principales razones de dicho éxito son: opera en bandas de frecuencia de 2.4Ghz y 5Ghz sin licencia, utiliza esquemas de acceso simples y flexibles basados en CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)¹, y por último existen interfaces de radio de bajo costo.

Los rangos de transmisión dependen de una serie de factores, entre los cuales se encuentran las potencias de transmisión, tipos de antena, ambientes interiores o exteriores y la modulación.

Las principales desventajas de esta tecnología es la alta vulnerabilidad frente a las interferencias y el alto consumo energético en equipos de Smart Grid. Mientras que las ventajas son el bajo costo de despliegue, equipamiento barato y alta flexibilidad.

- **WiMAX:** Es el estándar IEEE 802.16. Fue lanzado para soportar comunicaciones de banda ancha (hasta 100 Mbps) en largas distancias, de 7 a 10km, como en áreas rurales y suburbanas.

Es una tecnología complementaria a 802.11 ya que está diseñada para soportar miles de usuarios simultaneo en áreas mas grandes; un control orientado a conexión del ancho de banda del canal y mecanismos QoS ² mas sofisticados.

¹Protocolo de control de acceso a redes de bajo nivel que permite que múltiples estaciones utilicen un mismo medio de transmisión.

² Rendimiento promedio de una red, particularmente el rendimiento visto por los usuarios de la red. Cuantitativamente mide la calidad de los servicios que son considerados en varios aspectos del servicio de red, tales como tasas de errores, ancho de banda, rendimiento, retraso en la transmisión, disponibilidad, jitter, etc.

B.2. Tecnologías Inalámbricas

Como contraparte requieren un manejo mas complejo de las redes, y opera en bandas de frecuencia con licencia. Las tasas de transmisión y los rangos de cobertura hacen que esta tecnología sea adecuada para conectar grandes instalaciones, como por ejemplo centrales eléctricas con centros de control, así como desplegar redes AMI (Advanced Metering Infrastructure) en áreas poco pobladas.

- **3G/4G Tecnologías celulares:**

Una de las mayores ventajas de la tecnología celular frente a las otras, es el gran rango de área cobertura. En el pasado se solía usar este tipo de tecnología en sistemas como SCADA y AMR. El inconveniente que tiene, es su costo elevado, además de presentar rendimiento y latencia variables, dependiendo los mismos de la cantidad de usuarios atendidos por la radiobase. Por otro lado las redes celulares están en pleno desarrollo y hoy en día presentan velocidades de transmisión equivalentes a las de las tecnologías cableadas.

Los sistemas 3G soportan velocidades de hasta 168 Mbps en bajada y 22 Mbps en subida. Una mejora de dicha tecnología es 4G - LTE (Long Term Evolution). Cuenta con nuevas características, tales como flexibilidad de espectro y ancho de banda, un traspaso mas simple entre diferentes redes, y un mejor soporte para arquitecturas de redes heterogéneas.

- **Satelitales:**

Los sistemas satelitales soportan comunicaciones con ancho de banda y latencias variables, utilizando satélites posicionados en órbitas de distintas altitudes.

Originalmente este tipo de comunicación se utilizaba para el sistema SCADA y otros servicios prestados en áreas rurales. Sus principales desventajas son las altas latencias y costos elevados. Mientras que las ventajas son la alta fiabilidad y posibilidad de llegar a largas distancias.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice C

Hardware

C.1. Proceso de elección del hardware

Como el objetivo inicial del proyecto, era poder detectar transitorios en la red, descartamos los sensores mediante transformadores de corriente. Estos no poseen un buen ancho de banda, y filtran las altas frecuencias que deseamos observar.

C.1.1. YoMo

El primer sistema que encontramos y prometía ser un buen medidor inteligente, es el YoMo "You only Meter once". El medidor ofrece comunicación vía wifi, medición de potencia activa, reactiva y aparente, la posibilidad de variar la frecuencia y un bajo precio.

El método para medir voltaje es mediante un divisor resistivo y utiliza aislación galvánica mediante acoplamiento capacitivo dentro de un amplificador. Para medir la corriente, utiliza un transformador conectado directamente.

Un aspecto atractivo de este medidor es que se implementa junto a una Raspberry Pi para procesar la información, al igual que nosotros planeábamos hacer. El sistema de conexión a la red del YoMo puede observarse en la imagen C.3 [22].

Los circuitos de sensado de este medidor, pueden observarse en las figuras C.1 y C.2 [22]

Al querer adquirir este medidor, nos encontramos con el problema de que no es posible comprar todo el hardware entero, sino que el diseñador entregaba una lista de componentes e información para armarlo ¹. El sensor utiliza también una placa de Arduino para el proceso de información. Estos dos hechos nos hicieron desestimar la compra de este hardware. Por un lado, se complejizaba el sistema de armado, y por otro lado aumentaba la dificultad del software, al tener que introducir la programación con Arduino además de la Raspberry Pi.

¹Lo que usualmente se conoce como Hardware libre.

Apéndice C. Hardware

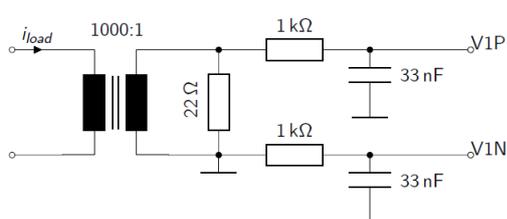


Figura C.1: Sensado de corriente del YoMo.

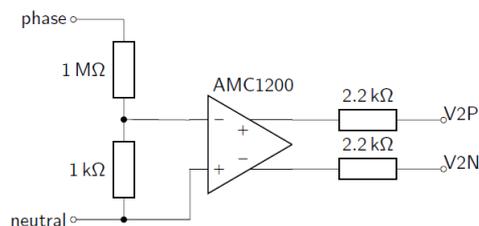


Figura C.2: Sensado de voltaje del YoMo.

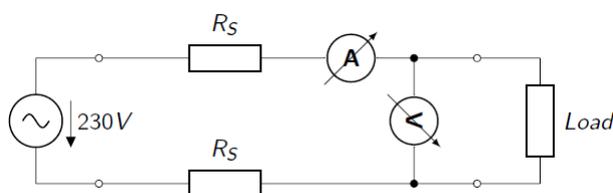


Figura C.3: Circuito equivalente del YoMo.

C.1.2. Medidor óptico

Luego de la experiencia con el YoMo, decidimos que debíamos diseñar un hardware propio para poder tener un dominio total sobre su modo de operar. Optamos por explorar sensores que utilizaran fotodiodos.

Analizamos la familia de medidores ACPL-C79X y ACPL-C87X de “AVA-GO technologies”. Estos están pensados para aplicaciones en drivers industriales, maquinaria medicinal, control de aeronáutica militar, control en la industria del ferrocarril; y finalmente, el tema de nuestro interés: medición y control en el consumo de energías renovables, relacionados a las Smart Grids.

Los diagramas operacionales pueden observarse en las figuras C.4 y C.5 extraídas de la hoja de datos.

Los ACPL-79X son diseñados para la medida de voltaje y corriente, mientras que los ACPL-87X son específicos para voltaje.

Continuamos investigando la gama ACPL-87X ya que es específica para medir voltaje. En la tabla C.3 se pueden observar las condiciones de operación recomendadas.

El ancho de banda es de 100 kHz y la función de transferencia extraída de la hoja de datos puede verse en la figura C.6.

