



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Control de frecuencia mediante gestión de
demanda durante el proceso de carga lenta en
vehículos eléctricos

*Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autor :

Erika Lisbeth Maldonado Pineda
C.I. 070507355-9
erika.maldonado1104@ucuenca.edu.ec

Director :

Ing. Luis Gerardo González Morales, PhD
C.I. 172971105-9

Cuenca - Ecuador
12 de junio de 2020



Resumen

El cambio climático ha impulsado una tendencia creciente en cuanto al uso de energías renovables en todo el mundo. Dentro de la iniciativa de reducción de emisiones de carbono existentes en la industria del transporte, el uso de vehículos eléctricos juega un rol importante, constituyendo el eje central de la movilidad eléctrica a favor del desarrollo sostenible, pues además de brindar cero emisión de gases contaminantes al ambiente, fomenta el desarrollo de las fuentes de energía renovable para recargar sus baterías. Ecuador por sus características geográficas, tiene una capacidad de generación de energía eléctrica a través de fuentes hídricas suficiente para cubrir la demanda actual del país, siendo una región conveniente para respaldar la introducción de EVs.

Aunque el uso de vehículo eléctricos trae consigo grandes ventajas en cuanto a la mitigación de impactos medioambientales, es necesario tomar en cuenta los potenciales problemas que su introducción en masa causará en la red eléctrica del país, tal es el caso de la elevada demanda de potencia de consumo que esto provocaría especialmente en horas pico.

Es por ello, que el presente trabajo de titulación se centra en el análisis y desarrollo de un algoritmo de regulación de frecuencia primario durante el proceso de carga lenta de vehículos eléctricos, debido a que el empleo de este tipo de estaciones de carga es común por su facilidad de operación y la seguridad que brinda a los usuarios. El algoritmo propuesto pretende ayudar a la reducción de la diferencia generación/demanda, lo que permitiría mantener la calidad de la red eléctrica dentro de los rangos establecidos por el CONELEC.

La estación de carga lenta con la que se trabajó opera con una potencia máxima de 4.8kW, pero es posible reducirla dependiendo de las características de la red y del vehículo que se esté cargando en ese momento, específicamente a reducciones en la frecuencia debidas a sobre cargas en la misma. Aquí es donde entra en juego el control primario de frecuencia, en este estudio se utiliza el algoritmo de medición de frecuencia conocido como FFT, el cual fue implementado en un Arduino Due y cuya respuesta permite modificar la referencia de carga enviada al vehículo eléctrico.

Las pruebas experimentales para este trabajo de titulación se llevaron a cabo en el Laboratorio de microrred Balzay de la Universidad de Cuenca, que cuenta con los equipos necesarios para su desarrollo. La puesta en marcha del algoritmo implementado presentó resultados favorables, pues la disminución de potencia de consumo del vehículo eléctrico se efectuó dentro de los rangos establecidos, es decir, que por cada 0.3 Hz reducidos en la frecuencia de la red, se redujo un 12.5 % la potencia de consumo del EV. Además se midió el tiempo de respuesta que el algoritmo requiere para reducir la demanda, el cual es de 10 segundos y se encuentra dentro del rango de operación del control primario de frecuencia.

Palabras clave : vehículo eléctrico. estación de carga L2. estándar SAE j1772. algoritmo de gestión de demanda. control primario de frecuencia. FFT



Abstract

Around the world, Climate Change has driven a growing trend in the use of renewable energies. Within the set of initiatives to reduce carbon emissions, the use of electric vehicles plays an important role, because they can deliver zero emission of polluting gases and they promote the development of renewable energy sources which are necessary to recharge their batteries. Ecuador, due to its geographical characteristics and specially by its water resources, has a capacity to generate enough electricity to cover the country's current demand, therefore this is a convenient region to support the introduction of EVs. Although the use of electric vehicles brings great advantages in terms of reducing environmental impacts, it is necessary to take into account the potential problems that their mass introduction will cause in the country's electricity grid, where an expected result would be the high demand for power consumption during peak hours.

Thus, next work focuses on the analysis and development of a primary frequency regulation algorithm during the slow charging process of electric vehicles. The proposed algorithm aims to help reduce the generation/demand difference which would allow maintaining the quality of the electricity grid within the ranges established by the CONELEC.

The slow charging station used for this work operates with a maximum power of 4.8kW, but is possible to reduce it according of the grid's features and the vehicle which is charging at the same time, such as reductions in the frequency due to overloads in the grid. At this point is where the primary frequency control comes into play, in this research the frequency measurement algorithm known as Fast Fourier Transform is used, which was implemented in an Arduino Due and whose response allows modifying the load reference sent to the electric vehicle.

Experimental tests for this thesis were carried out in the Balzay Micro grid Laboratory of the University of Cuenca, which has the necessary equipment for its development. The implementation of the algorithm exhibit positive results, since the decrease in power consumption of the electric vehicle took place within the established ranges, where for every 0.3 Hz reduced in the frequency of electricity grid, power consumption of the electric vehicle was reduced 12.5 %.

In addition, the response time that the algorithm requires to reduce the power consumption was measured, which is 10 seconds and this is within the operating range of the primary frequency control.

Keywords : electric vehicle. charging station label 2. SAE j1772 standar. demand management algorithm. primary frequency control. FFT



Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XI
Cláusula de Propiedad Intelectual	XII
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XIII
Certifico	XIV
Dedicatoria	XV
Agradecimientos	XVI
Abreviaciones y acrónimos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Alcance	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Antecedentes	3
2. Marco teórico y Estado del arte	5
2.1. Microrred	5
2.1.1. Configuraciones de una microrred	6
2.2. CENTRO CIENTIFICO, TECNOLÓGICO Y DE INVESTIGACIÓN “BALZAY” (CCTI-B)	7
2.2.1. Equipos de generación	7
2.2.1.1. Generador a diésel	7

2.2.2.	Sistemas de almacenamiento	8
2.2.2.1.	Baterías de Ion-Litio	8
2.2.3.	Sistemas de consumo	8
2.2.3.1.	Carga programable	9
2.2.3.2.	Estación de carga de vehículos eléctricos	10
2.2.3.3.	Vehículo eléctrico	11
2.2.4.	Sistema de monitoreo y control	11
2.3.	Vehículo eléctrico	12
2.3.1.	Tipos de vehículos eléctricos	12
2.3.2.	Funcionamiento del vehículo eléctrico	13
2.3.2.1.	Baterías	14
2.3.2.2.	Convertidor de potencia	15
2.3.2.3.	Motor eléctrico	15
2.3.2.4.	Propulsión eléctrica	15
2.3.2.5.	On-Board Charger (OBC)	15
2.3.3.	Estación de carga	16
2.3.3.1.	Niveles de carga	16
2.3.3.2.	Modos de carga	16
2.3.3.3.	Estándares de carga	17
2.3.4.	Marcas y modelos en Ecuador	19
2.4.	Movilidad eléctrica	19
2.4.1.	Parque automotor del Ecuador	19
2.4.1.1.	Movilidad eléctrica en Ecuador	21
2.4.2.	Ventajas económicas	21
2.5.	Desarrollo sostenible	21
2.5.1.	Matriz energética en el Ecuador	21
2.5.1.1.	Generación eléctrica	22
2.5.1.2.	Capacidad de las energías renovables	23
3.	Diseño e Implementación del algoritmo para la regulación de frecuencia mediante la gestión de demanda	24
3.1.	Estudio de la estación de carga de vehículos eléctricos bajo el estándar SAE j1772	24
3.1.1.	Estación de carga lenta	25
3.1.1.1.	Comunicación entre la estación de carga y el vehículo eléctrico	25
3.1.1.2.	Controlador del EVSE	27
3.1.1.3.	Conector del EVSE	27
3.1.1.4.	Señal piloto	27
3.1.1.5.	Puerto de proximidad	29
3.2.	Regulación Primaria de Frecuencia	29
3.2.1.	Algoritmo de censado de frecuencia	31
3.2.1.1.	Fast Fourier Transform (FFT)	32
3.2.1.2.	Arduino Due	32
3.2.1.3.	Pantalla LCD	34
3.2.1.4.	Módulo RTC DS1307	34

3.2.1.5.	Módulo microSD	35
3.2.2.	Modificación del ciclo de trabajo de la Señal Piloto	35
3.2.2.1.	Ciclo de trabajo	36
3.2.2.2.	Comunicación UART Arduino Due-Pic 18F4550	37
3.3.	Diagrama del control primario de frecuencia-potencia	38
4.	Estudio dinámico del proceso de carga lenta bajo el estándar SAE j1772 en vehículos eléctricos	40
4.1.	Caracterización del comportamiento dinámico del generador síncrono a diésel	40
4.1.1.	Escenario 1	40
4.1.2.	Escenario 2	42
4.2.	Caracterización del comportamiento del vehículo eléctrico durante el proceso de carga lenta	46
4.2.1.	Kia Soul	48
4.2.2.	BYD e5	50
5.	Pruebas y Resultados	52
5.1.	Programas y Equipos de medición	52
5.1.1.	Programas de simulación y programación	52
5.1.1.1.	Matlab	52
5.1.1.2.	Fritzing	53
5.1.1.3.	Arduino IDE	53
5.1.1.4.	MikroC	53
5.1.2.	Equipos de medición	54
5.1.2.1.	Osciloscopio	54
5.1.2.2.	Analizador de calidad de energía	54
5.1.2.3.	Generador de funciones	55
5.2.	Pruebas de funcionamiento	56
5.2.1.	Algoritmo de regulación de frecuencia	56
5.2.1.1.	Acondicionamiento de la señal de entrada	56
5.2.1.2.	Medición de frecuencia	58
5.2.1.3.	Cambio del ciclo de servicio	59
5.3.	Evaluación del funcionamiento del algoritmo de gestión de demanda en el proceso de carga lenta de electric vehicle (EV) s	60
5.3.1.	Prueba 1	61
5.3.2.	Prueba 2	63
6.	Conclusiones y Recomendaciones	67
6.1.	Conclusiones	67
6.2.	Recomendaciones	68
6.3.	Trabajos futuros	68
A.	Especificaciones técnicas de los componentes	69

B. Algoritmo de control primario de frecuencia-potencia	72
B.1. Código para la medición de frecuencia de la red y control de potencia de consumo del vehículo eléctrico	72
B.2. Código para la comunicación UART con la estación de carga	78
B.3. Estación de carga inteligente	80
Bibliografía	81



Índice de figuras

2.1. Esquema de una microrred eléctrica	6
2.2. Generador a diésel / grupo de electrógeno a diésel	8
2.3. Banco de baterías de Ion-Litio	9
2.4. Carga resistiva trifásica programable	9
2.5. Estación de carga	10
2.6. Captura de pantalla del Sistema SCADA	11
2.7. Características de los diferentes tipos de vehículos eléctricos	12
2.8. Componentes de un vehículo eléctrico	14
2.9. Modos de carga de los vehículos eléctricos	17
2.10. Distribución de pines de los diferentes estándares de carga de los vehículos eléctricos	17
2.11. Vehículos matriculados en Ecuador año 2018	19
2.12. Número de vehículos vendidos en el Ecuador	20
2.13. Producción de energía eléctrica en el Ecuador	22
2.14. Consumo de energía eléctrica en el Ecuador	22
3.1. Modo de carga en AC y CC	25
3.2. Diagrama de bloques de la estación de carga, estándar SAE j1772	26
3.3. Circuito de señalización del estándar SAE J1772	27
3.4. Conector del EVSE Tipo 1 SAE j1772	28
3.5. Control de frecuencia	29
3.6. Tiempo vs frecuencia después de una perturbación en la red causada por una caída en la frecuencia	30
3.7. Funcionamiento del algoritmo FFT para la medición de frecuencia	33
3.8. Microcontrolador Arduino Due	33
3.9. Distribución de pines de una LCD	34
3.10. Distribución de pines del módulo RTC DS1307	35
3.11. Distribución de pines del módulo MicroSD	36
3.12. Señal PWM de la comunicación del piloto	36
3.13. Corriente respecto al ciclo de trabajo para el EV Kia Soul	37
3.14. Potencia respecto al ciclo de trabajo para el EV Kia Soul	38
3.15. Diagrama de flujo del algoritmo de control de frecuencia-potencia implementado	39
3.16. Diagrama del circuito de control de frecuencia-potencia implementado	39
4.1. Esquema de conexión de los equipos	41

4.2. Diagrama de conexión: generador + carga programable	41
4.3. Potencia consumida por la carga programable (SCADA) y blackout del Generador (fluke)	42
4.4. Frecuencia del generador a diésel (SCADA) y estación de carga (fluke) en el proceso blackout	43
4.5. Diagrama de conexión: generador + carga programable + estación de carga EV	43
4.6. Potencia consumida por la carga programable (SCADA) y la estación de carga (fluke)	44
4.7. Potencia total consumida durante la prueba 2	44
4.8. Corriente de la estación de carga nivel 2 (Fluke)	45
4.9. Frecuencia de la estación de carga 2 (fluke)	45
4.10. Vehículo eléctrico modelo Kia Soul	46
4.11. Vehículo eléctrico modelo BYD e5	47
4.12. Corriente consumida por el EV Kia Soul (Osciloscopio)	48
4.13. Tiempo de respuesta del EV Kia Soul frente a cambios en el ciclo de trabajo	49
4.14. Frecuencia del EV Kia Soul con ciclo de trabajo de 50 % y 30 % respectivamente	49
4.15. Corriente consumida por el EV BYD e5	50
4.16. Tiempo de respuesta del EV BYD e5 frente a cambios en el ciclo de trabajo	50
4.17. Frecuencia del EV BYD e5 con ciclo de trabajo de 50 % y 30 % respectivamente	51
5.1. Software Matlab	52
5.2. Software Fritzing	53
5.3. Software Arduino IDE	53
5.4. Software MikroC PRO for PIC	54
5.5. Osciloscopio digital marca tektronix modelo DPO4104	54
5.6. Analizador de calidad de energía	55
5.7. Generador de funciones marca ROHDE&SCHWARZ modelo HMF2525	55
5.8. Voltaje de entrada al circuito medidor de frecuencia	56
5.9. Circuito divisor de tensión	57
5.10. Circuito sumador no inversor	57
5.11. Señal que ingresa al puerto analógico del Arduino Due	58
5.12. Medición de frecuencia mediante la FFT	59
5.13. Funcionamiento del algoritmo FFT para el cambio de ciclo de servicio	59
5.14. Diagrama de configuración empleado para las pruebas experimentales	60
5.15. Diagrama de conexión: inversor + estación de carga EV	60
5.16. Variaciones de frecuencia en el inversor y de potencia entregada al vehículo eléctrico durante la prueba 1 (SCADA)	61
5.17. Variaciones de frecuencia y de potencia de consumo del EV durante la prueba 1 (AEMC 8333)	62
5.18. Tiempo de respuesta del algoritmo de control primario de frecuencia-potencia implementado	63
5.19. Variaciones de frecuencia en el inversor y potencia entregada al vehículo eléctrico durante la prueba 2 (SCADA)	63
5.20. Variaciones de frecuencia y potencia de consumo del EV durante la prueba 2 (AEMC)	64
5.21. Variaciones de frecuencia medidas por el algoritmo de control de frecuencia y cambios del ciclo de trabajo durante la prueba 2	65
5.22. Relación potencia-frecuencia	65

A.1. Diagrama esquemático del Arduino Due [1]	69
A.2. Especificaciones técnicas del amplificador operacional LM358 [2]	70
A.3. Especificaciones técnicas del PIC 18F4550 [3]	71
B.1. Integración del circuito de control de frecuencia-potencia a la estación de carga lenta .	80



Índice de tablas

2.1. Características técnicas del generador a diésel.	8
2.2. Características técnicas del banco de cargas programable	10
2.3. Resumen comparativo de los tipos de conectores o estándares de carga	18
3.1. Estados de comunicación entre la estación de carga y el vehículo eléctrico	28
3.2. Valores de corriente de acuerdo al ciclo de trabajo	28
3.3. Estados del puerto de proximidad	29
3.4. Relación frecuencia-ciclo de trabajo	37
4.1. Resumen comparativo de los vehículos eléctricos Kia Soul y BYD e5	47
5.1. Relación frecuencia-reducción de potencia	66



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Erika Lisbeth Maldonado Pineda, autor de la tesis “Control de frecuencia mediante gestión de demanda durante el proceso de carga lenta en vehículos eléctricos”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de junio de 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'E' followed by the name 'Lisbeth Maldonado Pineda'.

Erika Lisbeth Maldonado Pineda

070507355-9



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Erika Lisbeth Maldonado Pineda en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Control de frecuencia mediante gestión de demanda durante el proceso de carga lenta en vehículos eléctricos”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de junio de 2020

Erika Lisbeth Maldonado Pineda

070507355-9



Certifico

Que el presente proyecto de tesis: Control de frecuencia mediante gestión de demanda durante el proceso de carga lenta en vehículos eléctricos, fue dirigido y revisado por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Luis Gerardo González Morales", written over a horizontal line.

Ing. Luis Gerardo González Morales, PhD
Director



Dedicatoria

A mis Padres.

A mi mami por ser la luz que ilumina mi vida. Por todos sus consejos, por su apoyo incondicional, por todo el esfuerzo realizado para convertirme en la persona que soy, por amarme ante todo y ser el mejor ejemplo. Todo lo que logro es por ti y para ti, aunque muy poco te lo digo pero Te Amo y estoy orgullosa de ser tu hija.

A mi papi por darme la vida y ser mi mayor inspiración siempre, sé que desde el cielo estás orgulloso de mí por alcanzar todo lo que me propongo. Gracias por ser mi ángel de la guarda.

A Jonnathan.

Por acompañarme durante todos estos años, por ser mi amigo y por los buenos momentos vividos. Gracias por enseñarme que no necesito de nadie para alcanzar mis metas.

A mi familia.

Por las palabras de aliento, por todo el cariño y apoyo siempre, en especial a mi ñaña Gloria y mis abuelos Bertha y Secundino que con sus sabios consejos me han ayudado a formarme como persona y por inspirarme a ser mejor cada día.

Con amor Erika



Agradecimientos

A Dios por cuidarme siempre y escuchar mis plegarias. Por llenarme de bendiciones, por darme paz, serenidad y fortaleza cuando siento que no puedo más. Gracias por darme siempre las mejores lecciones de vida.

A mi familia por el apoyo incondicional durante mi vida estudiantil, por las palabras de aliento para no rendirme jamás, por el cariño infinito y por ser lo mejor que tengo.

A mis profesores que han sido los responsables de mi formación académica, por impartirme sus conocimientos y brindarme su amistad, especialmente al PhD. Luis González por el apoyo constante durante la realización de este trabajo de titulación.

A mis amigos por sostenerme siempre y estar junto a mi en los mejores y peores momentos de mi vida. Un agradecimiento muy especial a Darío y Valeria por su apoyo incondicional, por haber estado ahí cuando más necesité un abrazo y palabras de aliento. Gracias amigos por limpiar mis lágrimas y no dejarme caer.

Mi gratitud siempre



Abreviaciones y Acrónimos

- AEADE** Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. 21
- ARCONEL** Agencia de Regulación y Control de Electricidad. 23
- AVR** regulador de voltaje automatico. 7
- BEV** Battery electric vehicle. 13
- CA** corriente alterna. 15, 17, 24, 25
- CC** corriente continua. 15–17, 24, 25
- CCS** Combined Charging System. 18, 68
- CCTI-B** CENTRO CIENTIFICO, TECNOLOGICO Y DE INVESTIGACION “BALZAY”. 3, 7
- CONELC** Consejo Nacional de Electricidad. 42, 67
- EREV** Extended range electric vehicle. 13
- EV** electric vehicle. 1–3, 12–16, 18–20, 23–27, 31, 34, 36, 38, 44, 47–51, 54, 58, 60–62
- EVSE** electric vehicle supply equipment. 24–27, 29, 37, 38
- FCEV** Fuel-cell electric vehicle. 13
- FFT** Fast Fourier Transform. 31–33, 36, 38, 57, 58
- HEV** Hybrid electric vehicle. 12, 20
- HMI** interfaz hombre máquina. 11
- I2C** Inter-Integrated Circuit. 35
- MCI** motor de combustión interna. 12, 13
- OBC** On-Board charger. 15, 16, 24, 25, 28, 37
- PCC** punto de acoplamiento común. 44
- PCDEE** Programa de Canje de la Deuda Externa entre Ecuador y España. 7
- PFC** corrección del factor de potencia. 15
- PHEV** Plug-in hybrid electric vehicle. 13
- PLANEE** Plan Nacional de Eficiencia Energética. 3, 4
- PLL** Phase Locked Loop. 32
- PWM** pulse wide modulation. 26–28, 34–38, 48, 50, 59, 61, 62, 64
- RPF** regulación primaria de frecuencia. 31
- SCADA** Supervisory Control and Data Acquisition. 7, 8, 11, 40–42, 44

SEP sistema eléctrico de potencia. [2](#), [5–7](#)
SMC sistema de motor de combustión. [19](#)
SME sistema de motor eléctrico. [19](#)
SNI Sistema Nacional Interconectado. [2](#), [29](#)
SPI Serial Peripheral Interface. [35](#)

UART Universally Asynchronous Receiver/Transmitter. [37](#), [38](#)

ZCD Zero Crossing Detector. [31](#)



Introducción

Este capítulo presenta la introducción, descripción del problema, objetivos, antecedentes y alcance del presente trabajo.

1.1. Introducción

El descubrimiento de la energía eléctrica transformó la sociedad, pues su uso ha permitido mejorar la calidad de vida de las personas. La energía eléctrica se considera uno de los principales agentes para el desarrollo de un país pues está presente en casi todas las actividades humanas, así como en la industria, telecomunicaciones, transporte, etc. Y en la actualidad puede ser considerada como un recurso renovable, ya que puede ser generada a partir de diferentes fuentes, tales como: hídrica, eólica, solar, etc. [4]. Sin embargo, la dependencia de las condiciones climáticas para la generación de energía limpia trae consigo un desequilibrio entre la oferta y la demanda en un sistema de energía, debido a que el suministro de energía eléctrica no puede ser alimentado constantemente [5] [6].

Los vehículos son el medio de transporte más utilizado alrededor del mundo pues se considera una necesidad más no un lujo de unos cuantos, pero su uso trae consigo impactos ambientales graves por su dependencia de combustibles fósiles y la contaminación que esto provoca. En los últimos años el vehículo eléctrico ha tenido gran aceptación en el mercado mundial, ya que existe un sinnúmero de factores que contribuyen al aumento de su demanda, entre los que se encuentran el aumento de la autonomía, mayor número de marcas y modelos disponibles en el mercado e incentivos por parte de algunos gobiernos para promover su uso [7]. Los EVs surgieron como una solución ante el problema de la contaminación ambiental, ocasionada por los gases de efecto invernadero que producen los vehículos que usan derivados del petróleo como fuente de combustible. El petróleo es un recurso no renovable, el cual será escaso en un futuro, dónde se deberá considerar el uso de fuentes de energía limpia y renovable, que junto a los EVs formarán parte de una alternativa de transporte ante la escasez de combustibles fósiles.

Los vehículos eléctricos, juegan un papel fundamental en el tratamiento de combustibles fósiles y

reducción de emisiones de carbono, ya que beneficia a climas locales y a nivel global. La integración a gran escala de estos vehículos plantea un desafío interesante para la operación y control del sistema de potencia, pues la carga desordenada a gran escala puede agravar el nivel de carga máxima, aumentar la carga de energía y alterar la seguridad de la operación del [Sistema Nacional Interconectado \(SNI\)](#) [8] [9] [10]. Por esta razón se propone un algoritmo para el control de carga, para regular los efectos de generación/demanda ante la integración de un gran número de unidades consumidoras con la implementación de estaciones de carga de carga lenta con cierto grado de inteligencia. Con ello se espera aumentar la eficiencia, eliminar sobrecargas, controlar y optimizar el consumo, reducir las emisiones de CO₂, equilibrar la generación y demanda, e incluir el uso del vehículo eléctrico en el país.

1.2. Descripción del problema

La calidad y la estabilidad de las redes eléctricas juegan un papel importante si se considera un incremento considerable en la demanda por parte de [EVs](#) conectados a la red del [SNI](#), los [SEPs](#) deberán estar preparados para incluir un gran número de estaciones de carga en un futuro, así como las grandes estaciones de carga denominadas electrolineras. Para esto es importante que exista un control inteligente en cada una de las estaciones de carga con el fin de no saturar la red eléctrica en caso de que la demanda alcance picos considerables dentro del sistema lo que ocasionaría un desbalance con respecto a la generación, ocasionando variaciones de frecuencia. Considerando este problema se propone un algoritmo para contribuir a la regulación de frecuencia ante la masificación de las estaciones de carga de los [EVs](#).

1.3. Alcance

La gestión de demanda de energía por medio de sistemas de control de potencia es el objetivo a mediano y largo plazo para aportar al desarrollo sostenible de la movilidad en el Ecuador que está en proceso de expansión, gracias al cambio de la matriz energética, mediante la cual se ha podido sacar provecho de las fuentes de energía renovables que posee el país gracias a su ubicación geográfica. Para alcanzar este objetivo se pretende desarrollar e implementar un algoritmo que permita controlar la potencia de carga de un vehículo eléctrico, ante variaciones de frecuencia en la red. Para ello es necesario realizar un análisis previo del comportamiento dinámico del vehículo ante variaciones en la frecuencia durante el proceso de carga, para determinar el tiempo de respuesta del mismo, así como los rangos de control a los que debe ejecutar el algoritmo, para que el control se realice dentro del rango de tiempo y frecuencia establecidos para la acción correctiva dentro de los estándares impuestos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Regulación de frecuencia mediante la gestión de demanda en el proceso de carga lenta para mejorar la eficiencia de la estación de carga en horas pico.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el comportamiento de vehículos eléctricos durante el proceso de carga nivel 2 ante variaciones de frecuencia y voltaje.
2. Caracterizar el comportamiento dinámico de vehículos eléctricos ante cambios de consigna en el proceso de carga nivel 2.
3. Desarrollo de un algoritmo de gestión de demanda para el control de frecuencia en la red en el proceso de carga nivel 2 de vehículos eléctricos.
4. Evaluación de un caso de regulación de frecuencia mediante la puesta en marcha de un algoritmo de gestión de demanda en el proceso de carga nivel 2 en vehículos eléctricos.

1.5. Antecedentes

El concepto de Desarrollo Sostenible surgió de las conferencias sobre el desarrollo y el medio ambiente impulsadas por la ONU en 1987. Es aquél desarrollo que capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos de las futuras generaciones. Como consecuencia es una actividad que se puede conservar, que es perdurable en el tiempo.

El vehículo eléctrico como solución al problema de contaminación ambiental y movilidad inteligente ha evolucionado de forma diferente alrededor del mundo, ya que algunos gobiernos han puesto empeño para fomentar su uso. Los países más desarrollados (China, EE.UU, Japón y Noruega) han tenido grandes avances, como referencia los demás países han empezado a seguir sus pasos y Ecuador no se queda atrás. A continuación, se detallan los trabajos más relevantes en el tema de [EV](#):

- **COP21** El Ecuador ha cambiado la matriz energética gracias al compromiso por parte del gobierno en minimizar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera realizado en la COP21 (Paris), integrándose al propósito de limitar el calentamiento global a un máximo de 2°C con respecto a la era preindustrial [11]. Con la introducción al país de vehículos eléctricos se busca disminuir los gases contaminantes producidos por los vehículos a combustión interna.
- **CCTI-B** En Ecuador se dispone del [CCTI-B](#) desde 2012, que brinda grandes prestaciones para realizar investigaciones a escala de microrred, como es el caso del uso de consumo de energía mediante pruebas realizadas con el vehículo eléctrico y su estación de carga para proliferar su uso en el Ecuador, así como mejorar la eficiencia durante el proceso de carga. Esto es un tema importante debido al cambio en la matriz energética gracias a la construcción de grandes centrales hidroeléctricas [12].
- **Cambio de la matriz energética** Gracias al cambio en la matriz energética del país con la construcción de 8 centrales hidroeléctricas que producen 22,105.06 GWh, que junto con la energía eólica que genera 86.71GWh y los 38.12GWh generados por la energía fotovoltaica, el país cuenta con energía eléctrica necesaria para poder suplir la demanda actual, así como para poder introducir el uso de vehículos eléctricos en el Ecuador [13].
- **PLANEE 2016-2035** El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable presentó el Plan Maestro de Electrificación 2016-2025, que considera los objetivos, estrategias y metas para la etapa de generación, transmisión y distribución que guiará las acciones competentes a cada organismo del sector en los próximos años; y el [Plan Nacional de Eficiencia Energética \(PLANEE\) 2016-2035](#), el cual recoge las mejores propuestas aplicables basadas en prácticas internacionales

de uso y aprovechamiento de tecnologías. El [PLANEE](#) prioriza la eficiencia energética como un modelo de crecimiento sostenible respetando el medio ambiente y el progreso de las personas. Entre las normativas propuestas en este plan se encuentra una concerniente a la incorporación de vehículos eléctricos en el Ecuador [\[14\]](#).



Marco teórico y Estado del arte

En este capítulo se presenta el concepto general de microrred, vehículos eléctricos, matriz energética y se describen brevemente algunas de las tecnologías empleadas en la ejecución del presente trabajo de titulación sin ningún orden específico.

2.1. Microrred

El concepto de microrred ha tenido gran apogeo en los últimos años, por ser un sistema eléctrico de media-baja tensión conformado por distintas fuentes de energía en su mayoría provenientes de energías renovables no convencionales (eólico, fotovoltaico, biomasa, etc.), también puede incluir motores de combustión interna y sistemas de almacenamiento [12]. Su capacidad máxima es menor a 10MVA.

Las microrredes se ubican cerca del consumidor con la intención de reducir la distancia física entre la generación y las cargas, disminuir las pérdidas por transmisión y las emisiones de carbono. Están formadas por cargas y fuentes distribuidas que actúan como una única entidad controlable que puede operar de forma aislada o conectada a la red [4], además, la microrred debe ser capaz de desconectarse y reconectarse intencionalmente al [sistema eléctrico de potencia \(SEP\)](#) al que pertenece siempre que cumpla con los límites eléctricos definidos. La Figura 2.1 muestra el esquema de una microrred con elementos de generación, almacenamiento y carga.

Una microrred aislada debe tener diferentes parámetros de estabilidad para proveer la potencia requerida por las cargas en el sistema, siendo los parámetros de voltaje y frecuencia los de mayor relevancia. Para que una microrred forme parte del [SEP](#) debe cumplir con los parámetros establecidos por el estándar ANSI C84.1-2016 que hacen referencia a la sincronización de voltaje, frecuencia y ángulos de fase de los dos sistemas [15].

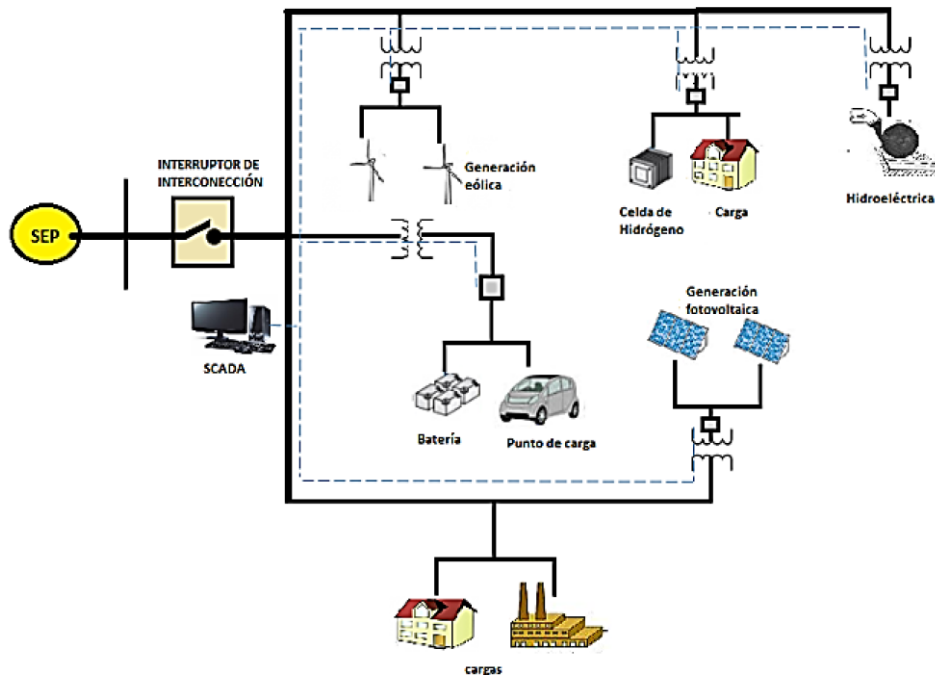


Figura 2.1: Esquema de una microrred eléctrica

2.1.1. Configuraciones de una microrred

El estándar IEEE 1547.4-2011 establece en [15] las diferentes configuraciones para microrredes eléctricas, dependiendo del tipo de conexión y la cantidad de fuentes de generación.

- **Aislamiento local:** formada por varias fuentes de generación y cargas conectadas dentro de las instalaciones de un cliente. Se conecta en paralelo al SEP para evitar futuras desconexiones.
- **Aislamiento secundario:** tiene una o más fuentes y varios clientes conectados en el lado secundario del transformador de distribución.
- **Aislamiento lateral:** configuración formada por varias cargas servidas por un alimentador lateral de la red, y una fuente distribuida que suplente toda la demanda.
- **Aislamiento tipo circuito:** formada por cargas conectadas a un único alimentador. En caso de existir una falla en la microrred, ésta se desconecta por medio de un interruptor de potencia, y las fuentes de generación locales proporcionan la energía necesaria para las cargas.
- **Aislamiento de subestación tipo barraje:** las cargas se encuentran conectadas a una sola barra dentro de la subestación. Las fuentes distribuidas llegan a operar si existe pérdida de un alimentador, transformador o subestación.
- **Aislamiento tipo subestación:** las cargas están conectadas en una única subestación y se utiliza cuando la subestación de distribución o un transformador está fuera de servicio y no es posible suministrar la totalidad de la carga. Además permite aliviar problemas de sobrecarga o sobre voltaje en el transformador.
- **Aislamiento tipo circuito adyacente:** aquí las cargas se encuentran suministradas por una microrred aislada tipo circuito adyacente y es de gran utilidad en caso de que exista pérdida de los alimentadores de la subestación principal.

2.2. CCTI-B

El proyecto CCTI-B, fue propuesto al Programa de Canje de la Deuda Externa entre Ecuador y España (PCDEE) a finales de 2013, pero no fue hasta en enero del 2015 que la Universidad de Cuenca firmó con el Consorcio español-ecuatoriano CE para la ejecución del mismo [12]. El CCTI-B está ubicado en la parroquia San Joaquín en la ciudad de Cuenca y es el primer centro de investigación en el país con estas características. Este laboratorio fue creado con el propósito de incentivar la investigación en el campo de las energías renovables, movilidad eléctrica y microrredes.

El laboratorio de microrredes Balzay se compone básicamente por tres grupos de equipos clasificados por su naturaleza y tecnología en generación, almacenamiento y consumo. El primer grupo cuenta con dos tipos de tecnologías: convencionales (generador a diésel, generador de gas licuado de petróleo) y renovables (turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, turbina hidrocinética). En cuanto a las tecnologías emergentes de los equipos de almacenamiento se cuenta con supercondensadores y baterías. Finalmente hablando del consumo se cuenta con cargas eléctricas programables, cargas resistivas, montacargas y vehículo eléctrico. Todos los equipos pueden configurarse de acuerdo a la aplicación que se desea dar y están relacionados entre sí por medio de buses de corriente alterna y los correspondientes sistemas de control y comunicación.

La microrred del CCTI-B tiene una capacidad nominal de 400kW y su configuración es de tipo local, pues cumple con los criterios detallados en el Capítulo 2.1 [4]. Cuenta además con doble barraje (L1 y L2), siendo la barra L2 una barra auxiliar que permite la operación simultánea de dos formas distintas, esto quiere decir que mientras uno los generadores entrega potencia al SEP, el otro puede estar cargando el vehículo eléctrico.

2.2.1. Equipos de generación

En la ejecución del presente trabajo de titulación se empleó electrógenos con motor de combustión interna.

2.2.1.1. Generador a diésel

Grupo electrógeno a diésel de 40kVA fabricado por Himoina (España) modelo HHW-35T6. Cuenta con un motor de combustión interna acoplado a un generador síncrono que convierte la energía mecánica en energía eléctrica con una eficiencia energética del 40 % aproximadamente, emplea un regulador de voltaje automatico (AVR) para mantener el voltaje de línea constante a 220V [12]. Un generador a diésel puede llegar a tener un alto rango de operación, pero con la desventaja de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

La Figura 2.2 muestra el generador instalado en el laboratorio de Balzay, este equipo produce un voltaje trifásico cuya amplitud y frecuencia están detallados en la Tabla 2.1. El equipo dispone de tanques con capacidad de mil litros para almacenar el diésel, y es capaz de disminuir o aumentar su potencia de salida dependiendo de la velocidad angular [4]. Como se observa el generador tiene la capacidad de aportar 30kW al sistema en todo momento siempre y cuando se disponga de diésel. El control de este equipo se realiza mediante el sistema SCADA del laboratorio mediante el protocolo Modbus TCP/IP.



Figura 2.2: Generador a diésel / grupo de electrógeno a diésel

Tabla 2.1: Características técnicas del generador a diésel.

Características	Tecnología
Voltaje Nominal	220/127 V
Potencia	40kVA
Temperatura	575°C
Generador	Síncrono de 4 polos, 1800 rpm, 3 fases
Conexión	Estrella-serie
Factor de Potencia	0.8

2.2.2. Sistemas de almacenamiento

Dentro de este grupo se cuenta con un conjunto importante de sistemas que pueden interactuar de forma dinámica en labores de carga y descarga de energía entre los diferentes elementos de generación y consumo.

2.2.2.1. Baterías de Ion-Litio

El banco de baterías recargable de Ion-litio de la marca Samsung (Corea) modelo ELPT392-0002, está compuesto por 11 celdas en serie que le permiten alcanzar un voltaje nominal de 642V DC, puede manejar una potencia y energía nominal de 88 kW y 44 kWh, respectivamente. Este banco de baterías es manejado por un convertidor de potencia bidireccional de 2 niveles, faculta la gestión de carga y descarga a cualquiera de las barras de la microrred, además permite gestionar la energía en la batería mediante comunicación Ethernet al sistema SCADA. [12]. En la Figura 2.3 se observa el módulo de baterías Ion-Litio

2.2.3. Sistemas de consumo

Dentro del grupo de sistemas de consumo, se cuenta con elementos que convierten la energía eléctrica en forma de calor, iluminación y energía cinética. Los equipos empleados se detallan a continuación.



Figura 2.3: Banco de baterías de Ion-Litio

2.2.3.1. Carga programable



Figura 2.4: Carga resistiva trifásica programable

El banco de cargas programables trifásicas de última generación es de tipo resistivo con capacidad de 150kW variable con pasos de 5kW es de la marca Avtron modelo LSH150 fabricado por Emerson Network Power (USA). Posee un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura por debajo del límite y prevenir sobrecalentamiento del equipo, en la tabla 2.2 se detallan las características del equipo.

La estructura rígida donde están montados el grupo de resistencias, contactores, motor de arranque, relé de sobrecarga, fusibles y ventilador de enfriamiento está fabricada con una lámina de acero aluminizado de gran espesor para facilitar la movilización del equipo. La carga programable de la Figura 2.4 cuenta además con un panel de control remoto para su operación, así como controles e indicadores de estado (interruptor ON/OFF, luz de control de potencia, botones de soporte del ventilador, luz de falla, interruptor ON/OFF máster, etc) [16]. Esta carga se puede programar mediante el protocolo Modbus para establecer el comportamiento de la microrred ante variaciones de carga [12].

Tabla 2.2: Características técnicas del banco de cargas programable

Características	Descripción
Voltaje de operación	240/480VAC
Frecuencia	60Hz
Capacidad máxima de la carga	150kW
Resolución	5kW
Corriente	360A por fase
Ventilación	6000cfm
Temperatura límite	350°F
Factor de potencia	0.8
Peso	225kg

2.2.3.2. Estación de carga de vehículos eléctricos



Figura 2.5: Estación de carga

Para estudios de carga se dispone de una estación de carga lenta monofásica de 120V a 16A que

corresponde al modo 3 del estándar IEC 62196 y cuenta con conector tipo 1 correspondiente al estándar SAE j1772 [12] (Figura 2.5).

2.2.3.3. Vehículo eléctrico

El CCTI-B cuenta con un vehículo eléctrico modelo Soul Electric del fabricante KIA (Corea) empleado para estudios de movilidad sustentable. La cantidad de energía necesaria para la recargas las baterías, así como el tiempo de duración de carga dependen del tipo de vehículo y el nivel de carga inicial del mismo. Sobre este tema de hablará en el transcurso del presente trabajo de titulación.

2.2.4. Sistema de monitoreo y control

El sistema de supervisión, control y adquisición de datos, del inglés **Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)**, está instalado en un conjunto de servidores modelo Lenovo X3550M5, cuenta con una interfaz manejada por Labview. Dicho sistema emplea una topología de anillo mediante fibra óptica para comunicar los dispositivos HMI asociados a cada componente del laboratorio. Estos HMI además de permitir el control de bajo nivel de cada componente, permiten la comunicación entre el sistema de control de alto nivel y los convertidores de potencias a través del protocolo Modbus TCP [12].

La principal ventaja del sistema SCADA es la fácil configuración tanto de hardware como de software. El tablero principal del sistema dispone de un doble embarrado como se observa en la Figura 2.6.

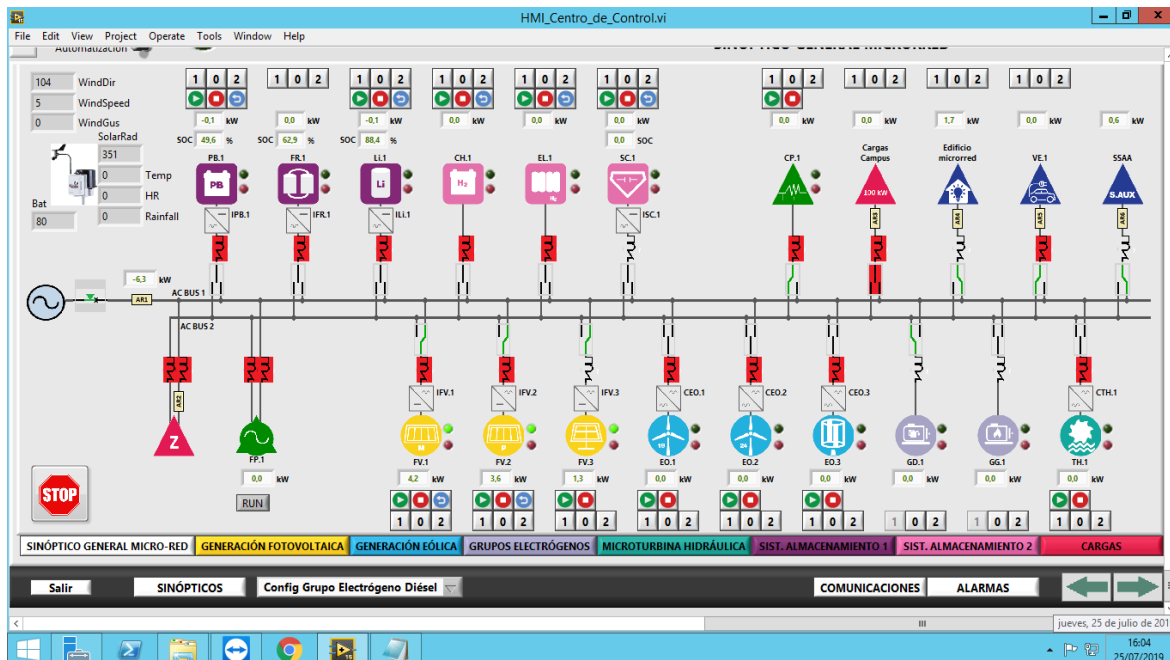


Figura 2.6: Captura de pantalla del Sistema SCADA

Este sistema permitió realizar la conexión, calibración y desconexión de los equipos empleados durante los procesos de prueba, así como capturar la información necesaria para realizar cálculos y obtener los resultados esenciales para la ejecución del presente trabajo de titulación, estos datos además

se compararon con los datos recolectados por los diferentes equipos de medición empleados. Esto se detallará en el Capítulo 4.

2.3. Vehículo eléctrico

Su origen se remonta al inicio del siglo XIX, cuando el “Tilbury” impulsado por un banco de baterías recorrió unos pocos metros antes de incendiarse, pero los esfuerzos no quedaron ahí ya que después el descapotable “La Jamáis Contente” rompería el récord de velocidad en tierra con sus 105,88Km/h, luego vino la producción en masa del famoso “Detroit Electric Car”. Pero esta evolución fue relegada por el motor de combustión interna, debido al bajo costo de la gasolina, velocidad y potencia superiores brindadas por este tipo de motor [7] [17]. Los gobiernos y fabricantes de vehículos luchan por ubicar al EV como la nueva opción de movilidad e inclusive, la sociedad siendo testigo del cambio climático, busca y exige alternativas en transporte que sean amigables con el medio ambiente.

El vehículo eléctrico del inglés EV, es un equipo que consume electricidad y en el caso del vehículo híbrido también combustibles fósiles, donde las baterías de ion-litio son los sistemas de almacenamiento predominantes por ser compactas y eficientes [4]. Entre sus principales características están cero emisiones de CO₂ ya que emplea energías renovables, motor eléctrico con gran aceleración, funcionamiento silencioso, disminuyendo así la contaminación acústica, y alta eficiencia, pues convierte del 62 % al 75 % de la electricidad en energía mecánica.

También presenta algunas desventajas por ser una tecnología que apenas está incursionando, como son: potencia limitada, escasos puntos de recarga, costo elevado al reemplazar las baterías, muy poca presencia de talleres de reparación y contaminación generada para su fabricación.

2.3.1. Tipos de vehículos eléctricos

Los EVs se clasifican en cinco tipos, tal como se indica en la Figura 2.7. A continuación de enumeran algunas características de cada uno de ellos [11], [7].

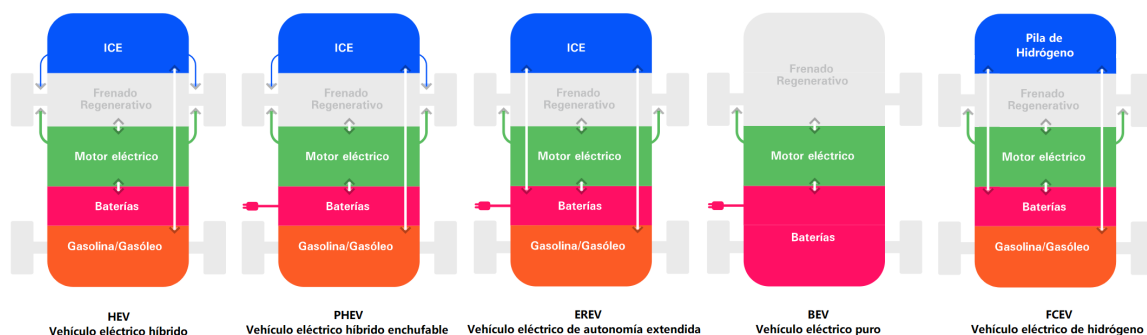


Figura 2.7: Características de los diferentes tipos de vehículos eléctricos

- **Hybrid electric vehicle (HEV):** Posee dos métodos de propulsión, un **motor de combustión interna (MCI)** para cargar la batería, al igual que un generador de energía eléctrica movido por el motor térmico, cuya corriente pasa por el inversor y luego a los motores eléctricos para mover el vehículo. Además, posee frenos regenerativos que aprovechan la energía producida al frenar, pero no usa

una fuente externa para cargar las baterías.

El Toyota Prius 2010, Audi A8 y BMW Active Hybrid 3 pertenecen a esta tipología. Estos vehículos reducen el consumo de gasolina y costo de mantenimiento, pero produce emisiones, posee poca autonomía y además las baterías empleadas son tóxicas.

- **Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)**: El vehículo híbrido enchufable combina un motor de combustión interna y un motor eléctrico, posee un motor térmico, un enchufe que se conecta a una toma para cargar las baterías y freno regenerativo, permitiendo al motor eléctrico funcionar como generador por un pequeño lapso de tiempo, de esa manera recarga las baterías del vehículo. El motor térmico puede mover el vehículo en determinado tiempo y también permite cargar las baterías.