Dentro de la gama de los ACPL-87X, el valor de la X indica que pueden elegirse varios modelos: ACPL-C79B, ACPL-C79A, ACPL-C790. Entre estos varía la

C.1. Proceso de elección del hardware

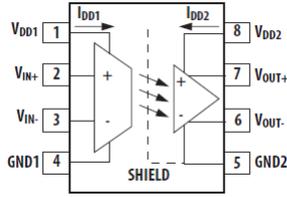


Figura C.4: Diagrama operacional ACPL-C79X.

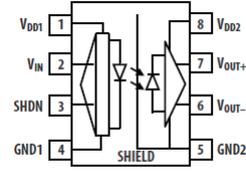


Figura C.5: Diagrama operacional ACPL-C87X.

ACPL-C79X	
Símbolo	Descripción
V_{DD1}	Alimentación del lado de entrada
V_{IN+}	Voltaje de entrada positivo
V_{IN-}	Voltaje de entrada negativo
$GND1$	Tierra del lado de entrada
$GND2$	Tierra del lado de salida
V_{OUT-}	Salida negativa
V_{OUT+}	Salida positiva
V_{DD2}	Alimentación del lado de salida

Tabla C.1: Tabla de pines de ACPL-79X.

ACPL-C87X	
Símbolo	Descripción
V_{DD1}	Alimentación del lado de entrada
V_{IN}	Voltaje de entrada
$SHDN$	Pin Shutdown
$GND1$	Tierra del lado de entrada
$GND2$	Tierra del lado de salida
V_{OUT-}	Salida negativa
V_{OUT+}	Salida positiva
V_{DD2}	Alimentación del lado de salida

Tabla C.2: Tabla de pines de ACPL-87X.

Parámetro	Símbolo	Min	Max
Temperatura ambiente (C°)	T_A	-40	+105
$V_{DD1}(V)$	V_{DD1}	4,5	5,5
$V_{DD2}(V)$	V_{DD2}	3	5,5
Voltaje de entrada (mV)	V_{IN+}	0	2,0

Tabla C.3: Condiciones de operación recomendadas ACPL-87X.

ganancia: $G(V/V)$, siendo la versión ACPL-C87B recomendada por el fabricante para aplicaciones de precisión. Elegimos el modelo ACPL-C87B para el diseño de nuestro hardware. Su ganancia es de $G = 1 V/V$

El rango de voltaje a la entrada es de 0 a $2V$, al igual que el rango de voltaje a la salida (V_{OUT+} y V_{OUT-}). La salida diferencial la conectamos a un amplificador operacional para convertirla en una salida singular.

Elegimos el amplificador operacional (AO) “OPA237”, el cual tiene una precisión tal que no contribuye una cantidad significativa de voltaje de offset. El AO tiene ganancia unitaria. Su ancho de banda es $1,5 MHz$, lo cual es suficiente para no acotar el ancho de banda del ACPL.

Apéndice C. Hardware

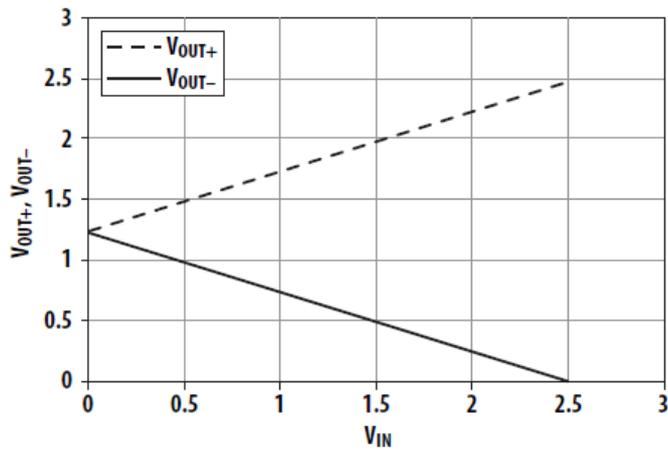


Figura C.6: Voltaje de entrada vs voltaje de salida del ACPL-87X.

Le adicionamos también dos capacitores (denominados C_4 y C_5) y resistencias que generan un filtro pasabajos, los cuales reducen el ruido de la salida del ACPL. El circuito completo se muestra en la figura C.7, extraído de la hoja de datos.

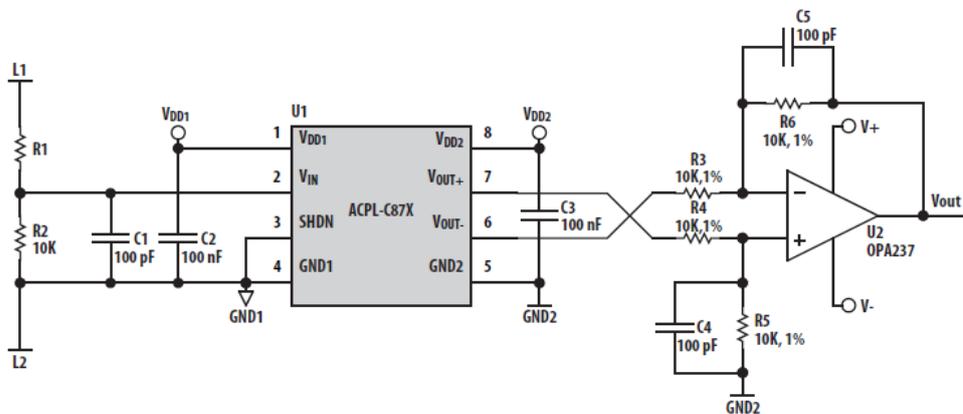


Figura C.7: Circuito ACPL-87B.

L_1 y L_2 son las líneas de voltaje a las cuales se conectará el sensor. R_1 y R_2 forman un divisor resistivo para disminuir el voltaje de entrada al sensor. En nuestro caso tenemos una red de 230V y deseábamos una entrada máxima V_{IN} de 2V al sensor:

$$V_{IN} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * (V_{L1} - V_{L2})$$

C.1. Proceso de elección del hardware

$$R_1 = \left(\frac{V_{L1} - V_{L2}}{V_{IN}} \right) * R_2 - R_2$$

$$R_1 = \left(\frac{230}{2} \right) * 10 \times 10^3 - 10 \times 10^3$$

Despejando obtenemos un valor preliminar de la resistencia $R_1 = 1,14M\Omega$.

Los capacitores C_2 y C_3 cumplen la función de mantener constante la alimentación del ACPL.

Estudiamos ahora la alimentación del circuito completo. Lo dividimos en dos, del lado primario: la entrada al ACPL, y del lado secundario: la salida del ACPL. La alimentación de todo el circuito se provee desde los pines de la Raspberry Pi que suministran 3,3 V y/o 5 V.

Del lado primario se debe alimentar al ACPL con 5 V. Debíamos entonces idear un método de alimentarlo desde la Raspberry Pi, pero a su vez mantener aislación galvánica entre circuito primario y secundario (la Raspberry Pi se encuentra del lado secundario). La solución que encontramos, fue añadir al circuito un transformador de voltaje en la líneas de entrada, y a continuación un conversor AC/DC para pasar de $230Vac$ a $5Vdc$ lo que evidentemente encarece y eleva la complejidad del circuito.

Del lado del secundario alimentamos con 5 V el ACPL directamente de la Raspberry Pi. El AO se alimenta de continua con +15 V y -15 V, por lo que no puede ser alimentado desde la Raspberry Pi. La solución propuesta fue adaptarse al método de alimentación del lado primario. Cambiamos el transformador de voltaje por uno con dos bobinados secundarios, llamados bobinado secundario y bobinado terciario. El secundario junto con un conversor AC/DC se encarga de alimentar el circuito del lado primario. El bobinado terciario, junto con otros dos conversores AC/DC, uno en +15 para V_+ y otro igual pero conectado de forma inversa para alimentar los -15 V de V_- .