Entre los vehículos populares de este tipo se encuentran: Audi A3, BMW i8, Mercedes Benz Clase S 500, Mitsubishi i-MiEV y Toyota Prius. Estos vehículos viajan a velocidades entre 5-80 Km/h con **MCI** y aunque produce emisiones éstas son mínimas, presenta la ventaja de poseer 2 fuentes para cargar la batería, reduciendo así el costo de combustible.

- **Battery electric vehicle (BEV)**: Conocidos como vehículos eléctricos puros funcionan con energía eléctrica y poseen motores eléctricos de corriente alterna de alta eficiencia. Este vehículo posee un enchufe que se conecta a la toma de 110V o 220V de una casa o electrolinera para cargar las baterías. Además, cuenta con freno regenerativo que evita que la energía se desperdicie al frenar. En este grupo se encuentran el Tesla S, Nissan Leaf, Kia Soul, BYD E6 y Mercedes Benz. Entre las desventajas de este tipo de vehículos es que brindan autonomía menor o igual a 200Km a excepción del Tesla (500Km) y el costo elevado de los vehículos. Por otro lado, no emiten gases contaminantes y posee un costo de mantenimiento reducido.

- **Extended range electric vehicle (EREV)**: Los vehículos eléctricos de autonomía extendida poseen características similares al vehículo eléctrico de baterías, pero con **MCI** para cargar la batería, pues es el motor eléctrico el que mueve el vehículo. Posee además un enchufe que se conecta a una toma para cargar la batería. Cuando la batería tiene suficiente carga el motor de gasolina se encuentra parado y el vehículo se mueve sin emisiones, y cuando la batería requiere energía se pone en marcha el motor de combustión para recargarla y mover el motor eléctrico.

A esta tipología pertenecen los modelos BMW i3 y Chevrolet Volt. Entre sus ventajas están autonomía de 450 a 500 Km y la reducción de emisiones y consumo de combustibles fósiles, pero tiene la desventaja del alto costo de la batería.

- **Fuel-cell electric vehicle (FCEV)**: Los vehículos movidos por pila de combustible de hidrógeno, combinan un depósito de combustible con una batería de iones de litio y una pila de hidrógeno. La pila de hidrógeno produce energía eléctrica separando el electrón y el protón del hidrógeno mediante una reacción química producida en su interior.

El Hyundai IX35 FCEV y el Honda FCX CLARITY son ejemplos de este grupo. Este vehículo brinda al usuario una autonomía de 460Km y permite alcanzar velocidades de 160Km/h.

2.3.2. Funcionamiento del vehículo eléctrico

La energía almacenada en las baterías fluye hacia el motor eléctrico. En el motor los campos giratorios son repelidos y atraídos constantemente por los campos estáticos, y dicha rotación produce el movimiento de las ruedas. Además, mediante el uso del freno regenerativo se aprovecha la energía generada al frenar el **EV** para recargar las baterías [11], [7] [17]. A continuación, se detallan las partes

que intervienen en el funcionamiento del vehículo eléctrico, las cuales se observan en la Figura 2.8.

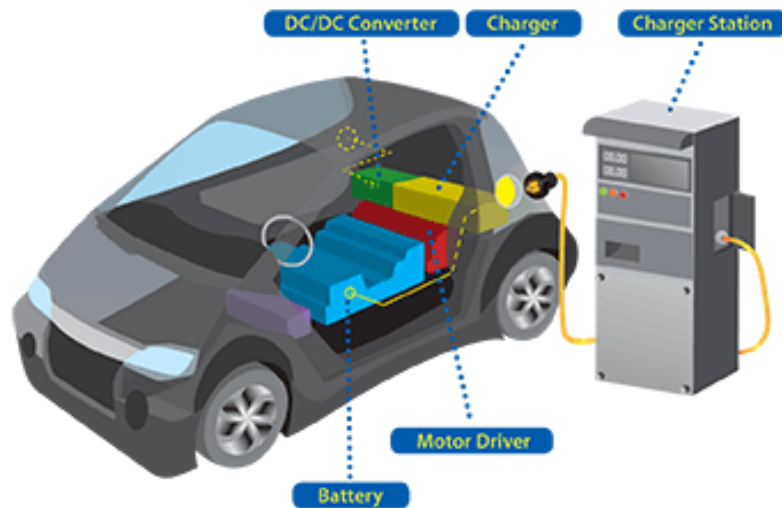


Figura 2.8: Componentes de un vehículo eléctrico

2.3.2.1. Baterías

Las baterías almacenan energía mediante procesos electroquímicos con una eficiencia cercana al 100 %. La principal desventaja es su ciclo de vida, por otra parte, son de mantenimiento simple, pueden ser recicladas y al ser desechadas no contaminan el ambiente, y entregan una autonomía de hasta 500Km. Hay de varios materiales o combinaciones [17] [18], entre las que destacan:

- **Ion-Litio (Li-ion):** son las más recientes, presentan alta eficiencia, no poseen efecto memoria y no necesitan mantenimiento además de ser fáciles de reciclar. Son de tamaño reducido, pero su desventaja es el alto costo de producción.
- **Plomo ácido (Pb-Acid):** la mas antigua y más utilizada. Su bajo costo las hacen ideales para vehículos pequeños pero su excesivo peso, toxicidad y lenta recarga le restan participación en EVs.
- **Níquel-Cadmio (Ni-Cd):** tienen gran rendimiento a bajas temperaturas, pero su costo no la hacen la mejor solución. Poseen efecto memoria pero su capacidad es reducida.
- **Níquel-Hidruro metálico (NI-HM):** similares a las de Ni-Cd pero con reducido efecto memoria, pero generan demasiado calor y se recargan lentamente.
- **Sodio-Sulfuro (Na-S):** llamadas de sal fundida, trabajan a 250°C. Tienen el mejor ciclo de vida de todas, pero ocupan mucho espacio y presentan baja potencia

Siendo las baterías de Ion-Litio las más eficientes y con mayor ciclo de vida. Las baterías suelen ocupar un espacio grande dentro del vehículo y constituyen un peso importante ya que se necesitan un gran número de las mismas para generar la potencia suficiente para mover un vehículo eléctrico y brindarle una autonomía considerable [7].

En otras palabras, las baterías se consideran parte esencial del EV ya que el desempeño y el precio del mismo está condicionado principalmente por la batería, y su costo representa un gran limitante para la comercialización, se está trabajando en la reducción costos.

2.3.2.2. Convertidor de potencia

Su funcionamiento es sencillo, recibe las señales de control y la lectura de los sensores asociados al sistema. Es el encargado de tomar la energía y enviarla al motor según el algoritmo de control que éste utilice, es decir, convierte la corriente continua en corriente alterna para el motor eléctrico. El flujo de potencia puede ser bi-direccional debido al uso del freno regenerativo, el cual recupera la energía cinética producida al frenar convirtiéndola en energía eléctrica.

2.3.2.3. Motor eléctrico

El motor eléctrico es el responsable de la propulsión del vehículo eléctrico y puede ser de cuatro tipos:

- **Motor asíncrono de inducción CA:** el rotor no va a la misma velocidad que el campo magnético producido por el estator. Este motor es de bajo costo, bajo ruido, pocas vibraciones y de alta eficiencia, por estas características es muy utilizado.
- **Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM):** su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red que alimenta el motor. Este motor permite ser integrado directamente en la rueda del vehículo y brinda gran aceleración ya que es capaz de manejar mayor potencia. Su elevado costo representa un inconveniente, pero su vida útil es su mayor ventaja.
- **Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable CA:** la corriente es conmutada por bobinas que crean un campo magnético giratorio. Su costo es reducido y presenta robustez.
- **Motor sin escobillas de imanes permanentes CC:** son los más utilizados en EV, emplean imanes permanentes localizados en el rotor que son alimentados por el estator. Presentan un costo elevado y potencia reducida, pero son muy robustos, no generan ruido y no necesitan mantenimiento.

2.3.2.4. Propulsión eléctrica

El sistema de propulsión eléctrica consta de dos partes: una parte mecánica (transmisión y ruedas) y una eléctrica (motor eléctrico, convertidor de potencia y controladores). Es el punto intermedio entre las baterías y las llantas del automóvil, es la encargada de tomar la energía almacenada en las baterías y convertirla en energía rotacional para mover el vehículo.

2.3.2.5. On-Board Charger (OBC)

El cargador a bordo **On-Board charger (OBC)** realiza varias tareas entre las que se destacan: la **corrección del factor de potencia (PFC)** en la fuente de alimentación, convertir la corriente alterna de 50/60Hz a corriente continua, ajustar la tensión **CC** a los niveles requeridos por la batería, proporcionar aislamiento galvánico y control del motor para evitar daños por arcos producidos al desenchufar en caliente [19]. En otras palabras, tiene la capacidad de adaptarse para funcionar bajo distintas condiciones de voltaje, frecuencia y corriente [7]. La tendencia a largo plazo apunta hacia la bi-direccionalidad, donde el **OBC** tenga la posibilidad de aportar energía del automóvil a la red inteligente.

Una estación de carga de **CC** tiene las mismas propiedades que un **OBC**, excepto que la etapa **PFC** de **CA / CC** y la etapa de conversión **CC / CC** aislada están integradas en la estación. La salida de

CC evita el empleo de OBC y se alimenta directamente a la batería, lo que permite que el sistema logre tiempos de carga significativamente más rápidos.

2.3.3. Estación de carga

Se conoce con este nombre a las estaciones de recarga de vehículos eléctricos o híbridos. El despliegue de las mismas debe centrarse en lugares claves como parqueaderos, centros comerciales, parques, hogares, etc. De igual manera su operación debe ser sencilla [7].

2.3.3.1. Niveles de carga

Los niveles de carga están definidos por el estándar internacional para sistemas de carga de EVs IEC 61851-1 [20]. Estos establecen las configuraciones en las que se puede cargar el EV en relación a la potencia que la estación puede suministrar a las baterías del EV.

- **Carga súper lenta:** se emplea una potencia de 1.2kW y para recargar las baterías de un EV de 24kWh se requiere un tiempo estimado de 12 horas mediante conexiones de 110V. Estas estaciones son utilizadas por motos o cuadriciclos eléctricos.
- **Carga lenta:** es la más utilizada y se puede instalar en lugares públicos y privados. Trabaja con corriente alterna monofásica o bifásica de hasta 240V a una potencia de 6.6kW con ciclos de carga entre 4 a 6 horas para EVs de 27kW.
- **Carga semi-rápida:** trabaja con corriente alterna trifásica y con tiempos de carga estimados de 3 o 4 horas con potencia de recarga entre 22kW a 25kW, por ello solo algunos EVs aceptan este tipo de carga.
- **Carga rápida:** es muy utilizada, permite recargar las baterías en un tiempo de 10 a 30 minutos, dependiendo del tipo de cargador. La potencia demandada por este tipo de sistema varía entre 44 y 50kW, generalmente utilizado en electrolíneas.
- **Carga súper-rápida:** la potencia de recarga se encuentra entre 90 y 120kW, permite recargar las baterías en unos 20 minutos aproximadamente.
- **Carga ultra-rápida:** aún es experimental y su uso se enfoca a buses eléctricos debido a que su potencia de demanda es muy elevada (130 o 150kW) y su tiempo de recarga de 5 a 10 minutos.

2.3.3.2. Modos de carga

Hacen referencia a la capacidad de comunicación existente entre el EV y la red eléctrica a través de la estación de carga. Esta última podrá controlar el proceso de carga, medir el nivel de carga y usar el automóvil como fuente para inyectar energía a la red eléctrica [7]. La norma IEC61851-24 define cuatro modos de carga para EVs [20], detallados en la Figura 2.9.

- **Modo 1:** no existe comunicación entre el EV y la estación de carga, únicamente se tiene un conector convencional usado para iniciar y finalizar el proceso de carga. El tiempo de carga está en función de la capacidad de la batería, su uso se basa principalmente en recarga de bicicletas y cuadriciclos.
- **Modo 2:** nivel de comunicación bajo, pues la comunicación del piloto solo se usa para verificar el estado de conexión del EV, aquí se usa el conector convencional.
- **Modo 3:** nivel de comunicación elevado, la estación de carga usa la señal del piloto para intercambiar información relevante con el EV como: estado de conexión del EV, nivel de corriente

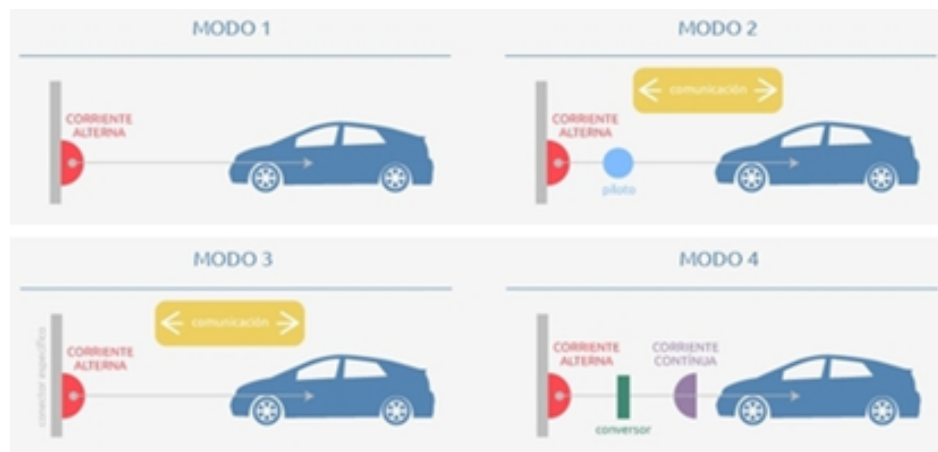


Figura 2.9: Modos de carga de los vehículos eléctricos

que brinda la estación y notificaciones de errores de carga. También emplea sistemas de protección y control para la carga.

- **Modo 4:** nivel de comunicación elevado, solo se aplica a estaciones de carga rápida (electrolineras) ya que se tiene un convertidor de energía CA/CC.

2.3.3.3. Estándares de carga

Los conectores son diseñados para soportar grandes flujos de corriente y brindar seguridad al vehículo y usuario, éstos varían dependiendo de la marca del vehículo, es por esto que existen diferentes estándares para diferentes partes del mundo. La Comisión Electrotécnica Internacional a través de su norma IEC 62196-2 establece los diferentes tipos de conectores existentes [7], los cuales se detallan a continuación.

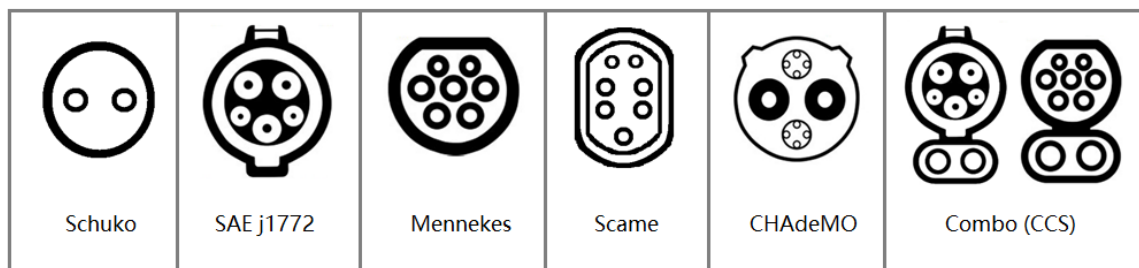


Figura 2.10: Distribución de pines de los diferentes estándares de carga de los vehículos eléctricos

- **Schuko:** estándar europeo para vehículos eléctricos de baja tensión con corrientes monofásicas definido por el estándar CEE 7/4 tipo F. Soporta hasta 16A durante periodos cortos de tiempo y permite los modos de carga 1 y 2. Son enchufes con 3 contactos, dos para polos (fase y neutro) y un contacto para la toma de tierra.
- **Tipo 1 SAE j1772-2009:** conocido como Yazaki, es el estándar norteamericano y japonés para vehículos eléctricos basado en el modo 3 de carga, soporta conexiones de 120 o 240V monofásica y puede suministrar una potencia de hasta 16.8kW. Empleado para niveles de carga

lenta (hasta 16A) o cargan rápida (hasta 80A). Dispone de 5 contactos, 3 típicos de un conector monofásico de baja tensión (fase, neutro y tierra), adicionalmente posee dos contactos destinados a la comunicación entre la estación y el EV (detección de proximidad y de control) y finalmente presenta un dispositivo de bloqueo que impide la desconexión del cargador durante la recarga.

- **Tipo 2 VDE-AR-E 2623-2-2:** conocido con el nombre de Mennekes, este tipo de conector brinda acceso a redes monofásica o trifásica con 100 y 500V y puede suministrar hasta 43.5kW de potencia. Es el estándar alemán para EVs y se puede emplear para carga lenta o rápida. Dispone de 7 contactos, 3 contactos de fase, 1 neutro, 1 toma de tierra y 2 contactos para establecer la comunicación entre la estación y el vehículo.
- **Tipo 3 o Scame:** restringida prácticamente al mercado francés. Tiene 5 o 7 bornes, dependiendo de si es para corriente monofásica o trifásica, la toma tierra y las comunicaciones de red. Admite hasta 32A en carga semi-rápida, pero actualmente se encuentra en desuso.
- **CHAdMO:** conector capaz de realizar recargas rápidas en corriente continua, diseñado para soportar hasta 50kW de potencia y una intensidad de 125A. permite el modo de carga 4 para vehículos japoneses. Tiene diez bornes, toma de tierra y comunicación con la red. Admite hasta 200 A de intensidad de corriente (para recargas ultra-rápidas). Es el de mayor diámetro, tanto el conector como el cable.
- **Conector CCS:** denominado Combo, es un conector combinado compuesto por un conector tipo 1 o 2 y un conector de corriente continua de dos contactos. Generalmente empleado por los vehículos norteamericanos y europeos de carga rápida, aunque admite también carga lenta.

En la Tabla 2.3 se muestra un resumen comparativo de los tipos de conectores antes descritos y su respectiva imagen de la distribución de pines se puede observar en la Figura 2.10. Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se empleará el conector Tipo 1 SAE j1772, pues es el que se dispone en el laboratorio de Balzay para las respectivas pruebas.

Tabla 2.3: Resumen comparativo de los tipos de conectores o estándares de carga

Tipo de conector	Nivel de carga	Modo de carga
Schuko	Lenta Hasta 16A	1 y 2
Tipo 1 SAE j1772	Lenta Hasta 16A Rápida Hasta 80A	3
Tipo 2 Mennekes	Lenta Monofásico hasta 16A Rápida Trifásico hasta 63A	3
Tipo 3 Scame	Semi-rápida Hasta 32A	3
CHAdMO	Ultra-rápida Hasta 200A	3
CCS Combo	Lenta Rápida	4

2.3.4. Marcas y modelos en Ecuador

En el país ya hay 7 modelos de vehículos 100 % eléctricos entre ellos Kia Soul (\$30.990), Renault Twizy (\$14.990), Nissan Leaf (\$36.000), BYD E5 (\$34.900), Toyota COMS (\$18.990) y Green Wheel (\$14.00) [17]. De ellos, dos ya están en etapa de comercialización y los cinco restantes se encuentran en etapa de pruebas.

En 2017 se instaló la primera electrolinera de carga rápida en Loja por parte de la empresa BYD. Como sabemos Ecuador se encuentra en proceso de desarrollo de esta tecnología gracias al apoyo del gobierno al eliminar los aranceles de las importaciones de EVs [21]. Pero aún falta la implementación de electrolineras en todo el país.

El gobierno está invirtiendo en incentivos para que los vehículos eléctricos puedan funcionar en el país [11] [22] [23]:

- No pago del IVA si su valor no supera los USD 35.000.
- Poseen ICE equivalente al 0 % los vehículos 100 % eléctricos.
- Tarifa: 0,08 ctvs el WK/H
- Carga de 22:00 a 04:00 le costará 0.05 ctvs.
- Firmas de convenio con marcas como Nissan, Renault, KIA y BYD.
- Fabricación de partes y piezas para los EVs.

2.4. Movilidad eléctrica

Los vehículos dependiendo de su fuente de energía se los puede clasificar en dos tipos: dependientes e independientes del petróleo. Los vehículos dependientes del petróleo son los que emplean combustibles fósiles y los independientes son aquellos que emplean electricidad. Si hablamos de la tecnología que transforma la fuente de energía se los puede clasificar en aquellos que poseen sistema de motor de combustión (SMC), o sistema de motor eléctrico (SME).

2.4.1. Parque automotor del Ecuador

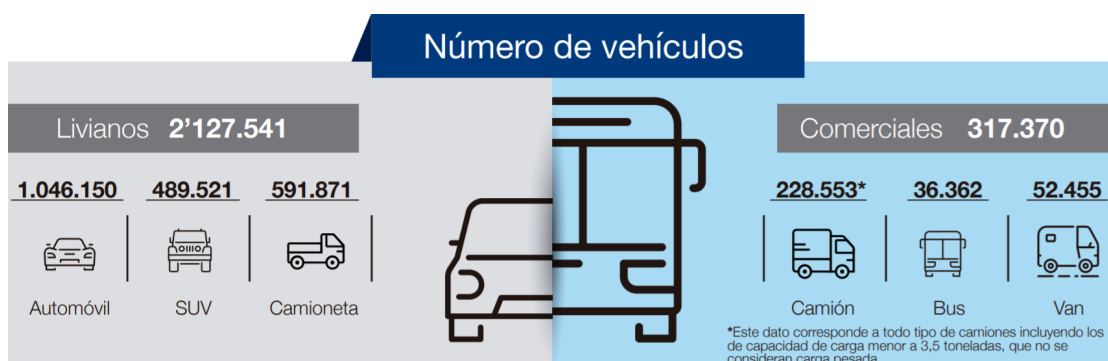


Figura 2.11: Vehículos matriculados en Ecuador año 2018

El número de vehículos matriculados en el año 2018 a nivel nacional fue de 2'444.911, un 7.8 % más que el año anterior. De este total, el 87 % corresponde a vehículos livianos y el 13 % restante corresponde a vehículos comerciales o pesados [24], esto se muestra en la Figura 2.11. Los automóviles

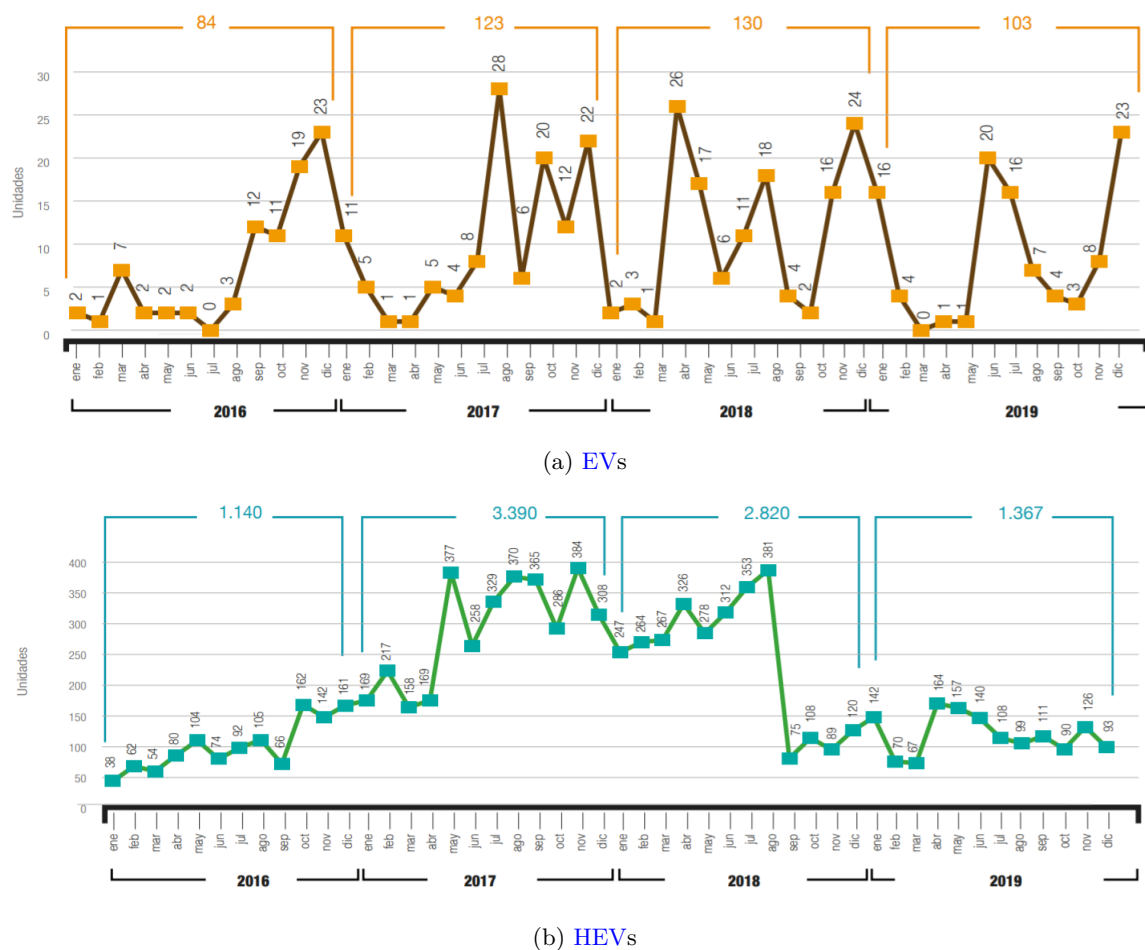


Figura 2.12: Número de vehículos vendidos en el Ecuador

representan la mayor demanda de vehículos en el país llegando a alcanzar casi el 43% del parque automotor.

Pese al crecimiento del parque automotor en el Ecuador, se tiene impactos negativos lo cuales se manifiestan en la situación ambiental de algunas ciudades. Pues debido al incremento de la demanda vehicular y antigüedad de los mismos ha ocasionado un considerable aumento de emisión de gases contaminantes a la atmósfera (dióxido de carbono CO₂, monóxido de carbono CO, óxidos de nitrógeno NO_x, hidrocarburos no quemados HC, y compuestos de plomo y anhídrido sulfuroso) [25]. Según un reporte de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire el 73% de la contaminación en la ciudad de Cuenca se debe al sector automotor [26]. A ello se suman el nivel de ruido elevado que producen los vehículos de combustión interna. Es aquí donde entra en juego el uso de vehículos eléctricos con el fin de disminuir los efectos negativos ocasionados por el uso del vehículo convencional y brindar al usuario una movilidad sostenible y amigable con el medio ambiente que se encuentre dentro de las normativas internacionales. Estas necesidades han hecho que la tendencia de consumidores ecuatorianos crezca [22].

2.4.1.1. Movilidad eléctrica en Ecuador

La ciudad de Loja cuenta con una flota de taxis eléctricos gracias al apoyo del Municipio, CFN y BYD. En Quito se están realizando pruebas con tres buses BYD y en Guayaquil se pretende reemplazar 20 unidades de buses por buses eléctricos. En 2019 el número de vehículos eléctricos vendidos en el Ecuador fue de 103, lo cual presenta un decremento del 20.7 % con respecto al año anterior. Mientras que la cantidad de vehículos eléctricos híbridos vendidos llegó a 1367, notándose una reducción del 51.5 % con respecto a las ventas del 2018 [24]. Esto se puede observar en las Figuras 2.12a y 2.12b respectivamente. Según la [Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador \(AEADE\)](#) las razones de este decremento fueron los desafíos económicos por los que atraviesa el país [21].

Los vehículos eléctricos no emiten gases de efecto invernadero, presentando la mejor huella de carbono frente a las otras tipologías de vehículos. Lo que los convierte en una excelente opción para el desarrollo sostenible de ciudades inteligentes, pues emplea electricidad proveniente de fuentes de energías renovables e inagotables como: eólica, hídrica o solar. Basados en esta premisa muchos investigadores se centran en el estudio y mejoramiento de la sostenibilidad de los vehículos eléctricos. Pero para que su uso en la sociedad ecuatoriana tome fuerza se deben tomar en cuenta algunos aspectos importantes como: mayor autonomía, puntos de carga suficientes, tiempo de carga reducido y baterías de bajo costo.

2.4.2. Ventajas económicas

La movilidad eléctrica en Ecuador aparece como una opción más económica, un ejemplo de ello es en el ámbito del transporte.

Una carga a full de un taxi eléctrico le permite un recorrido de 300km diarios, con lo que se pagaría \$90 mensuales de consumo eléctrico, mientras que el cargar gasolina ECOPAI\$ en un taxi convencional costaría aproximadamente \$360, lo que se traduce en un ahorro del 60 %. Además los taxis eléctricos requieren un mantenimiento más económico, pues no utilizan aceites, no poseen tubo de escape y su batería tiene una vida útil de 20 años, reduciendo así un 40 % los costos de mantenimiento [27].

2.5. Desarrollo sostenible

Este concepto surgió de las conferencias sobre el desarrollo y el medio ambiente impulsadas por la ONU en 1987. Es aquél desarrollo que capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos de las futuras generaciones. Como consecuencia es una actividad que se puede conservar, que es perdurable en el tiempo. La energía eléctrica contribuye en el desarrollo de cualquier país, por ello, se considera un servicio y un derecho para garantizar el buen vivir de todos los ciudadanos. El desarrollo económico de un país viene acompañado del crecimiento de la demanda de energía. En la última década la demanda de energía eléctrica en Ecuador creció una tasa de 5 % anual, según [28].

2.5.1. Matriz energética en el Ecuador

El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables para el 2020 tiene como objetivo que el 86 % de la electricidad provenga de generación hidroeléctrica, y un 2 % por tecnologías renovables no convencionales (1 % solar y eólica, 1 % biomasa). El resto se espera que provenga de energía termoeléctrica e

importaciones (9 % y 3 %, respectivamente) [29].

El cambio de la matriz energética del país denota un crecimiento económico sustentable y trae consigo múltiples beneficios, por nombrar algunos es posible exportar electricidad a países vecinos, disminución de pérdidas de distribución y más.

2.5.1.1. Generación eléctrica

Ecuador posee una enorme cantidad de recursos hídricos, los cuales se están aprovechando gracias la construcción de 8 nuevas hidroeléctricas, que forman parte del plan de cambio de la matriz energética. Actualmente el país produce 22.655,47 GW/h proveniente de fuentes de energía renovable que representa el 74,73 % de la producción total, y sabiendo que el consumo de energía eléctrica es de 21.377,98 GW/h [13], se tiene un restante de energía que será capaz de abastecer una demanda extra. La información resumida en cuanto a la generación de energía en el Ecuador de acuerdo a las fuentes empleadas, así como el consumo de la misma, se puede observar en las Figuras 2.13 y 2.14 respectivamente.

Debido a que es vital que exista un equilibrio entre la oferta y demanda de energía eléctrica, ya que el costo de almacenar la energía producida en baterías es elevado, para evitar esto se cuenta con el consumo inteligente de electricidad como los vehículos eléctricos [11].

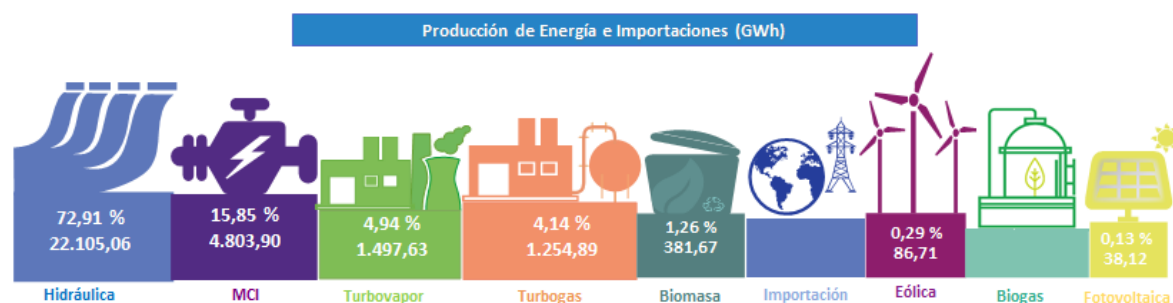


Figura 2.13: Producción de energía eléctrica en el Ecuador

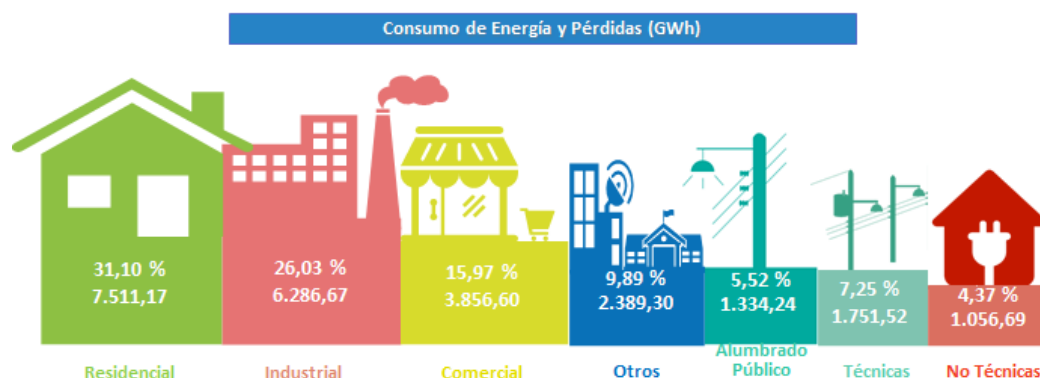


Figura 2.14: Consumo de energía eléctrica en el Ecuador

2.5.1.2. Capacidad de las energías renovables

Para estimar el consumo de energía del parque automotor de vehículos eléctricos, es necesario conocer la participación de los EVs en el país. Según el reporte anual del parque automotor de la Aede [24], a partir del 2015 y hasta diciembre del 2019 se han comercializado 10104 vehículos eléctricos en el Ecuador, esto representa el 0.41 % del parque automotor del país. Según la estimación de la penetración de vehículos eléctricos en el país realizado por la [Agencia de Regulación y Control de Electricidad \(ARCONEL\)](#) se espera que éstos representen el 23 % de todos los vehículos de carga liviana, llegando a cerca de 292.000 EVs para el 2032 [23].

Entonces es importante preguntarse ¿A cuánto se elevaría el consumo de energía eléctrica?. Para responder a esta interrogante se considerará que un vehículo promedio consume 27,323 kW/h, con lo cual el consumo total de energía sería:

$$E_T = N_{EV} \times E_{EV} \quad (2.1)$$

Reemplazando los datos conocidos previamente en la ecuación 2.1, se obtiene el siguiente resultado.

$$\begin{aligned} E_T &= 292000 * 27,232kWh \\ E_T &= 7,951GWh \end{aligned}$$

Comparada con la oferta total 30.317,85 GW/h, el país está preparado para abastecer la demanda de vehículos 100 % eléctricos en el caso de que la proyección se cumpla en su totalidad [11].

Los vehículos eléctricos son una alternativa más limpia con respecto a los vehículos convencionales. Además, convierten el 52 % – 75 % de electricidad en energía mecánica, mientras que los vehículos convencionales el 17 % – 27 %. Por ello, se debe incentivar el uso de los mismos en el país, dado que casi no producen contaminación ambiental a diferencia de los vehículos convencionales alimentados por combustibles fósiles.



Diseño e Implementación del algoritmo para la regulación de frecuencia mediante la gestión de demanda

Este capítulo trata sobre el diseño e implementación del circuito para medir la frecuencia de la red, gracias al cual se podrá controlar la demanda del vehículo eléctrico durante el proceso de carga.

3.1. Estudio de la estación de carga de vehículos eléctricos bajo el estándar SAE j1772

Las estructuras de carga de los vehículos eléctricos están compuestas de uno o más puntos de recarga y los [electric vehicle supply equipment \(EVSE\)](#) [17]. Para que sean funcionales se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Deben poder servir a diferentes modelos de [EVs](#).
- Deben existir suficientes estaciones de carga para suplir la demanda.
- Es necesario tener un control de la energía proporcionada, pues las recargas se realizarán en horas pico y valle.
- Deben estar ubicadas en puntos estratégicos y deben ser prácticas.

Los vehículos eléctricos pueden utilizar dos tipos de “combustibles” denominados [corriente alterna \(CA\)](#) y [corriente continua \(CC\)](#), según se indica en Figura 3.1. La energía eléctrica que proviene de la red de suministro es siempre [CA](#), sin embargo, las baterías del [EV](#) solo pueden almacenar energía en forma de [CC](#) [30]. Para ello todos los [EVs](#) cuentan con un dispositivo para realizar la recarga, el cual posee un convertidor que transforma la [CA](#) en [CC](#) para poder cargar las baterías.

Los sistemas de carga lenta presentan un [OBC](#) dentro del propio vehículo, el cual convierte la energía de [CA](#) a [CC](#) y la introduce en la batería del coche. Este es el método de carga más frecuente para los [EVs](#) en la actualidad.

En cambio en los sistemas de carga rápida el convertidor se encuentra dentro de la estación de carga, por este motivo se puede introducir directamente la corriente eléctrica en la batería del vehículo

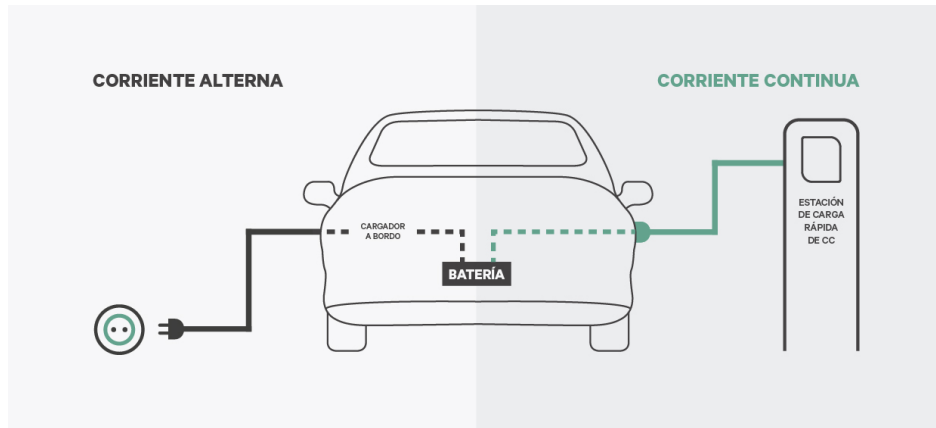


Figura 3.1: Modo de carga en AC y CC

y no necesita ningún **OBC** para convertirla. Los cargadores de **CC** son más grandes, más rápidos y representan un enorme avance en lo que respecta a los vehículos eléctricos.

Los sistemas de carga lenta se alimentan con **CA** y los sistemas de carga rápida con **CC**, aunque pueden presentarse casos híbridos.

3.1.1. Estación de carga lenta

La estación de carga necesita un acceso a la red eléctrica que pueda suministrar la tensión y corriente necesarias para su correcto funcionamiento. Para el estándar de carga lenta SAE j1772, la tensión de carga asignada por la normativa EN62196-2:2012 es de 240V con una intensidad de 32A en monofásico [7].

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques de la estación de carga lenta existente en el Laboratorio de microrred Balzay, con los bloques mínimos necesarios para su funcionamiento diseñada por Astudillo y Caguana [7]. Empezando por la izquierda con la conexión a la red eléctrica. Seguidamente se encuentran los fusibles para cada una de las líneas, los cuales protegen a la estación en caso de corto circuitos. Luego se tiene un relé por cada fase, el cual funciona como interruptor permitiendo el paso de la corriente alterna desde la red hacia el **EV**. El siguiente elemento es un sensor de corriente que sirve para comprobar si hay flujo de corriente hacia el **EV**. Se cuenta además con un controlador, encargado de regular y comprobar el estado de la carga mediante el relé y el sensor de corriente respectivamente, también es el encargado de leer la señal piloto. Finalmente está el conector SAE j1772 que se enchufa al vehículo para realizar la carga [7].

Las líneas de color rojo representan las líneas de tensión, las líneas de color azul representan las señales que ingresan al controlador y las líneas de color verde las provenientes del controlador, y la línea de color negro representa la conexión a tierra.

3.1.1.1. Comunicación entre la estación de carga y el vehículo eléctrico

El estándar IEC61851 está diseñado para garantizar la interoperabilidad y facilitar la seguridad de conexión entre el **EV** y el **EVSE**, pues es necesario tener una conexión segura antes de comenzar cualquier carga [31]. Debido a que el **EV** es libre de cargar a cualquier velocidad, se incluye una señal

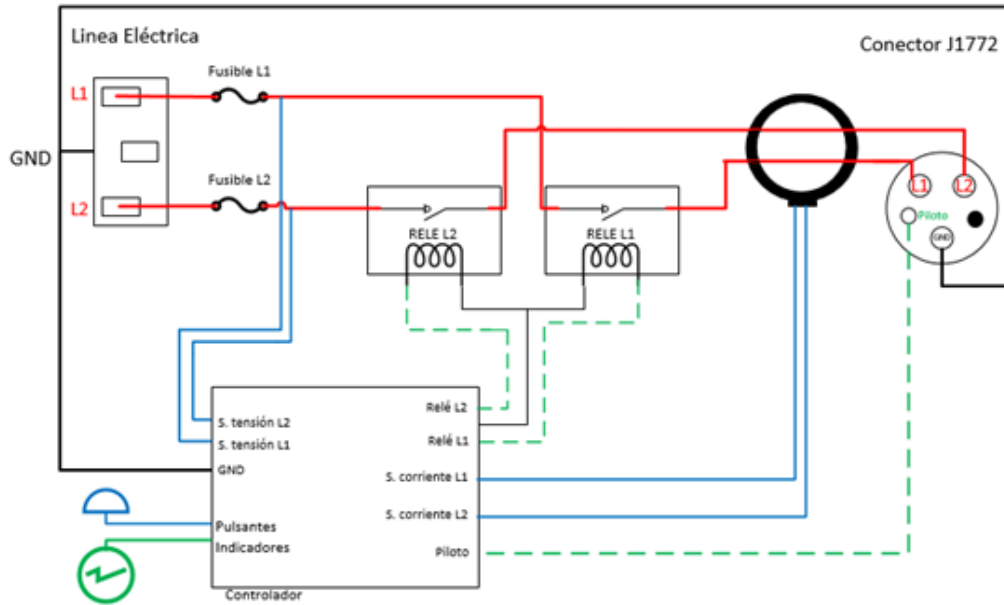


Figura 3.2: Diagrama de bloques de la estación de carga, estándar SAE j1772

pulse wide modulation (PWM) utilizada para regular la corriente de carga.

El diagrama de bloques del protocolo de comunicación y señalización de la estación de carga del EVSE se muestra en la Figura 3.3. En primer lugar, se encuentra el controlador EVSE, luego está el conector macho del vehículo (estándar SAE J1772), a continuación se tiene el conector hembra o entrada del EV y finalmente está el controlador del EV [7].

- **Controlador del EVSE:** es el encargado de generar la onda cuadrada PWM que se envía por el piloto. La onda cuadrada es de 1KHz y se genera mediante un microcontrolador, el cual además comanda otras funciones de la estación de carga.
- **Conector del EVSE:** es del tipo 1 o estándar SAE j1772 y tiene 5 terminales: 2 terminales de corriente (uno para cada línea), 1 terminal GND y 2 terminales para la comunicación (señal de proximidad y piloto). El circuito de proximidad es sencillo, consta de un divisor de tensión con resistencias en serie y paralelo que sirven para indicar al vehículo que ya está conectado.
- **Entrada del EV:** donde se enchufa el conector de la estación de carga, contiene 5 terminales macho y cuenta además con una resistencia conectada al polo de proximidad para cerrar el circuito con la estación de carga.
- **Controlador del EV:** conformado por varias resistencias que permiten modificar la amplitud de la señal PWM del piloto, estas variaciones son interpretadas por el controlador como variaciones del estado de carga.

El estándar IEC61851 no dicta que el EV deba cargarse necesariamente a la velocidad máxima (potencia máxima de consumo), lo que significa que una carga EV a una velocidad inferior también se considera un comportamiento normal [31]. Basado en esta premisa se realizará un control de potencia mediante la modificación de la señal PWM enviada al vehículo desde la estación de carga.

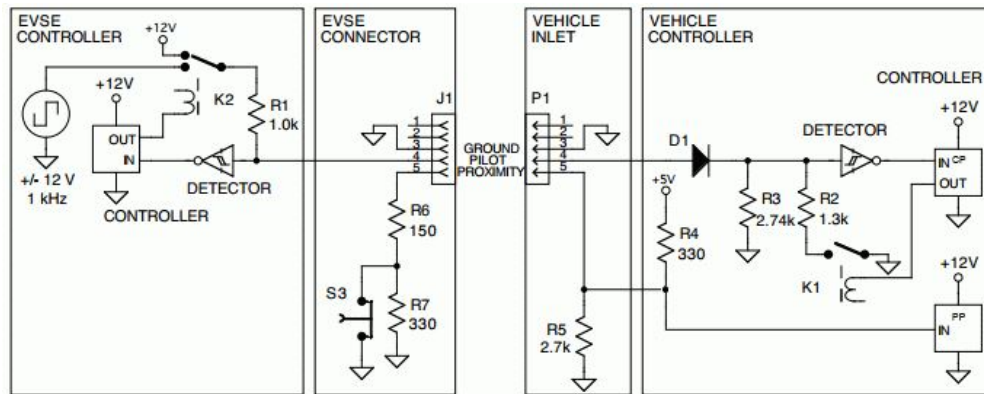


Figura 3.3: Circuito de señalización del estándar SAE J1772

3.1.1.2. Controlador del EVSE

El controlador del EVSE es el núcleo de la estación de carga, pues realiza un sinnúmero de funciones vitales para el funcionamiento de la estación. Se ha usado el microcontrolador PIC 18F4550 debido a las múltiples prestaciones de diseño que brindan sus características. Entre las acciones que el microcontrolador efectúa están: asegurarse que sus sistemas operen adecuadamente, generar la señal PWM del piloto, leer las señales de entrada provenientes de los sensores y botones, activar o desactivar los actuadores dependiendo del estado de la estación y mostrar estado o información de la estación en los dispositivos de salida conectados a él. También es capaz de encontrar las posibles fallas en los componentes de la estación [7].

A este componente es al que se enviará el nuevo ciclo de trabajo del PWM de la señal piloto para realizar el control de potencia de carga del vehículo eléctrico una vez que el sistema implementado detecte cambios de frecuencia en la red. Todo esto se detallará en el siguiente capítulo.

3.1.1.3. Conector del EVSE

El Conector Tipo 1 SAE j1772 es uno de los más utilizados a nivel mundial, este conector fue impulsado en Estados Unidos por la Sociedad de Ingenieros de la Automoción (Society of Automotive Engineers, de donde procede su acrónimo) y fabricado por Yazaki. El término J1772 hace referencia al protocolo estándar usado por el conector. Este Conector SAE j1772 posee un alto nivel de seguridad, pues los pines de conexión se encuentran aislados en el interior del conector cuando se acoplan, evitando el acceso físico a esos pines, tal como se muestra en la Figura 3.4.

3.1.1.4. Señal piloto

La estación de carga antes de conectar el vehículo eléctrico envía una señal continua de +12V a través del puerto piloto, cuando la estación detecta el EV cambia la señal continua por una señal PWM de 1KHz que oscila entre +12V y -12V. En la tabla 3.1 se definen los estados de operación del protocolo de comunicación y la variación de amplitud de la señal piloto correspondiente a cada uno de ellos [7].

El ciclo de trabajo de la onda cuadrada del piloto depende de la configuración de corriente alterna máxima posible en la estación de carga. De acuerdo a las características del EV disponible en el



Figura 3.4: Conector del EVSE Tipo 1 SAE j1772

Tabla 3.1: Estados de comunicación entre la estación de carga y el vehículo eléctrico

Estado	Voltaje señal piloto	Descripción
Estado A	12 V	No conectado
Estado B	9 V	Conectado
Estado C	6 V	Cargando
Estado D	3 V	Con ventilación
Estado E	0	Sin energía
Estado F	~-12 V	EVSE error

laboratorio de microrred para pruebas (capacidad del OBC de 6.6KW y corriente máxima 32A [32]), es posible determinar el ciclo de trabajo de la corriente máxima disponible para el estándar SAE j1772 empleando la siguiente ecuación para una corriente entre 6A-51A:

$$Amperios = DutyCycle * 0,6 \quad (3.1)$$

Tabla 3.2: Valores de corriente de acuerdo al ciclo de trabajo

Amperaje	Ciclo de trabajo
6A	10 %
12A	20 %
18A	30 %
24A	40 %
30A	50 %

La señal PWM se genera digitalmente mediante el uso de un microcontrolador, el cual permite variar el ancho del pulso de dicha señal mediante comandos. La onda cuadrada generada debe cumplir con la ecuación 3.2.

$$DutyCycle = \left(\frac{\tau}{T} \right) \quad (3.2)$$

Dónde:

τ = tiempo en que la señal permanece en alto

T = periodo de la señal

3.1.1.5. Puerto de proximidad

Proporciona una señal al sistema de control del vehículo para que pueda evitar el movimiento mientras está conectado al [EVSE](#), y señala el botón de liberación del seguro al vehículo. En la tabla 3.3 se definen los valores de voltaje medidos en el terminal proximidad correspondiente a cada estado [7]. Estas mediciones se obtienen debido a la combinación de resistencias del circuito de proximidad mostrado en la Figura 3.3.