Otro problema en el diseño de este medidor, fue que el voltaje de entrada debe ser estrictamente positivo, pero la señal de entrada sinusoidal obtenida de la red eléctrica, es una sinusoidal que toma valores tanto positivos como negativos. Debíamos entonces idear un método de adicionarle un valor de continua al voltaje de entrada. A esta altura el hardware superaba el nivel de complejidad máximo deseado. Nos decidimos nuevamente a buscar otra alternativa que sea de rápida y fácil operación y diseño.

Finalmente optamos por analizar los sensores de efecto hall, los cuales resultaron ser la opción más práctica.

C.2. Transferencia del medidor de voltaje ACS712

Analizaremos ahora la transferencia del circuito. Para hallar la transferencia total, lo dividimos en dos partes y luego las unimos. Primero el medidor sólo y luego el sistema amplificador compuesto por el resto del circuito. Finalmente sumamos ambas transferencias.

Medidor ACS712:

La transferencia del medidor brindada por el fabricante es la de la figura C.8

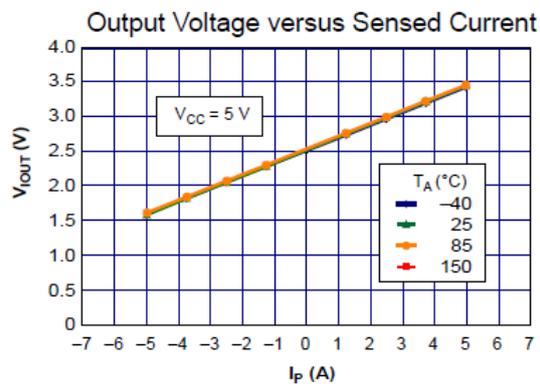


Figura C.8: Transferencia del medidor ACS712.

Sistema amplificador:

El sistema a analizar es el de la figura C.9

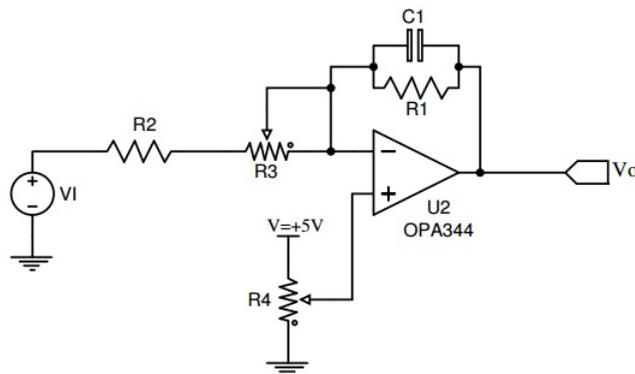


Figura C.9: sistema amplificador

Descomponemos la entrada V_I del sistema en dos partes: V_{in} la componente de alterna, y V_{IN} la componente de continua:

C.2. Transferencia del medidor de voltaje ACS712

$$V_I = V_{in} + V_{IN}$$

Hallamos la transferencia por partes: Los potenciómetros R_3 y R_4 los modelamos como su valor máximo, multiplicado por x e y respectivamente que indican el porcentaje del valor máximo.

1. En un primer caso, anulamos el voltaje de entrada continuo y la alimentación del operacional (Ver figura C.10):

$$V_I = V_{in} = A.\text{sen}(wt) \quad V = 0,$$

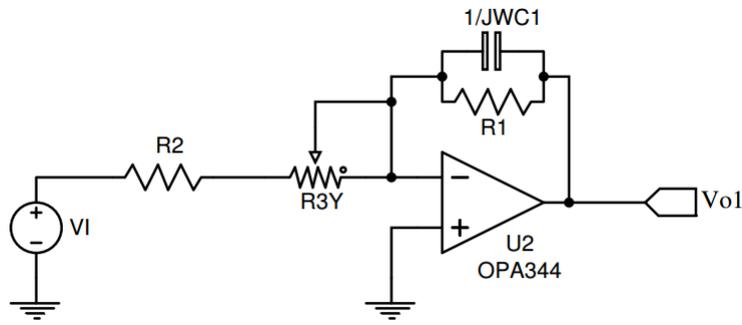


Figura C.10: Sistema amplificador caso 1.

$$\begin{aligned} R_1 // \frac{1}{j\omega C_1} &= \frac{R_1}{j\omega C_1 R_1 + 1} \\ \frac{V_{in} - 0}{R_2 + R_3y} &= \frac{0 - V_{o1}}{\frac{R_1}{j\omega C_1 R_1 + 1}} \\ \frac{V_{in}}{R_2 + R_3y} &= \frac{-V_{o1}(j\omega R_1 C_1 + 1)}{R_1} \end{aligned}$$

Obtenemos entonces:

$$V_{o1} = \frac{-R_1 V_{in}}{(R_2 + R_3y)(j\omega R_1 C_1 + 1)}$$

2. En el segundo caso, anulamos toda la entrada al operacional, y solo tenemos la alimentación de 5 V (Ver figura C.11):

$$V_I = 0, \quad V = 5V$$

Apéndice C. Hardware

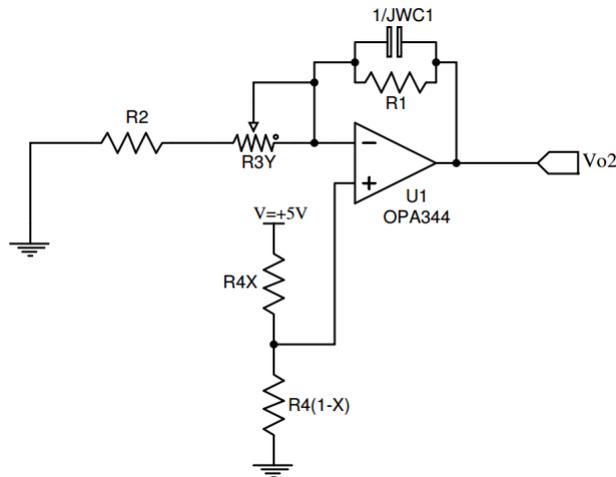


Figura C.11: Sistema amplificador caso 2.

Llamamos V_t al voltaje en la entrada + del amplificador. Haciendo un divisor de voltaje:

$$V_t = (1 - x)5V$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \frac{0 - (1 - x)5}{R_2 + R_{3y}} &= \frac{(1 - x)5 - V_{o2}}{R_1} \\ \frac{-5(1 - x)R_1}{R_2 + R_{3y}} &= (1 - x)5 - V_{o2} \\ V_{o2} &= 5(1 - x) + \frac{5(1 - x)R_1}{R_2 + R_{3y}} \end{aligned}$$

Finalmente:

$$V_{o2} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_{3y})}{R_2 + R_{3y}}$$

3. Como último caso, anulamos la señal sinusoidal y la alimentación del operacional:

$$V_I = V_{IN} = K, \quad V = 0V$$

$$\frac{K}{R_2 + R_{3y}} = \frac{-V_{o3}}{R_1}$$

C.2. Transferencia del medidor de voltaje ACS712

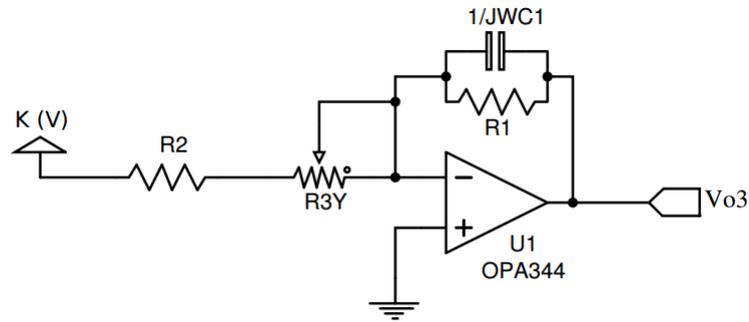


Figura C.12: Sistema amplificador caso 3.

Finalmente:

$$V_{o3} = \frac{-KR_1}{R_2 + R_{3y}}$$

Transferencia total:

Definimos V_{OUT} como la componente de continua de la respuesta, entonces:

$$V_{OUT} = V_{o2} + V_{o3}$$

$$V_{OUT} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_{3y}) - KR_1}{R_2 + R_{3y}}$$

Definimos V_{out} como la componente de alterna de la respuesta, entonces:

$$V_{out} = V_{o1}$$

Finalmente la transferencia total es:

$$V_o = V_{out} + V_{OUT}$$

$$V_{out} = \frac{-R_1 V_{in}}{(R_2 + R_{3y})(j\omega R_1 C_1 + 1)}$$

$$V_{OUT} = \frac{5(1-x)(R_1 + R_2 + R_{3y}) - KR_1}{R_2 + R_{3y}}$$

De esta forma, la tensión de salida depende de $V_i = V_{in} + V_{IN}$

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice D

Procesos Estocásticos

Definición: Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias $\{X_t, \text{ con } t \in T\}$, ordenadas según el subíndice t que en general se suele identificar con el tiempo. Por lo tanto, es una función en la cual, para cada instante del tiempo t , tendremos una variable aleatoria distinta representada por X_t [29]. También se puede ver a los procesos estocásticos como una generalización de las variables aleatorias. Para cada experimento, en vez de tener un número, tenemos una función que depende de t .

A los posibles valores que puede tomar la variable aleatoria se le denomina **estados**. Un proceso estocástico puede tener un espacio de estados discreto o continuo. Por otro lado la variable de tiempo t , también puede ser discreta o continua. Tenemos entonces cuatro combinaciones posibles para los procesos estocásticos.

Nos centraremos en los procesos estocásticos de estado continuo y tiempo discreto, porque son los que se adaptan a los objetivos de este proyecto. Se medirá el consumo eléctrico en tiempos discretos (segundos, horas, días), y se obtendrán datos que pertenecen a un espacio de estados continuo, que son los número reales. Obviando la cuantización en los medidores, la potencia puede tomar cualquier valor real.

D.1. Vinculación con las Series Temporales

Un concepto que hay que tener claro es el de realización del proceso estocástico. Por ejemplo, pensando el consumo eléctrico en un hogar como un proceso estocástico. Si realizamos el experimento y medimos el consumo de un hogar, podemos graficar el comportamiento de la potencia consumida. Esa gráfica temporal, muestra una sola realización del proceso, y no lo determina por completo. Si repetimos el proceso, obtenemos otra gráfica con una nueva realización.

Por lo tanto una realización de un proceso estocástico, es una sucesión de infinitos valores de una cierta variable a lo largo del tiempo. Como en nuestro caso t es discreto, obtenemos una sucesión de infinitos puntos. La diferencia entre la

Apéndice D. Procesos Estocásticos

realización y la serie temporal, radica en que la serie consta de un número limitado de valores, mientras que la realización es infinita. En general, una serie temporal se refiere a un período muestral, que tan sólo es una parte de la historia del proceso estocástico del que procede dicha serie.

Diremos entonces que:

Definición: Una serie temporal es una realización parcial de un proceso estocástico de parámetro de tiempo discreto.

D.2. Características de los Procesos Estocásticos

Como los procesos estocásticos son una familia de variables aleatorias, van a compartir las características estadísticas de los mismos, pero extendidas a funciones.

■ **Función de Medias:**

Es la función de t que proporciona las medias (esperanzas) de las distribuciones marginales para cada instante t :

$$\mu_t = E(X_t) \quad (\text{D.1})$$

■ **Función de Varianzas:**

Es la función de t que proporciona las varianzas de las distribuciones marginales para cada instante t :

$$\sigma_t^2 = \text{Var}(X_t) = E[(X_t - E(X_t))^2] \quad (\text{D.2})$$

■ **Función de Autocovarianzas:**

Es la función de t que proporciona la covarianza existente entre dos instantes de tiempo cualesquiera:

$$\text{Cov}(t, s) = \text{Cov}(X_t, X_s) = E[(X_t - E(X_t))(X_s - E(X_s))] \quad (\text{D.3})$$

■ **Función de Autocorrelación:**

Es la estandarización de la función de Autocovarianzas

$$\rho_{t,s} = \frac{\text{Cov}(t, s)}{\sigma_t \cdot \sigma_s} \quad (\text{D.4})$$

D.3. Procesos Estacionarios

Diremos que un proceso estocástico X_t es **estacionario** cuando mantiene constante sus características estadísticas a lo largo del tiempo. Una definición más formal nos permite distinguir entre dos tipos:

D.4. Funciones de Autocorrelación (ACF y PACF)

1. Estacionario en sentido estricto:

Dado un grupo de instantes t_1, \dots, t_N del proceso, obtenemos N variables aleatorias X_{t_i} . Estas variables tienen una distribución conjunta F_{t_1, \dots, t_N} :

$$F_{t_1, \dots, t_N}(\alpha_1, \dots, \alpha_N) = P(X_{t_1} \leq \alpha_1, \dots, X_{t_N} \leq \alpha_N) \quad (\text{D.5})$$

Si trasladamos el grupo de instantes un tiempo τ , tendremos una nueva distribución conjunta $F_{t_1+\tau, \dots, t_N+\tau}$. Si para toda elección de τ obtenemos la misma distribución conjunta, el proceso se dice *estrictamente estacionario*:

$$x \text{ estrictamente estacionario} \Leftrightarrow F_{t_1, \dots, t_N} = F_{t_1+\tau, \dots, t_N+\tau} \quad \forall \tau \in T, N, t_i$$

Esta condición resulta muy restrictiva, y por consiguiente se adopta otra más “débil”, pero más genérica.

2. Estacionario en sentido amplio:

Diremos que un proceso estocástico es estacionario en sentido amplio, cuando la media y la varianza son constantes, y la autocorrelación sólo depende de la distancia entre instantes. Es decir si mantiene constante sus características estadísticas a lo largo del tiempo:

- $\mu_t = \mu$
- $\sigma_t^2 = \sigma^2$
- $Cov(t, t + \tau) = \gamma_\tau \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

D.4. Funciones de Autocorrelación (ACF y PACF)

Para el caso de un proceso estacionario en sentido amplio, la ecuación D.4 de la función de autocorrelación se simplifica:

$$\rho_\tau = \frac{\gamma_\tau}{\sigma^2} = \frac{\gamma_\tau}{\gamma_0} \quad (\text{D.6})$$

A esta función se le denomina *función de autocorrelación simple (ACF)*, y es de suma importancia para los modelos predictivos. La representación gráfica en forma de diagrama de barras del ACF, recibe el nombre de *correlograma*, en la figura D.1, vemos un ejemplo de correlograma.