Tabla 3.3: Estados del puerto de proximidad

Estado	Voltaje pin de proximidad
No conectado	4.5 V
Botón presionado	3 V
Conectado	1 V

3.2. Regulación Primaria de Frecuencia

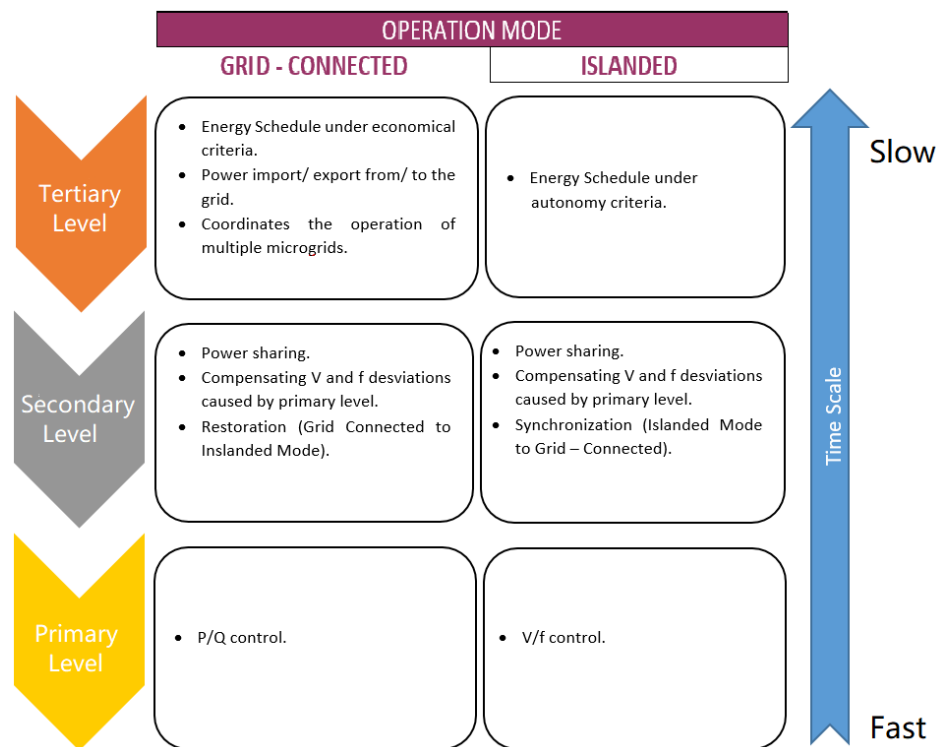


Figura 3.5: Control de frecuencia

La frecuencia de un sistema eléctrico está estrechamente relacionada con el equilibrio entre generación y demanda. Pues si en un momento dado aumenta la carga, es decir la potencia eléctrica demandada en el sistema, entonces la frecuencia mostrará una gran desviación [9]. Pero es indispensable que la frecuencia de la tensión del [SNI](#) permanezca dentro de los rangos establecidos (frecuencia no

inferior a 59.5 Hz) para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables, pues variaciones del valor nominal de la frecuencia pueden provocar el funcionamiento incorrecto de diversos equipos industriales o domésticos. Para evitar esto, entra en juego la regulación de frecuencia y dado el auge que está teniendo dicho tema, este trabajo se ha enfocado en profundizar el aporte que los vehículos eléctricos podrían tener en la regulación de la frecuencia del sistema. Pues estos a más de ayudar a combatir el cambio climático, prometen brindar servicios auxiliares a la red eléctrica, especialmente en la regulación de frecuencia, lo que ayuda a reducir su desviación [33].

Como la frecuencia eléctrica está ligada al balance de potencia activa en el sistema eléctrico, suele hablarse indistintamente de regulación de frecuencia, regulación de potencia, o regulación de frecuencia-potencia. Con esto se busca mantener el equilibrio entre generación y demanda, así como mantener la frecuencia de referencia en el sistema [34], pues eventos de baja frecuencia son inesperados y podrían implicar incluso la pérdida de una gran fuente de electricidad. La recuperación de la frecuencia del sistema implica tres fases, que se conocen colectivamente como “control de frecuencia” [35]. Cada una de las fases de control frecuencia-potencia: primaria, secundaria y terciaria presenta un tiempo de acción y modo de operación distintos como se indica en las Figuras 3.5 y 3.6 [36].

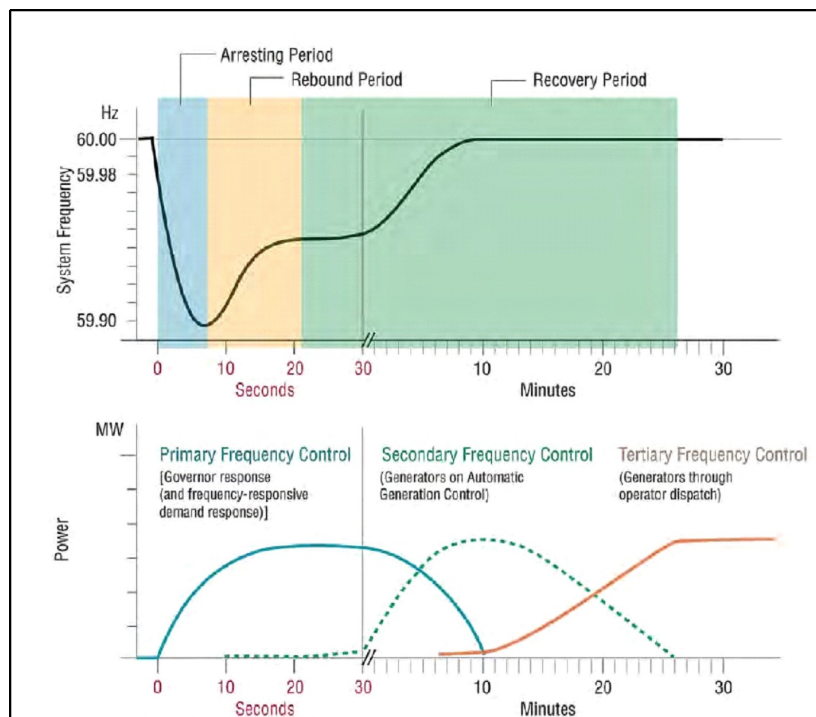


Figura 3.6: Tiempo vs frecuencia después de una perturbación en la red causada por una caída en la frecuencia

- El control primario es el más rápido de los tres, opera en un rango de tiempo de 2 a 20-30 segundos y actúa de forma local, es decir, se centra en el control de la carga.
- El control secundario opera en un rango de 30 segundos a 2 minutos. Actúa en el ámbito del área de control, atendiendo a la frecuencia y al intercambio de potencia con las áreas vecinas.
- El control terciario opera en un rango de tiempo superior a 10 minutos y actúa en el ámbito de

un sistema eléctrico, pues busca un reparto de cargas optimizado que asegure suficientes reservas de energía.

En [37] se indica que en la **regulación primaria de frecuencia (RPF)** por baja frecuencia, las cargas deben ser desconectadas para alcanzar una frecuencia objetivo de 59.5 Hz. Pero el objetivo de este trabajo no es desconectar la carga (potencia de consumo del EV), sino, poder disminuir su valor hasta que la red vuelva a los valores nominales de frecuencia y voltaje [38]. En este trabajo se pretende evaluar el aporte que brinda la regulación de frecuencia primaria asociada al consumo de potencia del vehículo eléctrico durante el proceso de carga. Se ha seleccionado el control primario de frecuencia-potencia debido a que el EV tiene una rápida respuesta de trabajo (cercano a los 2 seg) y se encuentra dentro del rango de tiempo de reacción.

Para lograrlo se cuenta con un batería de ion-litio de 88kW y un vehículo eléctrico de 4.8kW de consumo máximo. Se ha recreado un escenario donde se presente un desacoplamiento entre frecuencia y tensión que permita gestionar la frecuencia del sistema mediante un control de potencia. En el capítulo siguiente se reportan los resultados de las pruebas efectuadas.

3.2.1. Algoritmo de censado de frecuencia

La recarga de vehículos eléctricos ha impuesto nuevas cargas en los sistemas de energía, como es el caso del control de frecuencia y la estabilidad de los sistemas de energía. Una forma de confrontar este desafío es la carga inteligente de los EVs, donde la condición de la red afecta la recarga del vehículo, en este caso la frecuencia [39].

Como se dijo anteriormente, a medida que la demanda del suministro eléctrico aumenta, la frecuencia disminuye. Para poder estabilizar el sistema es necesario medir la frecuencia y realizar el control respectivo de la demanda. Esta variación de la demanda que se desea controlar está regida por la ecuación 3.3, la cual indica que la reducción de la potencia es directamente proporcional a la variación de frecuencia [34]. Es decir, que una variación de potencia demandada por la carga varía linealmente con la frecuencia y esa constante podrá ser conocida mediante las pruebas del algoritmo propuesto.

$$\Delta P_{carga} = P_1 - P_0 = k \times \Delta f \quad (3.3)$$

Existen varios sistemas para la medición de la frecuencia de la red en tiempo real, entre los más comunes destacan:

- **Detector de cruce por cero:** conocido también como **Zero Crossing Detector (ZCD)**, por su traducción al inglés. Es un sistema muy utilizado para medir la frecuencia, pero presenta baja velocidad de detección, así como información de fase inexacta entre dos puntos de cruce [39].
- **FFT:** La Transformada rápida de Fourier también conocida como **FFT** por su traducción al inglés, es un algoritmo que calcula la Transformada discreta de Fourier (DFT). Un principio importante es que cualquier señal (incluso no periódica) puede reconstruirse con bastante precisión al agregar señales sinusoidales junto con diferentes frecuencias, amplitudes y fases. Cuantas más señales sinusoidales se agreguen, más se parecerá la señal reconstruida a la original. La **FFT** es usada para realizar mediciones con alta precisión y resolución de un sinnúmero de parámetros empleando señales periódicas, entre ellos la frecuencia.
- **PLL:** Los sintetizadores de frecuencia son circuitos eléctricos que generan un conjunto de frecuencias discretas equiespaciadas a partir de una o varias frecuencias de referencia. Dentro de

su clasificación se encuentran los conocidos [Phase Locked Loop \(PLL\)](#), este sistema obtiene la fase y frecuencia de la red distribuida por medio de la sintonización del voltaje de la red y la corriente de salida del inversor. Los [PLLs](#) convencionales brindan una exactitud relativamente baja; es por eso que hoy en día se prefiere usar [PLLs](#) digitales, los cuales emplean la frecuencia angular para medir la frecuencia después de cada ciclo, pero su implementación es algo compleja [\[40\]](#).

3.2.1.1. [FFT](#)

En este trabajo de titulación se ha empleado la [FFT](#) como algoritmo para la medición de frecuencia de la red eléctrica por su simplicidad y se va a demostrar su eficiencia mediante pruebas de estado estacionario como de estado dinámico.

Los cambios en la frecuencia que se van a medir están en el orden de menos de 0.01 %, por esta razón aquí se describe un sistema para la medición de frecuencia de la red que emplea la [FFT](#), la cual presenta una resolución de 6 decimales, pero para este caso de estudio sólo se van a tomar los primeros 2 decimales ya que la gestión de potencia de la estación de carga será efectuada en variaciones de 0.3Hz respecto a la frecuencia nominal de la red y esta resolución es más que suficiente para cumplir con el objetivo planteado. Además se muestran la medición de frecuencia en tiempo real en una pantalla LCD.

El algoritmo [FFT](#) le permite ver qué frecuencias están presentes en cualquier señal analógica y también ver cuáles de esas frecuencias son las más dominantes [\[41\]](#). El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon dice que, para poder muestrear una señal, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal que estamos tratando de muestrear, en este caso particular nos interesa muestrear señales de 60Hz. El algoritmo [FFT](#) funciona con un número finito de muestras. Este número debe ser $2n$, donde n es un número entero. Cuanto mayor sea este número, más lento será el algoritmo. Sin embargo, mientras mayor sea el número de muestras se tendrá una resolución mayor para los resultados. Para esta aplicación se ha usado un tamaño de ventana de muestreo de 512, y debido a que se cuenta con un Arduino Due de alta capacidad no se tuvieron problemas con el tiempo de medición.

La biblioteca `arduinoFFT` hace todo el trabajo duro. En este caso, el Arduino simula el muestreo de una señal sinusoidal de 60 Hz con una amplitud de 1.38V, muestreada a 2kHz. Las muestras se almacenan dentro de la matriz `vReal` y se muestran de acuerdo con la función de Hamming. La [FFT](#) se calcula utilizando las muestras en ventana. Luego se calculan las magnitudes de cada una de las frecuencias que componen la señal. Finalmente, se obtiene la frecuencia con el pico más alto, siendo esa la frecuencia principal presente en la señal, la misma que se imprime en la LCD (Figura [3.7](#)) y servirá para controlar la potencia de consumo del vehículo eléctrico mediante modificaciones en el ciclo de trabajo de la señal piloto, lo cual se detallará más adelante.

3.2.1.2. [Arduino Due](#)

El Arduino Due es un microcontrolador de bajo costo (\$38,50), con CPU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits que funciona a 3.3V, el cual tiene una memoria flash de 512KB para almacenamiento de código. Cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida (12 de los cuales puede ser usadas como salidas PWM), 12 entradas analógicas, 4 UART, un reloj de 84MHz, una conexión compatible con USB OTG, 2 DAC, 2 TWI, un conector de alimentación, un encabezado SPI, un

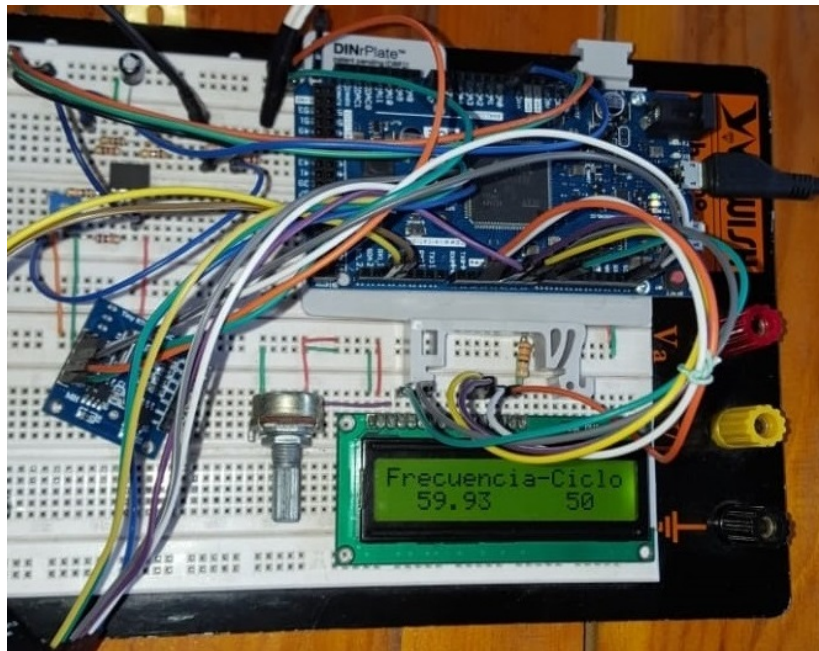


Figura 3.7: Funcionamiento del algoritmo FFT para la medición de frecuencia

encabezado JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado. El Due se debe programar con el software Arduino (IDE) y cualquiera de los puertos USB se puede emplear para la programación de la placa, pero es recomendable usar el puerto de programación por la forma en la que se maneja el borrado del chip [1]. Además al Arduino se pueden conectar placas de expansión (shields) mediante los puertos de entrada y salida presentes en la placa, los cuales complementan la funcionalidad del microcontrolador. La distribución de pines del Arduino Due se puede observar en la Figura 5.3.

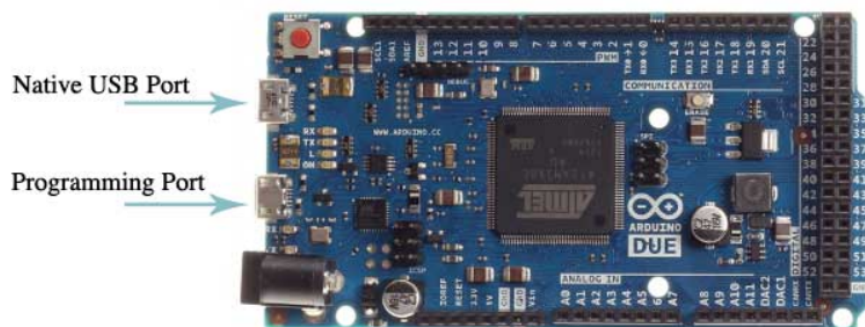


Figura 3.8: Microcontrolador Arduino Due

El Arduino Due tiene facilidad de comunicación con una computadora, otro arduino u otros microcontroladores y diferentes dispositivos móviles. Por todas las ventajas que brinda este microcontrolador ha sido empleado para la ejecución de este trabajo, permitiendo medir la frecuencia de la red mediante la implementación de la [FFT](#).

Este microcontrolador será el encargado de medir la frecuencia de la señal de entrada mediante la [FFT](#) implementada en él, luego de obtener este valor mediante un algoritmo de control y de acuerdo al

rango donde se encuentre la frecuencia medida procederá a cambiar el valor del ciclo de trabajo de la señal piloto que se envía al EV desde la estación de carga. El nuevo valor del ciclo de trabajo se envía al microcontrolador que comanda la estación de carga ya implementada por [7] mediante una comunicación UART utilizando los puertos disponibles en el PIC 18F4550. Finalmente mediante una pequeña modificación en el código ya implementado en el microcontrolador de la estación de carga, se realiza la recepción de los datos enviados por el Arduino Due y se procede a cambiar el valor de la señal PWM generada por el microcontrolador y enviada hacia el vehículo. Con ello se logra modificar la demanda del EV durante el proceso de carga.

También se ha implementado la opción de almacenamiento de los datos capturados por el Arduino Due para su posterior comparación con los datos medidos con los equipos de medición especializados. Esto se logró mediante el uso de un módulo RTC y un módulo microSD para arduino disponibles en el mercado.

3.2.1.3. Pantalla LCD

La pantalla de cristal líquido o LCD como se conoce popularmente es ampliamente utilizada en proyectos de electrónica para mostrar diversos tipos de información, dado que porque su precio es adquisible y a que es compatible con muchos microcontroladores presentes en el mercado.

Cuenta con 16 pines, el primero se ubica a la izquierda. Su distribución se muestra en la Figura 3.9. La conexión con Arduino es relativamente sencilla al igual que la programación, basta con utilizar la librería *Liquid Crystal* que viene instalada por defecto en el IDE del Arduino y realizar unas cuantas configuraciones para empezar a utilizarla (ver ejemplos de la librería antes mencionada).

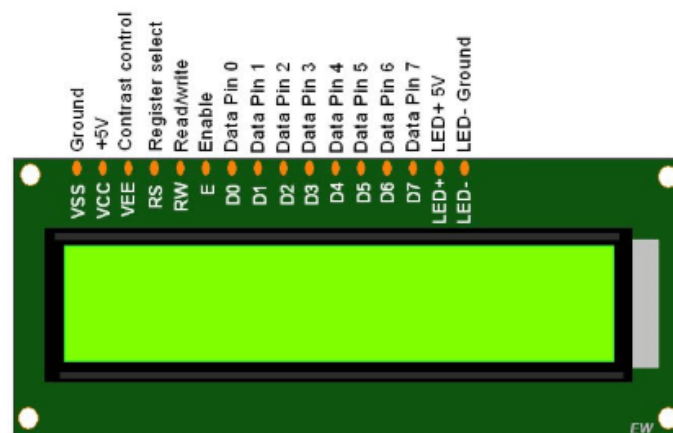


Figura 3.9: Distribución de pines de una LCD

Aquí se mostrará la frecuencia medida en tiempo real así como el ciclo de servicio correspondiente para ese valor.

3.2.1.4. Módulo RTC DS1307

Un reloj de tiempo real o RTC por sus siglas en inglés, es un dispositivo electrónico que permite obtener mediciones de tiempo en las unidades temporales de uso cotidiano (segundos, minutos, horas, días, semanas, meses y años). Generalmente está formado por un resonador de cristal integrado con la

electrónica necesaria para contabilizar de forma correcta el paso del tiempo. Este módulo presenta un consumo de energía reducido, es de alta precisión y ayuda a liberar al Arduino de la tarea de contabilizar el tiempo. Es común que los RTC incorporen algún tipo de batería que permita mantener el valor del tiempo en caso de pérdida de alimentación, la cual debería ser capaz de mantener alimentado durante varios años al RTC DS1307 (Figura 3.10).

La comunicación entre el módulo RTC y el Arduino Due se realiza a través del bus [Inter-Integrated Circuit \(I2C\)](#), por lo que es sencillo obtener los datos medidos. El bus [I2C](#) es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos con cierto nivel de “inteligencia”, solo requiere de dos líneas de conexión (Transmisión y recepción de datos por SDA y envío de la señal reloj por la línea SCL) y tiene una arquitectura de tipo maestro-esclavo simple. El dispositivo maestro inicia la comunicación con los esclavos, y puede enviar o recibir datos de los esclavos [42].

Por todas las características descritas y porque es ampliamente utilizado en electrónica se ha decidido emplear este módulo para la obtención de la hora y posterior almacenamiento de datos capturados en una microSD.

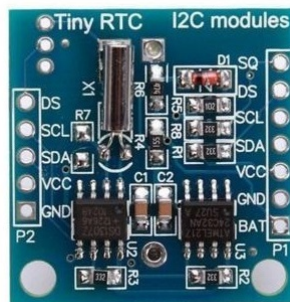


Figura 3.10: Distribución de pines del módulo RTC DS1307

3.2.1.5. Módulo microSD

Las memorias SD son las más usadas por dispositivos portátiles, por su gran capacidad de almacenamiento, su reducido tamaño y bajo costo. Estas características las convierten en una buena alternativa de almacenamiento para usarlo en Arduino, pues se puede crear un archivo en una tarjeta SD para escribir y guardar datos usando la librería SD Arduino. Existen módulos para microSD compatibles con Arduino que tienen el socket y componentes necesarios para adaptar los voltajes a TTL (Figura 3.11). La comunicación entre ambos dispositivos es mediante el bus [Serial Peripheral Interface \(SPI\)](#) síncrono que tiene una arquitectura de tipo maestro-esclavo. El dispositivo maestro puede iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos, y enviar o recibir datos de ellos, esta comunicación es Full Duplex. Por tanto, el bus SPI requiere un mínimo de 3 líneas (MOSI, MISO, SCK), y requiere una línea adicional SS (Slave Select) para cada dispositivo esclavo conectado [43].

3.2.2. Modificación del ciclo de trabajo de la Señal Piloto

La señal [PWM](#) que se envía al vehículo eléctrico oscila a frecuencia de 1KHz en un intervalo de $\pm 12V$. La Figura 3.12 muestra los diferentes niveles de voltaje correspondientes a cada uno de los estados de la carga presentados en la tabla 3.1 del capítulo anterior. En el Estado A la amplitud de la



Figura 3.11: Distribución de pines del módulo MicroSD

señal es de +12V, esto indica que aún no se ha conectado el EV a la estación de carga. En el Estado B esta amplitud toma el valor de +9V, lo cual denota la conexión del EV a la estación. Y finalmente en el Estado C la amplitud de la señal PWM es de +6V, lo que representa que la recarga del vehículo se realiza correctamente.

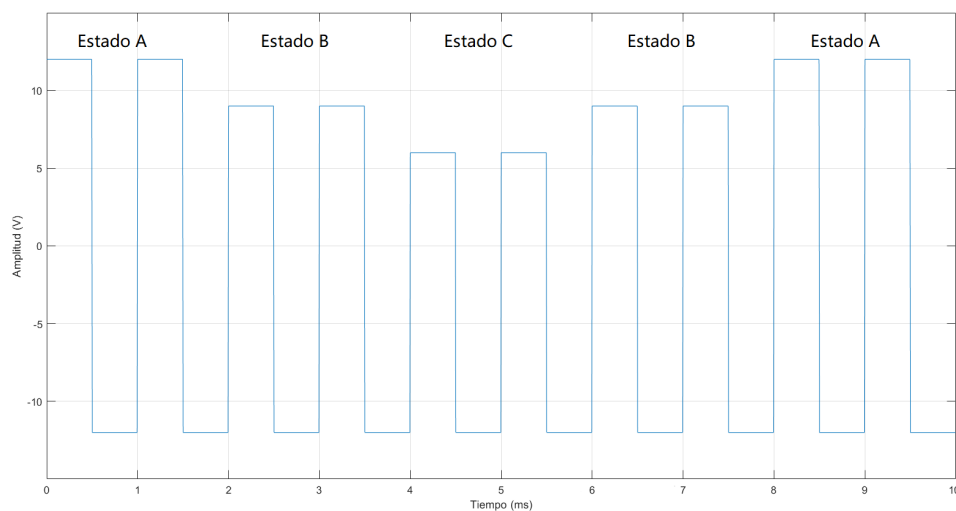


Figura 3.12: Señal PWM de la comunicación del piloto

3.2.2.1. Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo de la señal PWM es lo que se modificará dependiendo del valor de frecuencia medido en la red. Esto quiere decir que cuando la FFT detecte una variación en la frecuencia, automáticamente se reduce el valor del ciclo de trabajo de la señal PWM generada por el microcontrolador con el fin de reducir la potencia de consumo del vehículo eléctrico durante el proceso de carga.

Esto se puede explicar mediante la Figura 3.13, en la cual se exponen los valores de corriente correspondientes a cada uno de porcentajes de ciclo de trabajo. Así pues, es posible determinar el valor de potencia de consumo de acuerdo al valor de frecuencia medido, puesto que se ha determinado en

pruebas preliminares que la tensión permanece dentro de su valor nominal, por lo que aplicando la ecuación 4.1 y considerando un valor de voltaje de 220V es posible obtener la gráfica de la potencia con respecto al ciclo de trabajo mostrada en la Figura 3.14.

Conociendo de antemano que la capacidad de consumo del OBC del Kia Soul es de 6.6kW se tiene un rango de manipulación de corriente-potencia para realizar el control de frecuencia, el cual va desde el 10 % al 50 % del ciclo de trabajo del PWM de la señal piloto. Esto se resume en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Relación frecuencia-ciclo de trabajo

Frecuencia	Ciclo de trabajo
$\geq 59,7Hz$	50 %
59.4Hz-59.7Hz	45 %
59.1Hz-59.4Hz	40 %
58.8Hz-59.1Hz	35 %
58.5Hz-58.8Hz	30 %
58.2Hz-58.5Hz	25 %
57.9Hz-58.2Hz	20 %
57.6Hz-57.9Hz	15 %
57.3Hz-57.6Hz	10 %

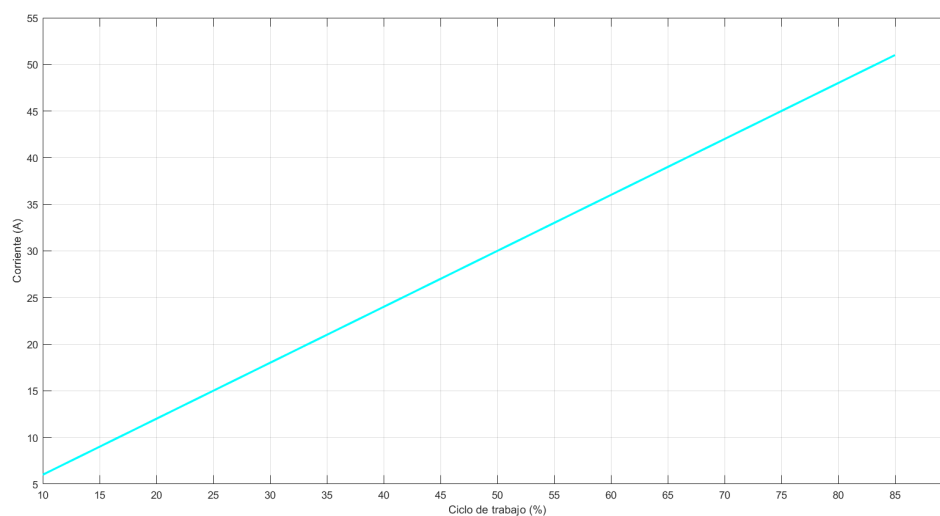


Figura 3.13: Corriente respecto al ciclo de trabajo para el EV Kia Soul

3.2.2.2. Comunicación UART Arduino Due-Pic 18F4550

La comunicación serial permite la interacción de Arduino con diferentes dispositivos, en este caso el controlador del EVSE. La comunicación serial puede transmitir o recibir datos bit a bit y transmitirlos o recibirlos a una velocidad determinada (9600 baudios en ambos extremos), puede ser de dos tipos: síncrona y asíncrona. En este caso específico se ha utilizado la comunicación [Universally Asynchronous Receiver/Transmitter \(UART\)](#).

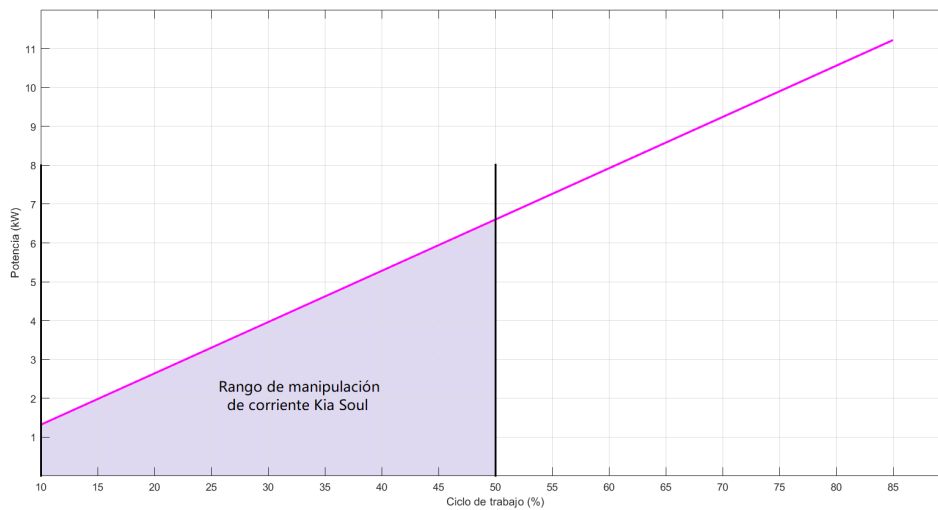


Figura 3.14: Potencia respecto al ciclo de trabajo para el EV Kia Soul

Este tipo de comunicación sólo utiliza tres líneas, una para recibir los datos Rx, otra para transmitir los datos Tx y la línea común GND. El Arduino Due disponen de 4 unidades UART, pero se usaron los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX), en nuestro caso específico para el controlador del EVSE (PIC 18F4550) las líneas TX y RX corresponden a los pines 25 y 26 (Puerto RC6 y RC7 respectivamente). La conexión para la comunicación UART entre el sistema de control de potencia (Arduino) y la Estación de carga se muestra en la Figura 3.16.

La comunicación UART requiere bits de start y stop y los datos asíncronos sólo se sincronizan con los bits de start y stop. Cabe la pena mencionar que los datos a enviar pueden ser de cualquier tipo, pero se envían los datos en ASCII. La librería es la encargada de hacer una conversión interna al tipo de dato usado [44].

Se ha empleado este tipo de comunicación para enviar el nuevo valor del ciclo de trabajo a la estación de carga correspondiente al valor de frecuencia medido por el algoritmo FFT implementado en el Arduino, de acuerdo a la Tabla 3.4).

El controlador de la estación de carga una vez que detecta que hay datos por leer en el UART, los lee y procede a cambiar el valor de la señal PWM que se envía al vehículo eléctrico a través del piloto. Finalmente, el EV cambia su potencia de consumo en base al porcentaje del ciclo de trabajo recibido.

3.3. Diagrama del control primario de frecuencia-potencia

En el diagrama de flujo de la Figura 3.15 se indica el funcionamiento del control primario de frecuencia para la regulación la potencia de consumo del vehículo eléctrico.

En la Figura 3.16 de muestran las conexiones entre cada uno de los elementos empleados para la implementación del algoritmo para la regulación de frecuencia mediante la gestión de demanda de consumo del vehículo eléctrico. Para ello se ha utilizado el software de diseño Fritzing.

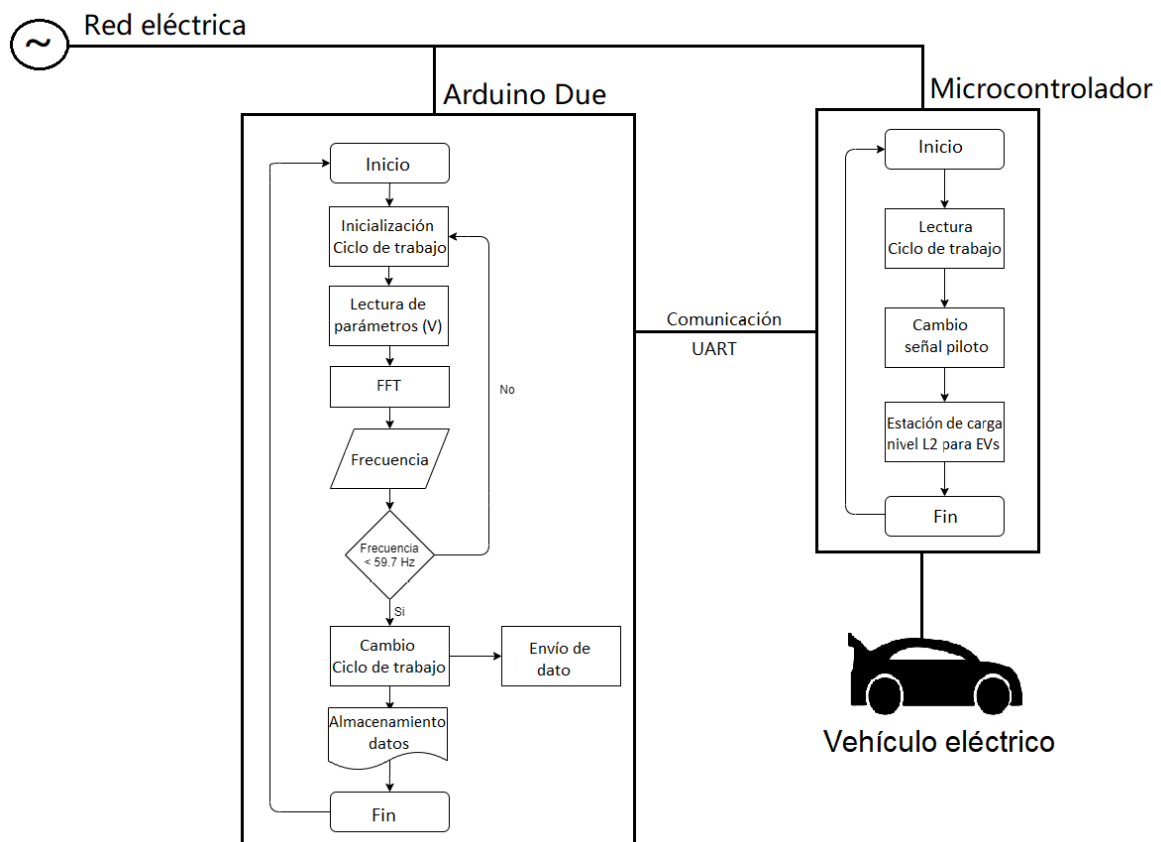


Figura 3.15: Diagrama de flujo del algoritmo de control de frecuencia-potencia implementado

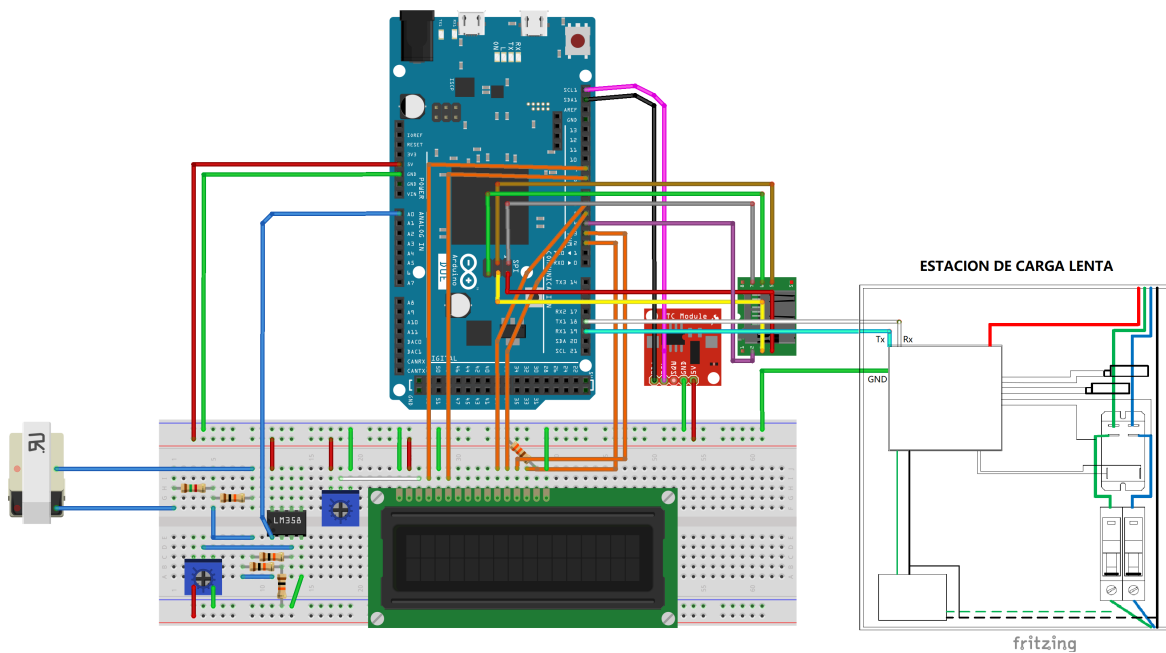


Figura 3.16: Diagrama del circuito de control de frecuencia-potencia implementado



Estudio dinámico del proceso de carga lenta bajo el estándar SAE j1772 en vehículos eléctricos

El análisis previo de la carga es de gran importancia para una correcta gestión de la energía. Conocer el perfil de carga permite clasificarlas según sus características en críticas y no esenciales.

4.1. Caracterización del comportamiento dinámico del generador síncrono a diésel

Se realizaron pruebas empleando el generador a diésel, la carga programable Avtron y la estación de carga nivel 2 disponibles en el Laboratorio de micro redes de la Universidad de Cuenca, ubicado en el campus Balzay. Como se muestra en la Figura 4.1, los equipos antes mencionados se conectaron a la barra de distribución 2 mediante el sistema SCADA, el cual maneja todos los equipos disponibles en el laboratorio, y también permite encender o apagar los equipos, así como asignar el valor de consumo a la carga programable.

Las mediciones se realizaron mediante equipos especializados para la captura y visualización de señales eléctricas, como es el caso del analizador de potencia fluke 435 II y el osciloscopio digital tektronix DPO4104. Estos equipos se colocaron en la estación de carga puesto que nos interesa medir el comportamiento del vehículo eléctrico y la estación de carga ante variaciones de la frecuencia. Además, se tomaron los datos registrados en el sistema SCADA de los tres equipos utilizados para realizar comparaciones posteriores.

4.1.1. Escenario 1

En la primera parte de las pruebas efectuadas se empleó únicamente el generador a diésel y la carga programable para analizar la capacidad dinámica del generador, el diagrama de conexión se muestra en la Figura 4.2. Una vez encendido el generador, se asigna un valor inicial de 8,6kW a la carga programable, luego de 64 seg se le asigna el valor de 0kW por 22 seg, seguidamente y por un

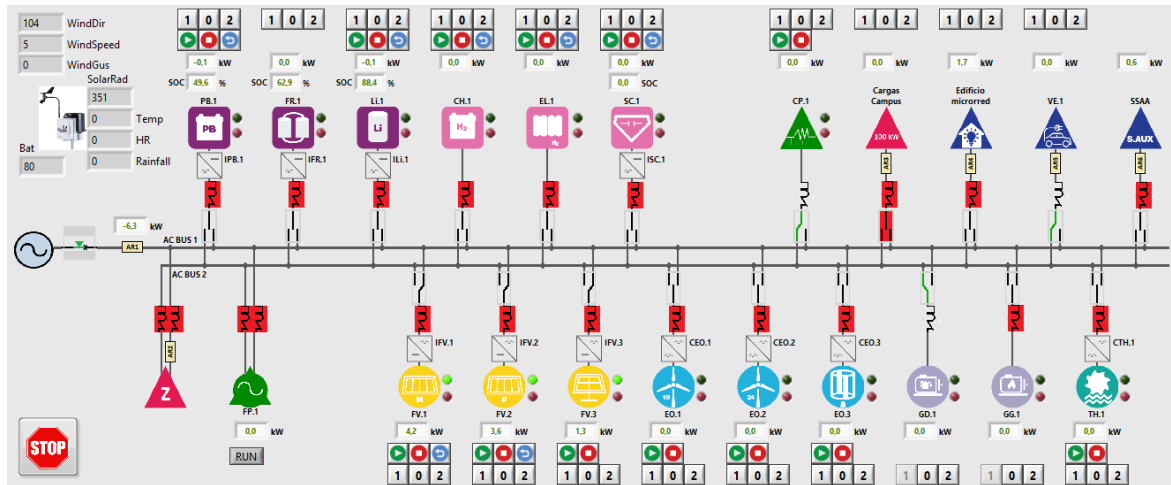


Figura 4.1: Esquema de conexión de los equipos

lapso de tiempo de 68 seg se asigna el valor de 21,5kW, luego de lo cual se baja a 0kW durante 53 seg, posteriormente se asigna un valor de 29,9kW a la carga durante 74 seg, para finalmente cambiar este valor a 32,5kW. La figura 4.3, muestra las variaciones antes mencionadas en la potencia consumida por la carga programable (estos datos fueron tomados desde el sistema SCADA). Cabe recalcar que el generador a diésel presenta una capacidad nominal de 30kW y cargas menores a la potencia nominal del mismo no tienen mayor incidencia sobre el comportamiento de la frecuencia de la red. Sin embargo, cuando la carga impuesta fue cercana o mayor a la capacidad del generador, se observaron variaciones en la frecuencia, y luego de una dinámica cuya velocidad de rotación disminuyó por debajo de la nominal de operación, el generador a diésel se apagó.

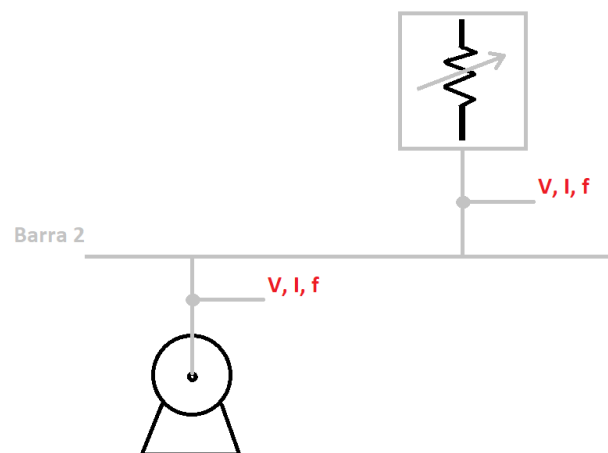


Figura 4.2: Diagrama de conexión: generador + carga programable

Dado que el presente trabajo de titulación utiliza un emulador del comportamiento de un sistema de red eléctrica mediante el uso del generador a diésel, y que este sistema representado con una escala considerablemente menor permite ser expuesto a variaciones de demanda energética elevada y poder operar en condiciones extremas en lo que respecta a frecuencia y tensión del sistema. Bajo las

condiciones antes mencionadas el sistema de energía puede emular la pérdida del suministro de energía eléctrica a un usuario final, condición que se conoce como apagón o *blackout* y ante esta situación es necesario aplicar rutinas que requieren de maniobras complejas. Pues las fallas en la red eléctrica son críticas en lugares donde el medio ambiente y la seguridad pública están en riesgo, y puede tener muchas causas como: fallas en las centrales eléctricas, daños en las líneas de transmisión eléctrica, subestaciones, cortocircuitos, etc.

En este sentido de pertinencia de sistemas de control que permiten evitar condiciones extremas de operación son importantes, es por esto que se propone un algoritmo de control de frecuencia para la gestión de demanda.

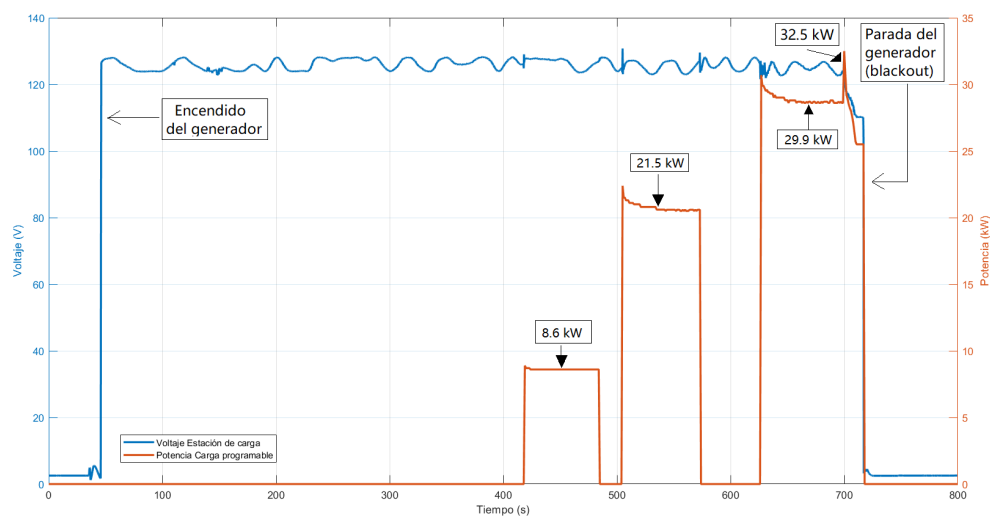


Figura 4.3: Potencia consumida por la carga programable (SCADA) y blackout del Generador (fluke)

El voltaje presente en la barra 2 muestra una dinámica acotada a los valores nominales en el momento de exponer el sistema a una carga de 32,5kW. En la figura 4.3 se puede observar la dinámica de parada del generador a diésel en el segundo 718 por haber sobrepasado su capacidad (*blackout*).

Es importante indicar que los datos tomados del analizador de energía fluke presentan mayor resolución ya que son capturados cada 0.25ms, comparados con los datos capturados por el SCADA que son capturados cada 1seg.

Para analizar el comportamiento de la frecuencia se presenta la Figura 4.4. La frecuencia medida ante variaciones de carga puede variar desde 48,3Hz hasta 65,3Hz, estos valores se encuentran fuera del rango permitido por el CONELEC [37]. En este estudio, luego de exponer al generador a 32,5kW presentó una repentina caída en la generación de energía hasta llegar a detenerse por completo. Estos valores son muy importantes y deben ser considerados para el proceso de ajuste en el proceso de carga inteligente de los vehículos eléctricos, que se realizará más adelante.