Algunas propiedades de la ACF:

- $\rho_i = \rho_{-i}$
- $\rho_0 = 1$

Apéndice D. Procesos Estocásticos

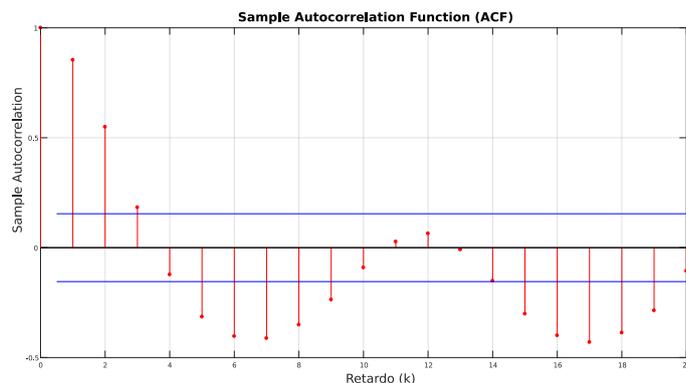


Figura D.1: Gráfico de la Función de Autocorrelación, o correlograma.

- $|\rho_\tau| \leq 1$

Se denomina *Autocorrelación Parcial* de orden k , a la correlación entre dos variables aleatorias del proceso distanciadas k , pero sin considerar la existencia de las variables intermedias. Para calcular la autocorrelación parcial entre X_t y X_k , se elimina la influencia que sobre ambas tienen las variables $X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_{t+k-1}$. La *Función de Autocorrelación Parcial* (PACF por sus siglas en inglés) es la función ϕ_{kk} que tienen como elementos las autocorrelaciones parciales:

$$\begin{aligned} \phi_{kk} &= \text{corr}(X_t, X_{t+k} | X_t, \dots, X_{t+k-1}) \\ \phi_{kk} &= \frac{\text{Cov}[(x_t - \hat{x}_t)(x_{t-k} - \hat{x}_{t-k})]}{\sqrt{\text{Var}(x_t - \hat{x}_t)\text{Var}(x_{t-k} - \hat{x}_{t-k})}} \end{aligned} \quad (\text{D.7})$$

Es posible calcular la autocorrelación parcial a partir de la autocorrelación de la siguiente manera:

$$\phi_{kk} = \frac{|A_k|}{|B_k|} \quad (\text{D.8})$$

Donde A_k y B_k son las siguientes matrices:

$$A_k = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-2} & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{k-3} & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{k-4} & \rho_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots & \rho_1 & \rho_k \end{pmatrix} \quad (\text{D.9})$$

$$B_k = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-2} & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{k-3} & \rho_{k-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{k-4} & \rho_{k-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots & \rho_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{D.10})$$

D.5. Procesos Ergódicos

La definición de ergodicidad, surge de la necesidad de caracterizar un proceso estocástico. Cuando elaboramos una realización del proceso estocástico, obtenemos una función del tiempo. Dado un tiempo t determinado, tenemos un solo valor de la variable aleatoria X_t . En principio no hay manera de saber cual es la media μ_t de dicha variable. Sin embargo, si el proceso es ergódico, podemos caracterizarlo (conocer todas sus variables estadísticas), a partir de una única realización. Para que el proceso sea ergódico, es necesario que sea estacionario primero.

- **Ergodicidad respecto a la Media:**

Definimos la media temporal de una realización del proceso como:

$$\mu_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(t_j) \quad (\text{D.11})$$

Un proceso estocástico estacionario es ergódico en Media, si la media temporal es igual a la media de las variables aleatorias que forman el proceso (función de medias):

$$\mu_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t_j)$$

Donde n es la cantidad de realizaciones del proceso, y N es la cantidad de variables aleatorias que tiene. Es decir, calculamos la media temporal de la realización μ_x , si el proceso es ergódico, para cualquier instante de tiempo t_j que se elija, ya vamos a conocer la media de la variable aleatoria x_{t_j} .

- **Ergodicidad respecto a la Varianza:**

Definimos la varianza temporal de una realización del proceso como:

$$\sigma_x^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x(t_j) - \mu_x)^2 \quad (\text{D.12})$$

De manera similar que con la media, un proceso estocástico estacionario es ergódico respecto a la Varianza, si la varianza temporal es igual a la varianza de las variables aleatorias que forman el proceso (función de varianzas):

$$\sigma_x^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i(t_j) - \mu_x)^2 \quad (\text{D.13})$$

- **Ergodicidad respecto a la Autocorrelación:** Definimos la función de autocorrelación temporal de una realización del proceso como:

$$R(t_j, t_j + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(t_j)x(t_j + \tau) \quad (\text{D.14})$$

Un proceso estocástico estacionario es ergódico respecto a la Autocorrelación, si la función de autocorrelación temporal es igual a la función de autocorrelación de las variables que forman el proceso:

$$R(t_j, t_j + \tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t_j)x_{i+\tau}(t_j) \quad (\text{D.15})$$

Si se cumplen las tres condiciones anteriores, se dice que el proceso es Ergódico.

D.6. Estimación de características del proceso

En la práctica, no podemos realizar una realización con infinitos valores. Como se mencionó anteriormente al tomar una porción de una de las realizaciones del proceso, obtenemos una serie temporal. Como la autocorrelación de un proceso ergódico tiende a cero podemos considerar que el aumentar el tamaño de la serie, aporta poca información al proceso, y podemos modelarlo eligiendo el tamaño adecuado.

A partir de una serie temporal X_t con $t = 0, \dots, N$, podemos encontrar estimadores a las características del proceso que modela la serie temporal. A estos estimadores se les denomina “variables muestrales”:

- **Media Muestral:**

$$\hat{\mu}_X = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t \quad (\text{D.16})$$

- **Varianza Muestral:**

$$\hat{\sigma}_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (X_t - \hat{\mu}_X)^2 \quad (\text{D.17})$$

- **Covarianza Muestral:**

$$\hat{\gamma}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (X_t - \hat{\mu}_X)(X_{t+k} - \hat{\mu}_X) \quad (\text{D.18})$$

- **Autocorrelación Muestral:**

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0} \quad (\text{D.19})$$

- **Autocorrelación Parcial Muestral:** Para estimar la función de autocorrelación parcial aplicamos la ecuación D.8 con los estimadores de la autocorrelación calculada previamente ($\hat{\rho}_k$).

Apéndice E

Librerías Python

E.1. Librería ADS1x15

Para adquirir los datos del ADC se utilizó la librería ADS1x15 descargada directamente de la web de Adafruit. Esta librería permite controlar tanto el conversor ADS1015 como el ADS1115 (versión de 16 bits pero más lenta) [7]. Cuenta con un amplio abanico de funciones para utilizar el conversor de distintas maneras. La ganancia y la frecuencia de muestreo del ADC se puede seleccionar entre los valores que se indican en la tabla E.1.

Ganancia - G	Frecuencia de muestreo - fm(Hz)
2/3	128
1	250
2	490
4	920
8	1600
16	2400
	3300

Tabla E.1: Valores posibles para la ganancia y la frecuencia de muestreo del ADS1015.

Apéndice E. Librerías Python

Tiene dos modos de funcionamiento, modo continuo y modo singular. A su vez, cada uno de estos modos puede ser invocado en un canal específico, o de manera diferencial entre dos canales seleccionados. Podemos escoger entonces entre cuatro modalidades de funcionamiento:

- **Modo Continuo:** En este modo se le indica al ADC que comience a medir mediante el comando: `start_adc(channel, gain=G, data_rate=fm)`. Donde en “channel” se le especifica el canal a medir (puede ser 0,1,2 o 3) y en “gain” y “data_rate” la ganancia y la frecuencia de muestreo respectivamente. Una vez iniciada la conversión se puede obtener el último valor con el comando `get_last_result()`. Para finalizar el muestreo se ejecuta el método `stop_adc()`
- **Modo Continuo Diferencial:** Similar al modo continuo, pero mide la diferencia entre dos canales específicos. Se inicia la conversión con el comando `start_adc_difference(differential, gain=G, data_rate=fm)`. “Differential” debe ser uno de los valores indicados en la tabla E.2

Differential	Medida
0	Canal 0 menos 1
1	Canal 0 menos 3
2	Canal 1 menos 3
3	Canal 2 menos 3

Tabla E.2: Selección de canales para el modo diferencial.

Para obtener los valores y finalizar la conversión, se utilizan los mismos métodos que en el Modo Continuo.

- **Modo Singular:** También conocido como “One Shoot mode”, no requiere inicio ni fin de conversión. Simplemente se lee el valor del canal especificado, en el momento en que se invoca el método `read_adc(channel, gain=G, data_rate=None)`. En este caso, no tiene sentido seleccionar valor para la frecuencia de muestreo, ya que realiza una sola medida. Para realizar medidas múltiples y con frecuencias específicas, lo que se suele utilizar es generar un bucle de invocación del método y haciendo que el software permanezca inactivo con el método `sleep` de la librería `time`.
- **Modo Singular Diferencial:** Igual al Modo Singular, pero midiendo la diferencia entre los canales como especifica la tabla E.2. Se utiliza la función `read_adc_difference(differential, gain=G, data_rate=None)`

También existe otro modo de funcionamiento llamado comparador. El comparador comienza a realizar una medida de manera continua similar al Modo Continuo, pero alerta al sistema cuando se superan ciertos umbrales indicados

al comienzo de la conversión. Puede funcionar de manera simple o diferencial. Este modo no lo probamos en la práctica por lo que no vamos a entrar en más detalles sobre sus características.

E.2. Librería Time

Esta es una de las librerías estándar de Python, que provee varias funciones relacionadas con el tiempo; desde consultas horarias, conversiones, calendarios y demás [8]. Es especialmente útil para nuestro proyecto, ya que la plataforma requiere sincronismo temporal para hacer los cálculos de potencia más precisos. El módulo utiliza intervalos de tiempos representados con un número flotante, que se traduce como los segundos que pasaron desde el “epoch”¹. Este número se puede obtener mediante el método `time()`. Por ejemplo si ingresamos `print(time.time())` obtenemos el siguiente número en pantalla: `1493672179.8428707`. Han pasado 1493672179 segundos desde el año 1970, que si hacemos la cuenta da aproximadamente 47 años.

La representación flotante es útil para medir datos, pero no es conveniente para producir representaciones legibles, por ejemplo saber la fecha y hora. La librería cuenta con otra forma de representación llamada “struct_time”, mediante una tupla de nueve elementos. La tabla E.3 muestra el significado de cada uno de los elementos de la tupla ².

Con los siguientes comandos podemos traducir la representación en flotante a “struct_time”:

- **gmtime():** Convierte la representación en punto flotante de segundos desde el “epoch”, a una tupla con “struct_time” en UTC (“Universal Coordinated Time”, versión actual de GMT.).
- **localtime():** Convierte la representación en punto flotante de segundos desde el “epoch”, a una tupla con “struct_time” en tiempo local.

¹Punto en el tiempo desde que se comenzó a medir: primero de enero de 1970.

²Los segundos son 61 intencionalmente por si hay un salto.

Apéndice E. Librerías Python

Índice	Atributo	Valores
0	tm_year	Año, ejemplo: 2017
1	tm_mon	Mes = [1,12]
2	tm_mday	Día del mes = [1,31]
3	tm_hour	Hora = [0,23]
4	tm_min	Minuto = [0,59]
5	tm_sec	Segundos = [0,61]
6	tm_wday	Día de la semana = [0,6] (0 es Lunes)
7	tm_yday	Día del año = [1,366]
8	tm_isdst	Horario de Verano = [-1,0,1]

Tabla E.3: Significado de los elementos de la tupla `struct.time`.

En cualquier momento podemos acceder a los elementos de la tupla para obtener algún dato específico, como la hora, el año, el día, etc. Por ejemplo si imprimimos en pantalla la tupla entera con el comando `print(time.localtime(time.time()))` obtenemos el siguiente resultado:

```
tm_year = 2017
tm_mon = 5
tm_mday = 1
tm_hour = 18
tm_min = 14
tm_sec = 41
tm_wday = 0
tm_yday = 121
tm_isdst = 0
```

Además existe la función `asctime([t])` que traduce la tupla en un string de 24 caracteres de la siguiente forma:

```
Mon May 1 18:14:41 2017
```

Otro de los métodos utilizados es `time.sleep(T)` que detiene la ejecución del código hasta que se acabe el tiempo T.

A continuación mostramos un código ejemplo de las funciones del paquete `time` y sus distintas representaciones en pantalla (Ver figura E.1):

E.3. Librería `numpy`

`Numpy` es un paquete fundamental para computación científica en Python. Contiene entre otras cosas: Álgebra lineal, transformada de Fourier y generación

```

dimari@dimari-desktop:~/codigos/pruebas$ python3 pruebastime.py

Han pasado 1493676715.4222105 segundos desde el epoch

Tupla que representa la hora local: time.struct_time(tm_year=2017, tm_mon=5, tm_mday=1,
tm_hour=19, tm_min=11, tm_sec=55, tm_wday=0, tm_yday=121, tm_isdst=0)

Estamos en el día 1 del mes 5 del año 2017

La fecha de hoy es: Mon May  1 19:11:55 2017

```

Figura E.1: Resultado de pruebas con Librería Time.

de números aleatorios, lo cual fue muy útil para nuestro código.

Las funciones de numpy que se utilizaron durante la implementación del código fueron: `numpy.empty` (crea una lista vacía), `numpy.mean` (realiza el promedio), `numpy.zeros` (crea una lista de ceros), `numpy.linspace` (crea una lista equiespaciada), `numpy.sin` (define una función de un seno), `numpy.pi` (define el número pi)

E.4. Librería matplotlib

Matplotlib es una librería de ploteo de Python que genera figuras de gráficos en distintos formatos. Permite crear gráficos, histogramas, espectros de potencia, gráficos de barras, gráficos de errores, diagramas de dispersión, etc. Para el ploteo simple el módulo pyplot proporciona una interfaz tipo MATLAB. Se puede controlar los estilos de línea, las propiedades de las fuentes, las propiedades de los ejes, etc., a través de una interfaz orientada a objetos.

Un ejemplo para realizar un gráfico simple:

```

import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(x,y)
plt.show()

```

E.5. Librería math

Este paquete ya viene instalado por defecto con Python. Es un paquete con las funciones matemáticas fundamentales. Estas funciones no se pueden utilizar con números complejos para los cuales existe otro paquete llamado cmath. Todos los valores devueltos por las funciones incluidas en este modulo son puntos flotantes. Para nuestro código, solamente utilizamos la función `math.pow()` para calcular la raíz cuadrada de un valor. Algunos tipos de las funciones que están incluidas son: exponenciales, logarítmicas, trigonométricas, conversión angular, hiperbólicas, constantes, etc.

E.6. Librería statsmodels

Statsmodels es un módulo desarrollado por terceros, que proporciona funciones y clases para la estimación de variados modelos estadísticos, realización de pruebas estadísticas y exploración de datos estadísticos. El paquete está alojado en statsmodels.org con código abierto.