4.1.2. Escenario 2

En este escenario se realizaron pruebas de funcionamiento del generador a diésel y la carga programable, pero además se incluyó la estación de carga nivel 2 con el objetivo de analizar su comportamiento ante fluctuaciones de corriente. La conexión de los equipos se llevó a cabo tal como

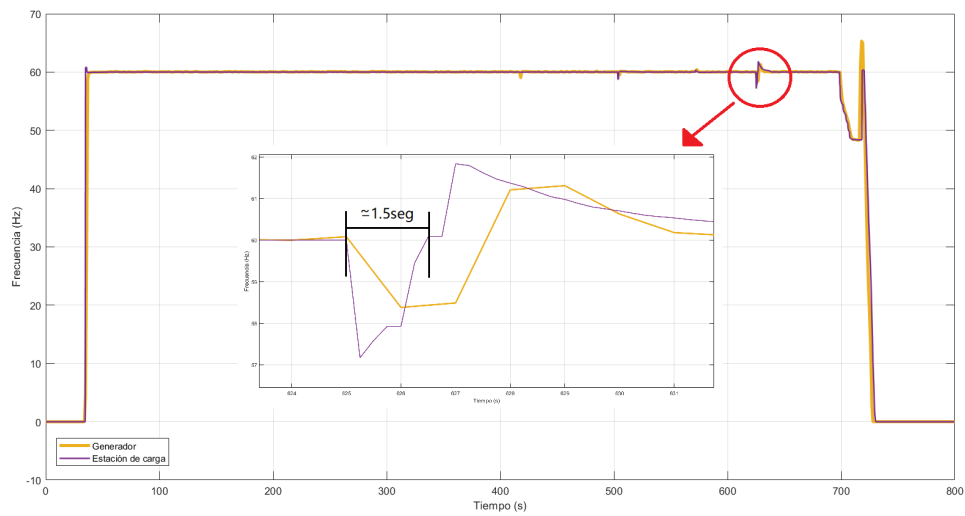


Figura 4.4: Frecuencia del generador a diésel (SCADA) y estación de carga (fluke) en el proceso blackout

se indica en la Figura 4.5. Una vez encendido el generador y conectada la carga programable, a esta última se le asigna un valor inicial de 8,6KW, pero durante la prueba se le asignan diferentes valores de referencia de consumo de potencia, a continuación se detallan el orden y duración de tiempo de estos cambios: se asignó 0kW por 19 seg, seguidamente 21,5kW durante 20 seg, luego 0kW por un lapso de tiempo de 66 seg, a continuación 21,5kW durante 6 seg y finalmente 0kW.

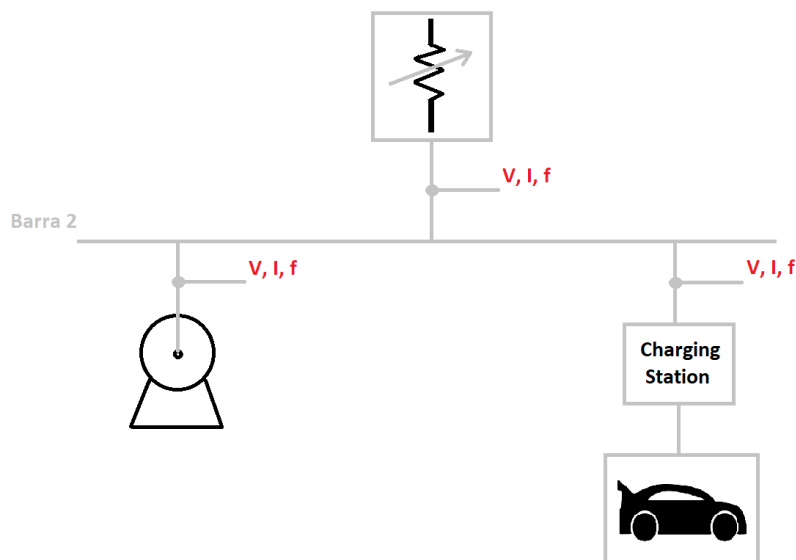


Figura 4.5: Diagrama de conexión: generador + carga programable + estación de carga EV

Previo al cambio de los valores de potencia de la carga programable, se conectó el vehículo eléctrico mediante el estándar SAE J1772 para dar inicio al proceso de carga y observar el comportamiento

del vehículo antes dichas variaciones. La figura 4.6 muestra las variaciones antes mencionadas de la potencia consumida por la carga programable (estos datos fueron tomados desde el sistema SCADA).

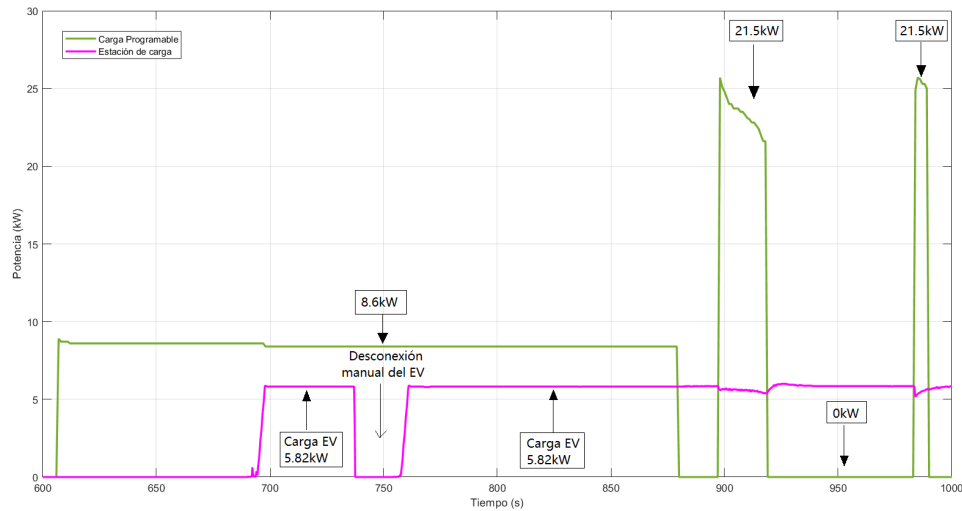


Figura 4.6: Potencia consumida por la carga programable (SCADA) y la estación de carga (fluke)

Para medir el consumo de potencia de la estación de carga nivel 2, se conectó el analizador de energía fluke al punto de acoplamiento común (PCC). La Figura 4.6 muestra las variaciones en la potencia consumida por la estación de carga debido a una desconexión manual del EV durante 24 seg, con el objetivo de observar el comportamiento del sistema. Sumando las potencias de la carga programable y de la estación de carga (5,8kW), esta no se supera la capacidad del generador a diésel y es posible observar variaciones en la frecuencia y tensión en el PCC que serán analizadas más adelante.

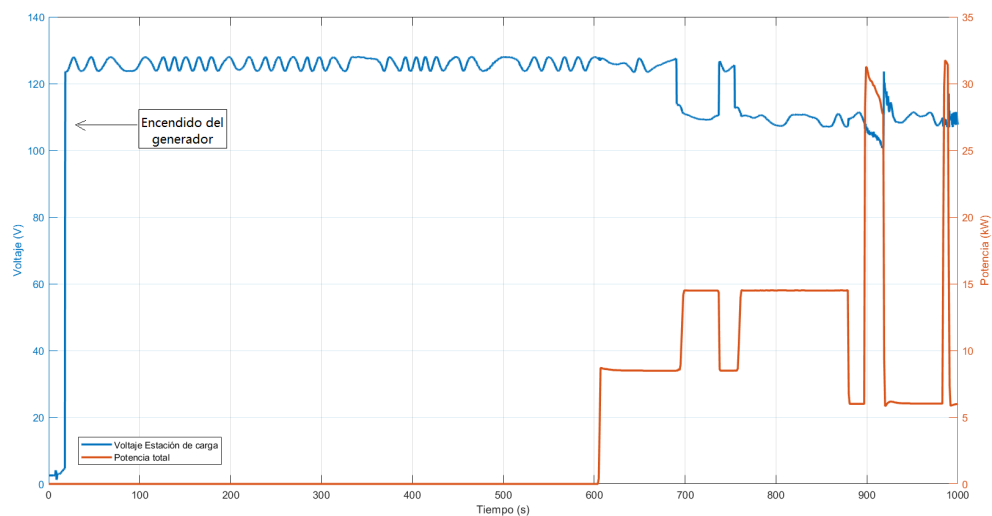


Figura 4.7: Potencia total consumida durante la prueba 2

El voltaje presente en la barra 2 observado en la Figura 4.7 muestra una dinámica acotada a los

valores nominales en el momento de exponer el sistema a variaciones de carga máximas de 27,3kW. Es notorio la presencia de fluctuaciones cuando el generador llegó casi a su límite, pero el sistema se recuperó satisfactoriamente. Esto se puede observar en el instante 919 cuando se fuerza a la carga a reducirse hasta alcanzar 5.2kW, permitiendo aliviar al generador, así de forma instantánea él regresa a su operación normal, con lo que se observa que la tensión regresa a su valor nominal instantáneamente. Esto es lo que se desea lograr con el presente trabajo de titulación, es decir, poder bajar el consumo de potencia de las estaciones de carga nivel 2 cuando se perciban reducciones de la frecuencia en la red eléctrica debido a la sobrecarga en la misma.

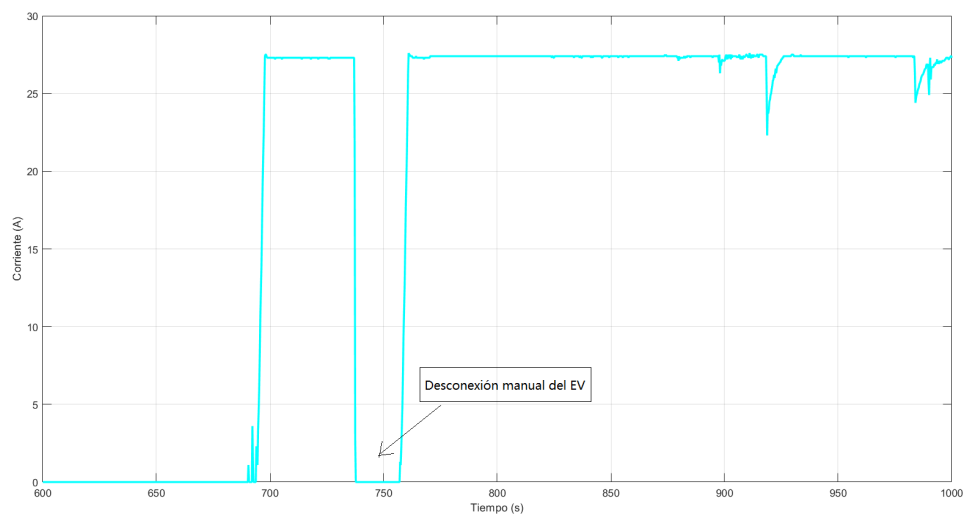


Figura 4.8: Corriente de la estación de carga nivel 2 (Fluke)

La corriente de la estación de carga se muestra en la Figura 4.8, misma que toma valores de 27,4A.

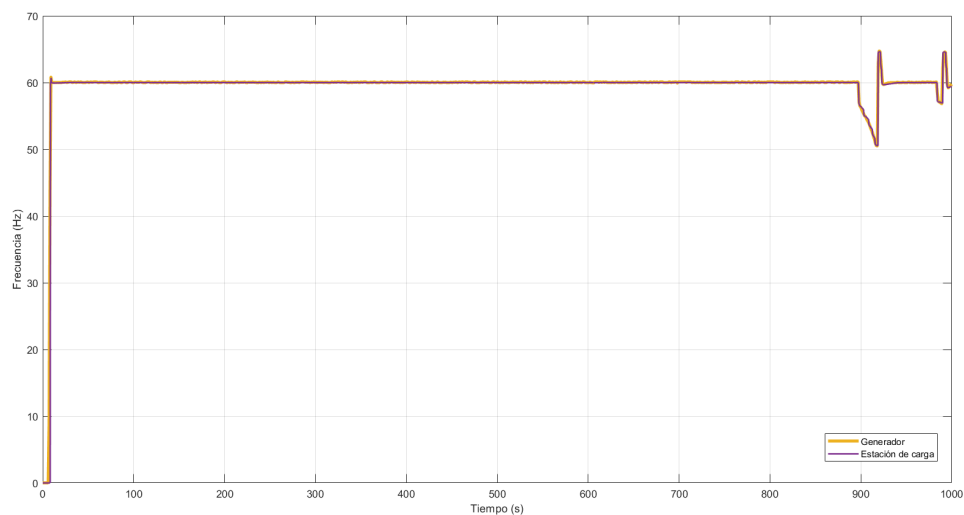


Figura 4.9: Frecuencia de la estación de carga 2 (fluke)

Examinando la Figura 4.9 se puede notar claramente las variaciones en la frecuencia de la red cuando se expone el sistema a cargas elevadas, es decir, la frecuencia en la estación de carga cae hasta 50,55Hz en su pico mínimo, pero al disminuir la carga (potencia de consumo de la carga programable) la frecuencia vuelve a su valor nominal de 60Hz, producto de la participación del AVR del generador y los picos mayores a 60Hz son ocasionados por la inercia del motor de la carga programable al bajar su consumo de potencia. Se observa el mismo efecto para los valores de frecuencia medidos en el generador de diésel, pero aquí el pico mínimo es igual a 50,52 Hz.

Las primeras pruebas ejecutadas no fueron concluyentes, pues su fin era demostrar que se presentan variaciones de frecuencia cuando la demanda de la carga llega a un valor cercano al de la potencia nominal de la fuente.

4.2. Caracterización del comportamiento del vehículo eléctrico durante el proceso de carga lenta

El laboratorio de Microrred Balzay cuenta con un vehículo eléctrico modelo Soul del fabricante KIA (Corea) con autonomía aproximada de 200Km, con motor-generador síncrono de imanes permanentes, batería de polímeros de ion-litio de 90kW y capacidad de 27kWh. Este incorpora materiales amigables con el medio ambiente en su interior, posee un sistema virtual de sonido que emite un sonido musical para que los peatones puedan escuchar cuando se aproxima y cuenta con un indicador de estado de carga ubicado en el tablero frontal, es un monitor semicircular de 3 indicadores LED. Es un vehículo ligero y eficiente para manejo dentro de la ciudad, alcanza velocidades de 145Km/h [32].



Figura 4.10: Vehículo eléctrico modelo Kia Soul

También se cuenta con un vehículo eléctrico modelo e5 del fabricante BYD (China) ideal para la ciudad, su batería de hierro fosfato de 160kW/214hp puede alcanzar velocidades de 130Km/h y tiene una capacidad de 60.5kWh. Le brinda al usuario una autonomía de 400Km nominal/300km real, así como un ahorro de costos de carga del 58 %. Los vehículos BYD son eficientes, cómodos y amigables

con el medio ambiente ya que producen cero emisiones de CO₂ [45].



Figura 4.11: Vehículo eléctrico modelo BYD e5

En la tabla 4.1 se resumen las principales características de los vehículos eléctricos antes descritos. Estos EVs pueden cargarse mediante una estación de carga nivel 2 bajo el estándar SAE j1772 con el modo 3 de carga.

Tabla 4.1: Resumen comparativo de los vehículos eléctricos Kia Soul y BYD e5

Características	Kia Soul	BYD e5
Precio	\$30.990	\$34.900
Potencia máxima	81.4kW/108hp	160kW/214hp
Batería	Litio	Hierro fosfato
	Capacidad 27kWh	Capacidad 60.5kWh
Autonomía	200km	300km
Tiempo de carga	5 horas	6 - 7 horas
	220V/30A	
Velocidad	145Km/h	130Km/h

Se realizaron pruebas con ambos vehículos eléctricos disponibles, para observar el comportamiento de los mismos, especialmente el tiempo de respuesta de estos vehículos ante variaciones en el ciclo de trabajo. Gracias a estas pruebas se tendrá una idea más clara de cómo y en cuánto tiempo debe actuar el algoritmo de control de frecuencia propuesto.

Una vez conectado el estándar SAE j1772 de la estación de carga lenta al vehículo eléctrico, se inicia el proceso de carga. Inicialmente se tiene un ciclo de trabajo de 50 % durante el proceso de carga, pero después de un determinado tiempo y gracias a la manipulación del código fuente del microcontrolador, este ciclo de trabajo toma automáticamente el valor de 30 %. Es importante mencionar que el vehículo eléctrico disponible está limitado a una potencia de 5,7kW que corresponde a un ciclo de trabajo aproximado del 50 %, y mediante esta prueba se pretende analizar la respuesta del EV ante un decremento importante de la potencia de consumo, por ello se redujo la potencia de consumo a la mitad (aproximadamente 2,4kW) que corresponde a un ciclo de trabajo de 30 %.

4.2.1. Kia Soul

Se realizaron capturas durante 3 segundos empleando el osciloscopio conectado en la estación de carga nivel 2, donde se midieron la corriente y señal piloto (PWM). En la figura 4.12 se puede observar la reducción de la corriente cuando se cambia el ciclo de trabajo de 50 % a 30 %, el EV Kia tarda aproximadamente 2 segundos en estabilizar el valor de corriente, por ende, también su potencia de consumo, que viene dada por la ecuación 4.1.

$$P[kW] = V * I \quad (4.1)$$

Como se puede observar en la Figura 4.13 el EV empieza a responder luego de 2,5 ciclos de onda desde que se realizó el cambio de la señal piloto, es decir, comienza a reducir su potencia de consumo. Pero le toma 280ms alcanzar el 50 % de su objetivo y consigue estabilizarse por completo a los 1.82 seg luego de efectuar el cambio el ciclo de trabajo.

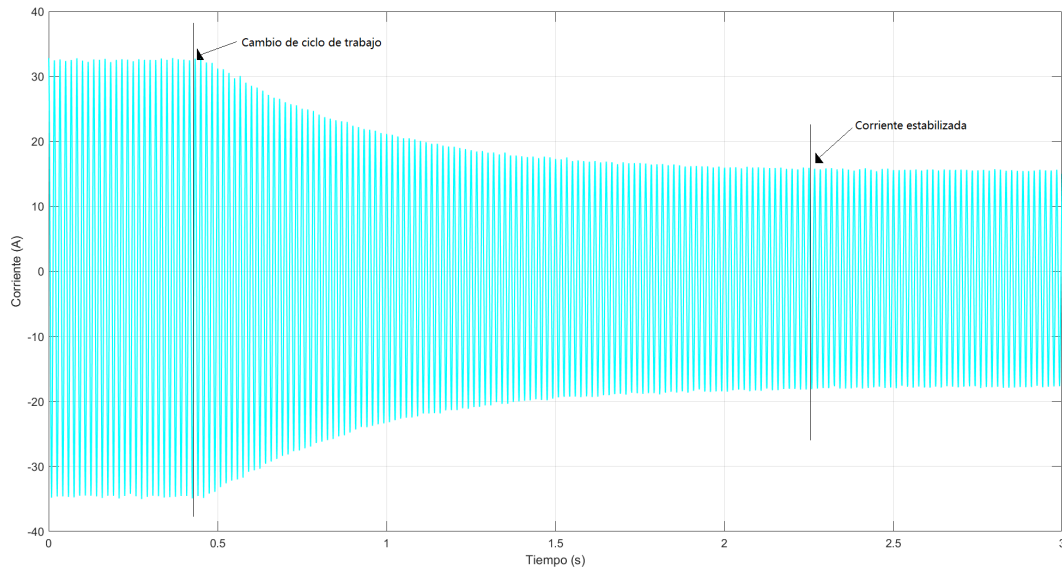


Figura 4.12: Corriente consumida por el EV Kia Soul (Osciloscopio)

En la Figura 4.14 se observa la frecuencia con los dos ciclos de trabajo. En la izquierda se representa la frecuencia con el ciclo de trabajo inicial (50 %) mientras que en la gráfica del lado derecho se observa la frecuencia con el ciclo de trabajo final (30 %).

En ambos casos se tiene un valor de frecuencia igual a 60Hz, el cual se obtiene de la ecuación 4.2.

$$f[Hz] = \frac{1}{T} \quad (4.2)$$

Donde T es el período transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda (ciclo), medido en segundos. Para conocer el período se ha tomado un ciclo de la onda y medido los valores de cruce por cero de la misma, con lo que se obtiene un periodo igual a 16.6ms.

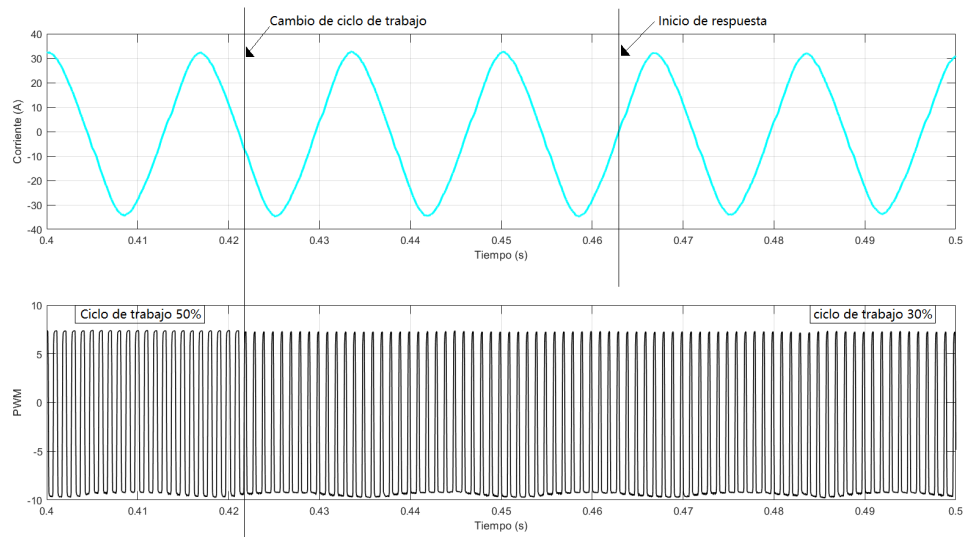


Figura 4.13: Tiempo de respuesta del EV Kia Soul frente a cambios en el ciclo de trabajo

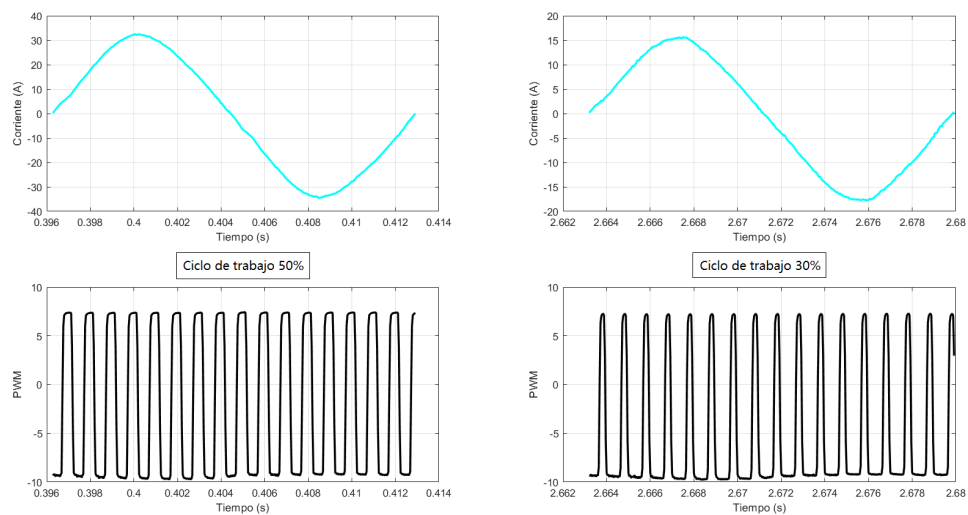


Figura 4.14: Frecuencia del EV Kia Soul con ciclo de trabajo de 50 % y 30 % respectivamente

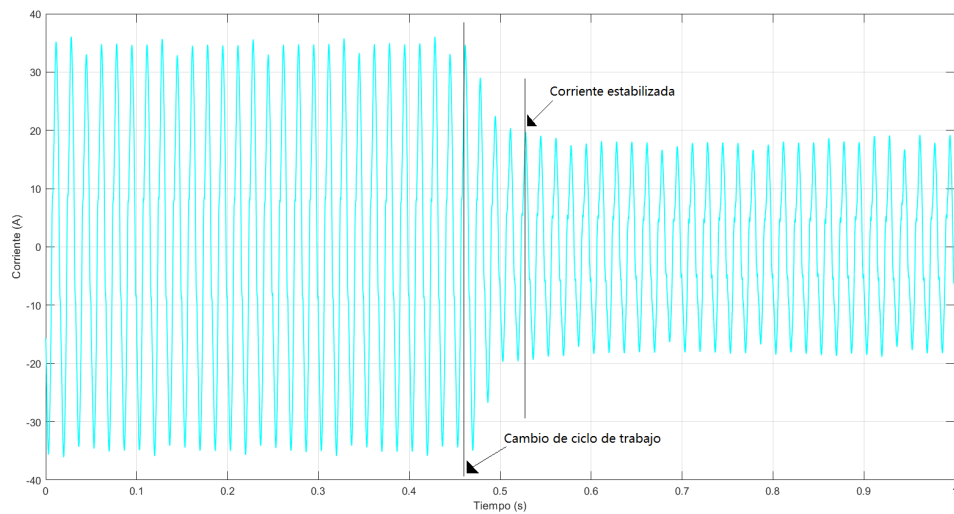


Figura 4.15: Corriente consumida por el EV BYD e5

4.2.2. BYD e5

Para el vehículo eléctrico BYD e5 se realizaron mediciones durante 1 segundo y al igual que en la prueba anterior, se midió la corriente y la señal piloto (PWM) con el osciloscopio. Tal como se observa en la Figura 4.15 la reducción de la corriente una vez cambiada la señal PWM de 50 % a 30 % tarda aproximadamente 83ms en estabilizarse.