Algunos de los modelos estadísticos que proporciona son: regresión lineal, modelos lineales generalizados, ecuaciones de estimación generalizadas, regresión con variable dependiente discreta, análisis de series temporales, etc. Nuestro objetivo son las funciones de series temporales. En nuestro código solamente utilizamos la función para el cálculo de PACF (partial autocorrelation). Dicha función devuelve los valores de la autocorrelación parcial y a partir de esos valores se calculan el orden del modelo que se utilizará.

E.7. Librería Pyflux

Construida sobre las librerías NumPy, SciPy y Pandas; esta librería permite una fácil aplicación de funciones de análisis y predicción sobre series temporales [9]. De la basta lista de métodos que la librería otorga, nos centramos específicamente en los modelos ARIMA.

La librería permite crear un modelo dando tres argumentos fundamentales (Ver figura E.2):

- **Datos:** Los datos de entrada que queremos modelar tienen que ser datos creados con las librerías de Numpy o Pandas. O en última instancia, un vector de datos Python transformado en Numpy o Panda mediante alguno de los métodos que las librerías poseen.
- **Diseño:** Son los valores de P y Q con los que queremos armar nuestro modelo ARMA.
- **Familia:** La familia especifica el tipo de distribución de la serie temporal, por ejemplo una función Normal.

$$\text{Mi Modelo} = \text{Pyflux}(\text{Datos}, \text{Diseño}, \text{Familia})$$

Figura E.2: Modelo de Librería Pyflux.

El segundo paso es la adaptación del modelo utilizando uno de los tres métodos de ajuste posibles:

- **Maximum Likelihood Estimation(MLE):** Es un método de estimación de parámetros que busca encontrar el estimador θ que maximiza la función de verosimilitud. Es el método que utilizamos nosotros porque lo recomendaban en la Web de Pyflux, y parecía ser sencillo de entender.

- **Metropolis-Hastings(M-H)**: Utiliza el método Monte Carlo con Cadenas de Markov, para obtener los coeficientes que mejor ajustan al modelo.
- **Black Box Variational Inference(BBVI)**: Otro método desconocido.

Una vez ajustado el modelo, la librería permite realizar distintos métodos para analizar y comparar resultados. Mediante el comando `modelo.summary()` se despliega en pantalla algunos de los resultados principales del ajuste del modelo. Por ejemplo los valores de los coeficientes, el intervalo de confianza, el método utilizado y la cantidad de observaciones. También podemos realizar un gráfico de los coeficientes, o incluso de la predicción a futuro. Estas opciones no fueron implementadas por nosotros, ya que preferimos hacerlo de nuestra manera.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] <http://downloads.element14.com/raspberryPi1.html>. element14 community.
- [2] <https://www.element14.com/community/community/raspberry-pi>. element14 community.
- [3] <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/usb/README.md>.
- [4] <https://wiki.python.org/moin/BeginnersGuide>.
- [5] <http://www.modulecounts.com/>.
- [6] <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/individual+household+electric+power+consumption>
- [7] <https://github.com/adafruit>.
- [8] <https://docs.python.org/2/library/time.html>.
- [9] <http://www.pyflux.com/>.
- [10] Andres M. Alonso. Introduccion al analisis de series temporales. Technical report, Universidad Carlos III de madrid.
- [11] Emilio Ancillotti, Raffaele Bruno, and Marco Conti. The role of communication systems in smart grid: Architectures, technical solutions and research challenges. *ELSEVIER*, 2013.
- [12] Cecilia Esparza Catalan. Series temporales. Technical report, Consejo Superior de Investigacion Cientifica - Espana.
- [13] Pierpaolo Cazzola and Marine Gerner. Global ev outlook 2016. Technical report, IEA International Energy Agency, 2016.
- [14] Universidad complutense MADRID. *Effecto hall*.
- [15] Barry Fischer. This is what tesla owners are doing while you sleep. <https://blogs.oracle.com/utilities/this-is-what-tesla-owners-are-doing-while-you-sleep>, July 2014.
- [16] Hong Lei Chen Product Manager for Avago Technologies. *Optocouplers help promote safe, efficient EV charging stations*. 2016.

Referencias

- [17] Stefano Galli, Anna Scaglione, and Zhifang Wang. For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. *IEEE*, 2011.
- [18] Arnau Gras. *Diseno de series temporales: tecnicas de analisis*. Universitat de Barcelona, 2001.
- [19] IEEE. *Energy Managment System Control Center Applications, Advanced Visualization and Training Simulators*, Palacio de la luz, URUGUAY, Octubre 2016. Palacio de la luz, URUGUAY.
- [20] IEEE. *Synchrophasor PMU Solutions for Grid Operations*, Palacio de la luz, URUGUAY, Octubre 2016. Palacio de la luz, URUGUAY.
- [21] Christof Klemenjak, Dominik Egarter, and Wilfried Elmenreich. Yomo - the arduino-based smart metering board. Technical report, Institute of Networked and Embebbed Systems Alpen-Adria-Universitat Klagenfurt, Autria, 2014.
- [22] Christoph Klemenjak. Design of a smart meter. Technical report, University of Klagenfurt, 2015.
- [23] Meiling Lu, Song Liu, and Qiaoshu Li. Design and implementation of power information visualization platform based on smart meter. *IEEE*, 2016.
- [24] Gen Marubayashi and Shinichi Tachikawa. Spread spectrum transmission on residential power line. *IEEE*, 1996.
- [25] Paolo Mercorelli. Conceptual understanding of complex components and Nyquist-Shanon sampling theorem. *IEEE*, 2015.
- [26] Jesus Fraile Mora. *Maquinas electricas*. McGrawHill, 2003.
- [27] M.Schwartz. History of communications - carrier-wave telephony over power lines: Early history. *IEEE*, 2009.
- [28] Luis Orozco. Optimizing precision photodiode sensor circuit design. Technical report, Analog Devices, 2014.
- [29] Juan Pechiar. Procesos estocasticos. Technical report, UDELAR, 2010.
- [30] D.S.G. Pollok. *Handbook of time series analysis signal processing and dynamics*. Academic Press, 1999.
- [31] M. R. Starke, D. T. Rizy, and M. A. Young. Synchrophasor technologies and their deployment in the recovery act smart grid programs. Technical report, U.S. Department of ENERGY, 2013.
- [32] Chaouki T.Abdallah. Electric grid control: algorithms and open problems. Technical report, UNM school of engineering, 2009.
- [33] Juan Vanerio. Redes de acceso. Technical report, UDELAR, 2017. <https://eva.fing.edu.uy> - Nucleo de Red.

Índice de tablas

2.1. Puntos experimentales de la transferencia del medidor ACS712.	34
2.2. Resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 0,438; 0,934 y 1,2 V.	37
2.3. Resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - V_{ref} : 2,07; 3,2 y 3,92 V.	37
2.4. Datos experimentales y ganancia de sensor de voltaje en AC	40
2.5. Medidas experimentales del sensor de corriente	42
4.1. Tabla de coeficientes estacionales, para una serie ejemplo.	64
5.1. Rangos de Full-Scale según el valor de la ganancia.	86
5.2. Comparación MAPE, MASE y sMAPE	106
A.1. Ruido de electrodomésticos inyectado en la red	114
C.1. Tabla de pines de ACPL-79X.	123
C.2. Tabla de pines de ACPL-87X.	123
C.3. Condiciones de operación recomendadas ACPL-87X.	123
E.1. Valores posibles para la ganancia y la frecuencia de muestreo del ADS1015.	137
E.2. Selección de canales para el modo diferencial.	138
E.3. Significado de los elementos de la tupla <code>struct_time</code>	140

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1. Interacción de red eléctrica con el sistema SCADA-EMS.	2
1.2. Interacción de red eléctrica con el sistema SCADA-EMS y PMUs. . .	4
1.3. Sistema eléctrico con sincrofasores.	5
1.4. Infraestructura de comunicación para Smart Grid.	9
2.1. Sistema fotodiodo con amplificador.	18
2.2. Transferencia típica de un fotodiodo.	18
2.3. Sensor de voltaje.	19
2.4. Diagrama de bloques del dispositivo completo de SPARKFUN. . .	20
2.5. Transferencia del integrado ACS712.	21
2.6. Diagrama de bode para $y=0$	23
2.7. Diagrama de bode para $y=1$	24
2.8. LEM LTS25-NP.	26
2.9. Esquemático de sensor de corriente.	26
2.10. Posibles conexiones para el sensor LEM LTS25-np.	26
2.11. Transferencia sensor de corriente.	27
2.12. Conversor analógico digital ADS1015.	28
2.13. Voltaje de salida en función de x , con $y=0$	30
2.14. Transferencia del medidor ACS712.	31
2.15. Voltaje de salida en función de y para entrada sinusoidal de amplitud 38,5mV y 50Hz.	32
2.16. Voltaje de salida en función de x con $y=0,0392$	32
2.17. Transferencia del ACS712 mediante mínimos cuadrados.	35
2.18. Gráfica de resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - $V_{ref} : 0,438; 0,934$ y $1,2V$	37
2.19. Gráfica de resultados experimentales del sensor de voltaje en DC - $V_{ref} : 2,07; 3,2$ y $3,92 V$	38
2.20. Gráfica de datos experimentales de sensor de voltaje en AC	40
2.21. Transferencia teórica vs transferencia experimental.	42
3.1. Especificaciones Raspberry Pi detalladas por modelo.	46
3.2. Raspberry Pi 3 Modelo B.	47
3.3. Pines GPIO	49
3.4. Conexión Raspberry Pi - ADS1015 - Medidores.	52
4.1. Ejemplo de Serie Temporal, con nivel.	55

Índice de figuras

4.2. Gráfico de cajas para apreciar la variabilidad de una Serie temporal.	55
4.3. Leyenda para un gráfico de cajas.	55
4.4. Ejemplo de serie temporal con tendencia creciente.	56
4.5. Tipos de series temporales según su nivel.	57
4.6. Análisis de la componente estacional de una serie.	57
4.7. Serie temporal cuyos niveles y variabilidad dependen entre sí.	59
4.8. Serie temporal cuyos niveles y variabilidad dependen entre sí.	60
4.9. Serie temporal estacionaria.	61
4.10. Media móvil de orden 3.	63
4.11. Componentes estacionales de una Serie Temporal.	64
4.12. Ejemplo de serie temporal sin tendencia clara.	65
4.13. Coeficientes estacionales de la serie ejemplo.	66
4.14. Predicción mediante Análisis Descriptivo.	66
4.15. Diagrama de filtros para un proceso MA.	68
4.16. Diagrama de filtros para modelo AR	70
4.17. Diagrama de filtros para modelo ARMA	72
4.18. Diagrama de flujo para un modelo ARIMA.	73
4.19. Serie Temporal de ejemplo a predecir.	75
4.20. Componente Irregular de la serie temporal.	75
4.21. Función de Autocorrelación Simple (arriba) y Parcial(abajo) de la serie ejemplo.	76
4.22. Predicción para la componentes Irregular de la Serie, mediante modelo ARMA(1,1).	76
4.23. Predicción del octavo día de la serie ejemplo mediante modelo ARMA(1,1).	77
4.24. Comparación entre la serie en el octavo día y la predicción mediante modelo ARMA(1,1).	77
5.1. Diagrama de flujo general del Software	80
5.2. Diagrama temporal de la etapa A.	80
5.3. Diagrama temporal de un ciclo del sistema.	81
5.4. Pseudocódigo del sistema general.	82
5.5. Diagrama de bloques de la Etapa A.	84
5.6. Pseudocódigo de la Etapa A.	84
5.7. Pseudocódigo del método leer_BUS.	85
5.8. Diagrama de flujo del método leer_BUS.	85
5.9. Pruebas de velocidad de lectura del ADS1015.	86
5.10. Gráfico de cuantización del ADS1015.	87
5.11. Pseudocódigo del método Reconstruir.	89
5.12. Cálculo de los máximos de las señales.	90
5.13. Diagrama de bloques de la Etapa B.	92
5.14. Pseudocódigo de la EtapaB.	92
5.15. Pseudocódigo de la Fase B1: Lectura de Datos.	93
5.16. Pseudocódigo del método Autocorrelación.	94
5.17. Diagrama de predicción.	95
5.18. Diagrama de flujo del método predecir.	95

5.19. Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 1 kHz.	96
5.20. Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 1 kHz, observada más adelante.	97
5.21. Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 500 Hz.	97
5.22. Reconstrucción de una señal de 300 Hz a 3 kHz.	98
5.23. Cálculo de Potencia Activa para una corriente desfasada 90 grados del voltaje.	98
5.24. Cálculo de Potencia Activa para una corriente desfasada 45 grados del voltaje.	99
5.25. Cálculo de Potencia Activa para una corriente en fase con el voltaje.	99
5.26. Cálculo de Potencia Activa para una corriente en fase con el voltaje, pero de amplitud variable.	100
5.27. Consumo Residencial durante el mes de enero de 2007.	101
5.28. Gráfico de cajas para la serie en enero 2007.	101
5.29. ACF de la serie sin desestacionalizar.	102
5.30. Coeficientes estacionales para la serie en Enero de 2007.	102
5.31. Predicción para el 01 de Febrero de 2007 mediante modelo de análisis descriptivo.	103
5.32. Predicción para el 01 de Febrero de 2007 mediante modelo de análisis descriptivo.	103
5.33. Componente Irregular de la serie.	104
5.34. Funciones de autocorrelación simple (a) y parcial (b) de la serie temporal desestacionalizada.	104
5.35. Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo ARIMA(2,0,4).	105
5.36. Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo ARIMA(2,0,4).	105
5.37. Predicción para el 01 de Febrero 2007 mediante modelo con intervalo de confianza 95 %.	106
5.38. Predicción para el 08 de Enero 2007 con una muestra por hora durante una semana.	107
5.39. Predicción para el 08 de Enero 2007 con una muestra por minuto durante una semana.	107
A.1. Estaciones de carga del auto eléctrico.	115
A.2. Consumo eléctrico promedio EVs.	116
C.1. Sensado de corriente del YoMo.	122
C.2. Sensado de voltaje del YoMo.	122
C.3. Circuito equivalente del YoMo.	122
C.4. Diagrama operacional ACPL-C79X.	123
C.5. Diagrama operacional ACPL-C87X.	123
C.6. Voltaje de entrada vs voltaje de salida del ACPL-87X.	124
C.7. Circuito ACPL-87B.	124
C.8. Transferencia del medidor ACS712.	126
C.9. sistema amplificador	126
C.10. Sistema amplificador caso 1.	127
C.11. Sistema amplificador caso 2.	128

Índice de figuras

C.12.Sistema amplificador caso 3.	129
D.1. Gráfico de la Función de Autocorrelación, o correlograma.	134
E.1. Resultado de pruebas con Librería Time.	141
E.2. Modelo de Librería Pyflux.	142

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 26 julio, 2017.
<http://iie.fing.edu.uy/>