El EV BYD e5 empieza a responder luego de 1 ciclo de onda desde que se realizó el cambio de la señal piloto, es decir, comienza a reducir su potencia de consumo tal como se observa en la Figura 4.16. Este vehículo responde bastante rápido ante cambios en la señal piloto y reacciona 2 veces más rápido que el Kia, pero presenta un poco de ruido en las señales capturadas.

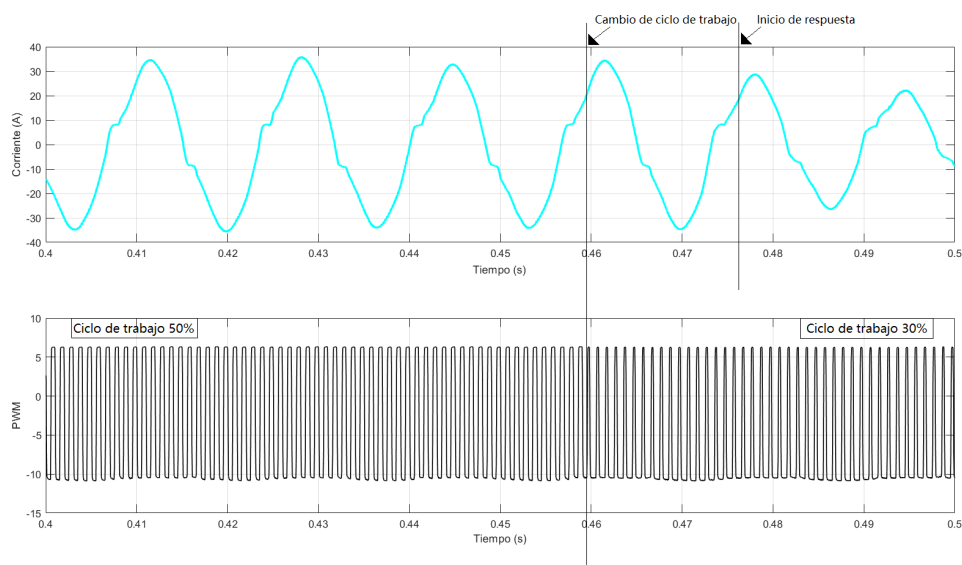


Figura 4.16: Tiempo de respuesta del EV BYD e5 frente a cambios en el ciclo de trabajo

Finalmente, en la figura 4.17 se presenta la frecuencia para los ciclos de trabajo de 50 % y 30 %. En la izquierda se representa la frecuencia con un ciclo de trabajo de 50 % mientras que en la gráfica del lado derecho se observa la frecuencia con un ciclo de trabajo de 30 %. En ambos casos se tiene un valor de frecuencia igual a 60Hz al sustituir el valor de periodo en la ecuación anterior. De igual manera, para conocer el período hemos tomado un ciclo de la onda y medido los valores de cruce por cero de la misma, con lo que se obtiene un periodo igual a 16.6ms.

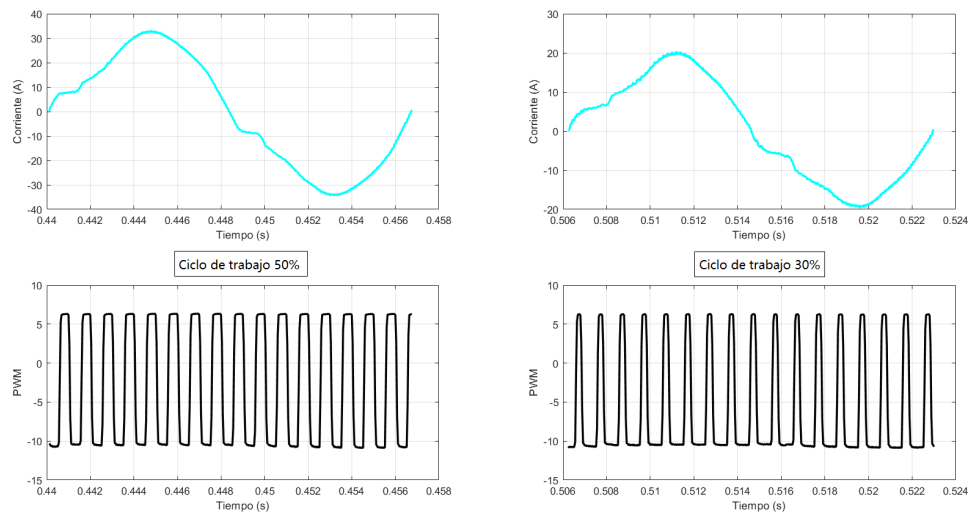


Figura 4.17: Frecuencia del EV BYD e5 con ciclo de trabajo de 50 % y 30 % respectivamente

Realizados los cálculos antes descritos se concluye que la frecuencia se mantiene constante, lo que resulta favorable para la continuidad del trabajo de titulación.



Pruebas y Resultados

En este capítulo se detallan los equipos de medición especializados empleados para las respectivas mediciones durante las pruebas, así como los programas necesarios para el procesamiento de datos recolectados para el análisis de resultados. Además, se describirán las pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto para la regulación de frecuencia mediante el control de demanda de vehículos eléctricos.

5.1. Programas y Equipos de medición

5.1.1. Programas de simulación y programación

5.1.1.1. Matlab

Matlab es un programa con múltiples beneficios para resolver problemas complejos mediante la ejecución de cálculos matemáticas y la visualización gráfica de los resultados. Es por ello que cuenta con varios toolboxes de apoyo para muchas áreas de estudio, entre ellas la ingeniería. Matlab cuenta con toolboxes para el procesamiento de imágenes, redes neuronales, control robusto, simulación de sistemas dinámicos, entre otras.

Se utilizó este programa para realizar gráficas de los datos capturados por los equipos de medición empleados, para posteriormente realizar las respectivas comparaciones y obtener los resultados para cada prueba realizada.



Figura 5.1: Software Matlab

5.1.1.2. Fritzing

Fritzing es un programa open source especializado para el diseño electrónico, que dispone de bibliotecas con la mayoría de componentes, además permite hacer esquemas eléctricos, diseñar un PCB final y un sinnúmero de opciones que convierten a este programa en una herramienta de automatización de diseño electrónico muy útil. Fritzing fue creado bajo los principios de Processing y Arduino, que cuenta con un sitio web comunitario que fomenta la creatividad que permite a los usuarios documentar sus prototipos, compartirlos con otros, diseñar y fabricar PCBs profesionales.

Por ello se ha decidido emplear este software para el diseño del circuito de control de potencia.



Figura 5.2: Software Fritzing

5.1.1.3. Arduino IDE

El software de Arduino consiste de dos elementos: un entorno de desarrollo integrado (IDE), y en el cargador de arranque (bootloader) que es ejecutado automáticamente dentro del microcontrolador en cuanto éste se enciende. Las placas Arduino se programan mediante un computador, usando comunicación serie.

El IDE del Aduino es una aplicación multiplataforma escrita en Java que admite los lenguajes C y C++. El código escrito por el usuario solo requiere dos funciones básicas, para iniciar el boceto y el ciclo principal del programa. Es bastante sencillo de programar, pues cuenta con múltiples librerías que se pueden descargar según sea necesario, las cuales traen ejemplos que sirven de guía a los usuarios.



Figura 5.3: Software Arduino IDE

5.1.1.4. MikroC

El software del microcontrolador se basa en el lenguaje C estándar con soporte adicional para bibliotecas y funciones para la programación de microcontroladores PIC. MikroC ofrece una interfaz gráfica de usuario GUI, permitiendo al usuario programar usando un editor incorporado, incluye todas las herramientas necesarias para desarrollar los proyectos (editor, depurador etc.).

El compilador mikroC también proporciona herramientas que simplifican el proceso de programación, un ejemplo de ello es el terminal USART.



Figura 5.4: Software MikroC PRO for PIC

5.1.2. Equipos de medición

Las pruebas realizadas ayudaron a comprobar el correcto funcionamiento del circuito propuesto para la gestión de demanda del EV durante el proceso de carga. Para ello se utilizó el vehículo eléctrico propiedad de la Universidad de Cuenca disponible en el Laboratorio de microrred ubicado en el campus Balzay ayudado de varios dispositivos electrónicos entre los que se encontraban analizador de energía fluke y AEMC, osciloscopio y sonda de corriente.

5.1.2.1. Osciloscopio

El osciloscopio permite observar los valores de las señales eléctricas (oscilograma) en forma de coordenadas en una pantalla, en la que el eje X representa tiempos y el eje Y representa tensiones.

El osciloscopio digital modelo Tektronix DPO4104B (Figura 5.5) de 4 canales empleado para la captura de señales tiene una velocidad de muestreo de 5 GS/s, Longitud de Registro de 10 Mp; cuenta con conexiones: USB/LAN; Display a Color, con Tecnología de Fosforo Digital.



Figura 5.5: Osciloscopio digital marca tektronix modelo DPO4104

5.1.2.2. Analizador de calidad de energía

Los analizadores de calidad de energía Fluke modelo 435 (Figura 5.6a) y AEMC modelo C.A. 8333 (Figura 5.6b) son instrumentos que miden, recolectan, muestran y almacenan algunas variables eléctricas como: voltaje de línea y fase, corriente de línea, energía aparente, energía activa, energía reactiva, distorsión THD de corriente y voltaje, y factor de potencia; en forma de histogramas, gráficas



(a) Fluke 435 Serie II

(b) AEMC modelo 8333

Figura 5.6: Analizador de calidad de energía

fasoriales, formas de onda y espectros armónicos.

El analizador Fluke realiza mediciones cada 0.25ms, mientras que el AMEC realiza capturas cada 1seg. Los datos capturados por ambos equipos se pueden descargar en un computador con la ayuda de programas especiales para cada uno de ellos, PowerLog para el fluke y PowerPad III para el AEMC.

5.1.2.3. Generador de funciones

El generador de funciones HMF2525 (Figura 5.7) es un equipo de medición de precisión de alto rendimiento que genera diversas formas de onda: seno, cuadrado, triángulo/rampa, pulso y arbitrario a un rango de frecuencia de 10 μ Hz a 25/50 MHz y con tensiones de salida entre 5 mV a 10 V (Vpp). Este equipo se utilizó para probar el funcionamiento y comportamiento en estado estacionario del analizador de frecuencia implementado.



Figura 5.7: Generador de funciones marca ROHDE&SCHWARZ modelo HMF2525

5.2. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas del circuito para el control de frecuencia mediante gestión de demanda implementado se realizaron por partes, con el objetivo de probar que cada sección funcione correctamente.

5.2.1. Algoritmo de regulación de frecuencia

Este bloque está compuesto por un circuito de transformación y reducción de tensión seguido del algoritmo de medición de frecuencia y finalmente de un algoritmo de control de potencia.

5.2.1.1. Acondicionamiento de la señal de entrada

La figura 5.8 muestra la señal de tensión de entrada a partir de la cual se mide la frecuencia y cuya salida es enviada al microcontrolador para proceder a ejecutar la acción adecuada con respecto al valor leído. Esta señal es la que se obtiene a la salida del transformador de voltaje que tiene una amplitud de 24.6V CA, la misma que mediante un circuito divisor de tensión se reduce a una amplitud de 3.8V CA.

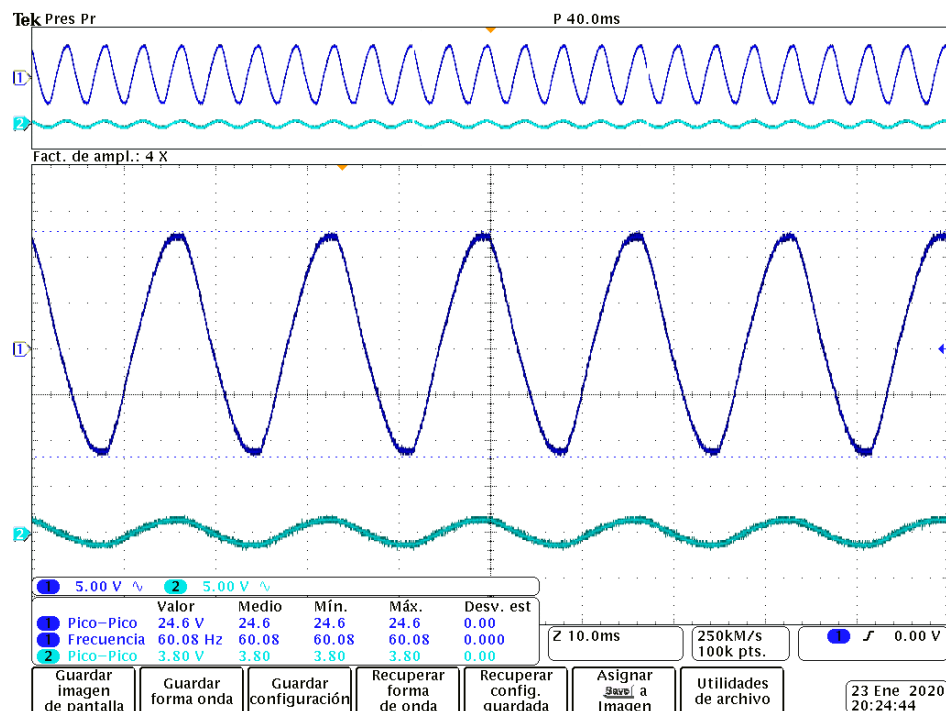


Figura 5.8: Voltaje de entrada al circuito medidor de frecuencia

El circuito divisor de tensión empleado se muestra en la Figura 5.9. A partir del cual mediante cálculos relativamente fáciles se podrá reducir la tensión de entrada al valor deseado según la aplicación. La ecuación 5.1 representa la función de este circuito. A partir del cual se podrá despejar la variable que se desea conocer.

$$V_{out} = \frac{V_{in} R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (5.1)$$

Conociendo el valor de voltaje de entrada, así como el voltaje de salida que se desea obtener, e

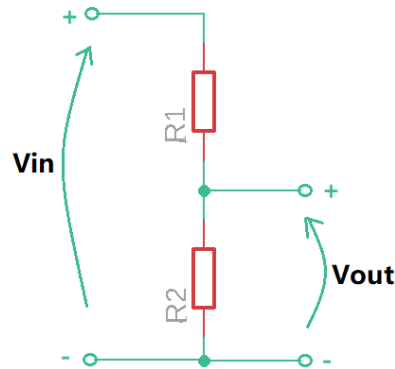


Figura 5.9: Circuito divisor de tensión

imponiendo un valor de resistencia para R_1 , es posible despejar la incógnita R_2 , la cual está descrita por la ecuación:

$$V_{out} = \frac{V_{out} R_1}{(V_{in} - V_{out})} \quad (5.2)$$

Dónde al reemplazar los valores de $V_{in}=24.6V$, $V_{out}=4V$ y $R_1=10K\Omega$ en la ecuación 5.2 se obtiene un valor de $R_2=1.45k\Omega$, pero este valor no es comercial, así que se usó el valor más cercano, es decir de $1.5k\Omega$.

Luego de esto, la señal obtenida es pasada por un amplificador sumador no inversor (Figura 5.10) para darle un offset y esté lista para ser introducida por el puerto analógico del Arduino para su respectiva medición de frecuencia. Este paso es de vital importancia dado que el puerto analógico sólo puede muestrear señales de tensión en del rango dinámico del ADC (0V - 5V), esto se logra dándole un offset de 1.21V a la señal proveniente del circuito divisor de tensión.

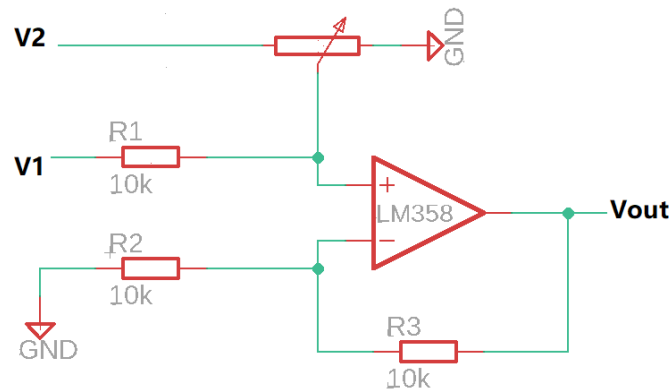


Figura 5.10: Circuito sumador no inversor

El circuito de la Figura 5.10 cumple con la ecuación:

$$V_{out} = V_1 + V_2 \quad (5.3)$$

La señal mostrada en la Figura 5.11 es la señal que ingresa al puerto AN0 del Arduino Due y se utiliza para medir la frecuencia mediante la FFT. Se puede observar una caída de tensión debido al

rendimiento del transformador y que al momento de conectarse una carga (amplificador operacional), debido a la impedancia del secundario del transformador se tiene una caída de tensión en la señal de tensión. Pero esto no afecta al funcionamiento del algoritmo para la medición de frecuencia de la red.

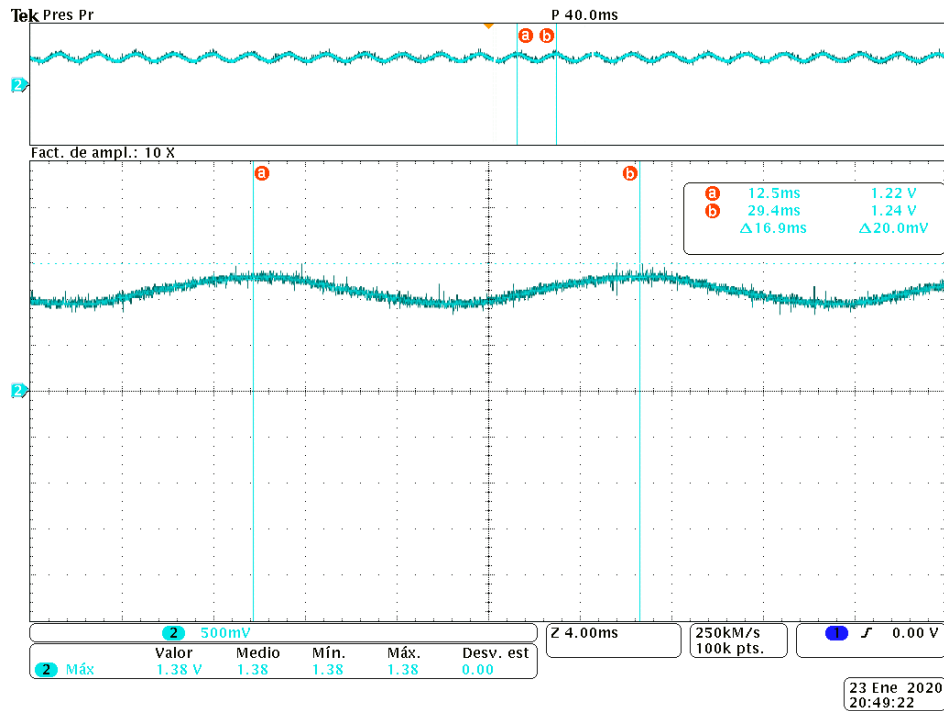


Figura 5.11: Señal que ingresa al puerto analógico del Arduino Due

5.2.1.2. Medición de frecuencia

Para analizar y probar este concepto se procedió a realizar dos tipos de pruebas: pruebas de estado estacionario y pruebas dinámicas de medición de frecuencia de la red.

Las primeras pruebas realizadas fueron las pruebas en estado estacionario. Donde se contrasta las mediciones de frecuencia de la señal proveniente del generador de funciones con respecto a la metodología empleada (FFT), efectuando un barrido de frecuencia en el rango de 55Hz a 65Hz con pasos de 0.2Hz. Las mediciones obtenidas como se observan en la Figura 5.12 denotan un error promedio de 0.08Hz con respecto a los valores de referencia. La resolución de la metodología implementada permite analizar cambios de frecuencia en el rango de valores aptos para establecer un control primario de frecuencia. No se hace un énfasis en la precisión de los sistemas de medición, dado que los objetivos de este trabajo de titulación están enfocados en el concepto de gestión de carga de EVs.

Las pruebas dinámicas se detallarán en la sección 5.3.

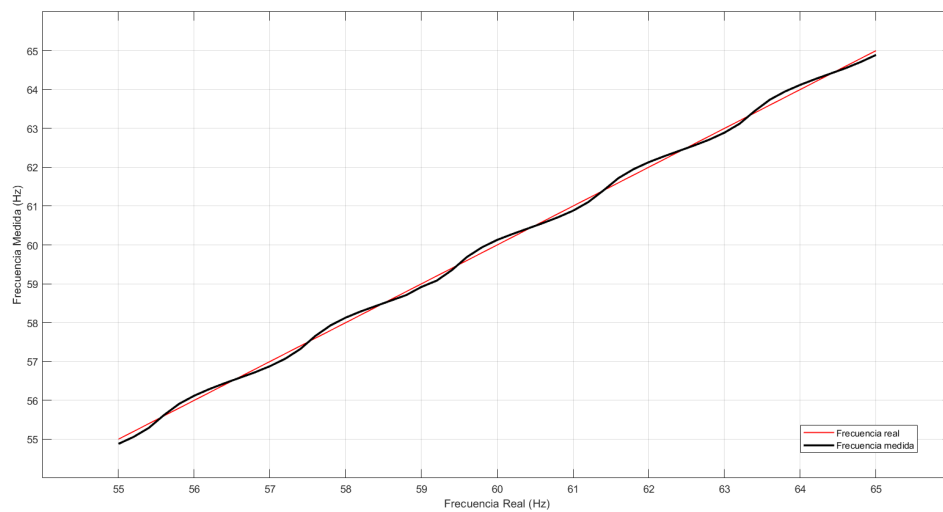


Figura 5.12: Medición de frecuencia mediante la FFT

5.2.1.3. Cambio del ciclo de servicio

Una vez obtenido el valor de la frecuencia, el algoritmo de control procede a cambiar el valor del ciclo de trabajo del PWM de la señal piloto que corresponda a la frecuencia medida, tal como se detalla en la Tabla 3.4. Los resultados fueron favorables, una muestra de ello se observa en la Figura 5.13, aquí se realizó un cambio en la frecuencia a 59Hz, para el cual, el ciclo de trabajo correspondiente es 35 %.

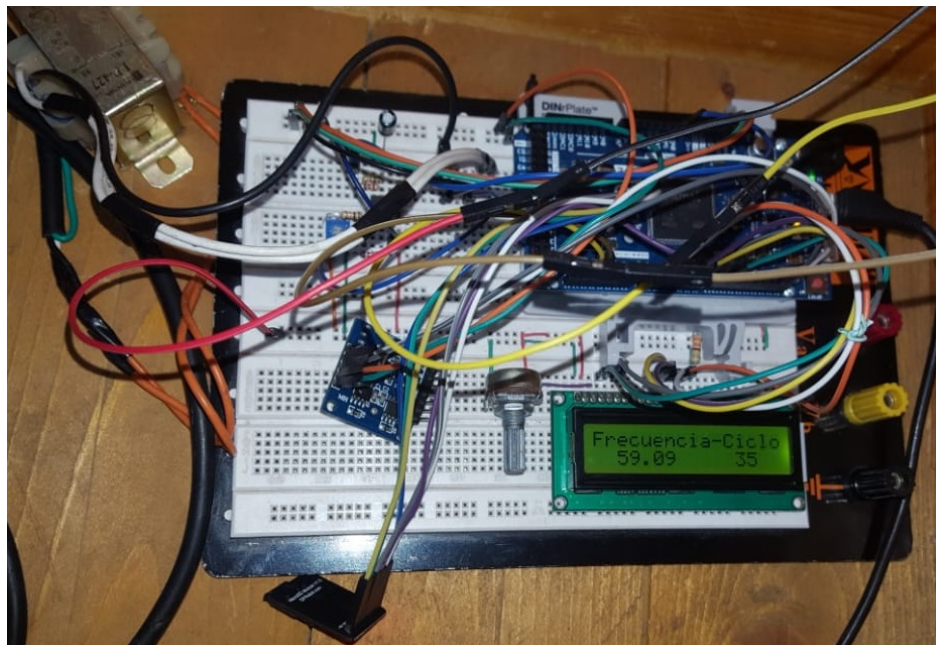


Figura 5.13: Funcionamiento del algoritmo FFT para el cambio de ciclo de servicio

5.3. Evaluación del funcionamiento del algoritmo de gestión de demanda en el proceso de carga lenta de EVs

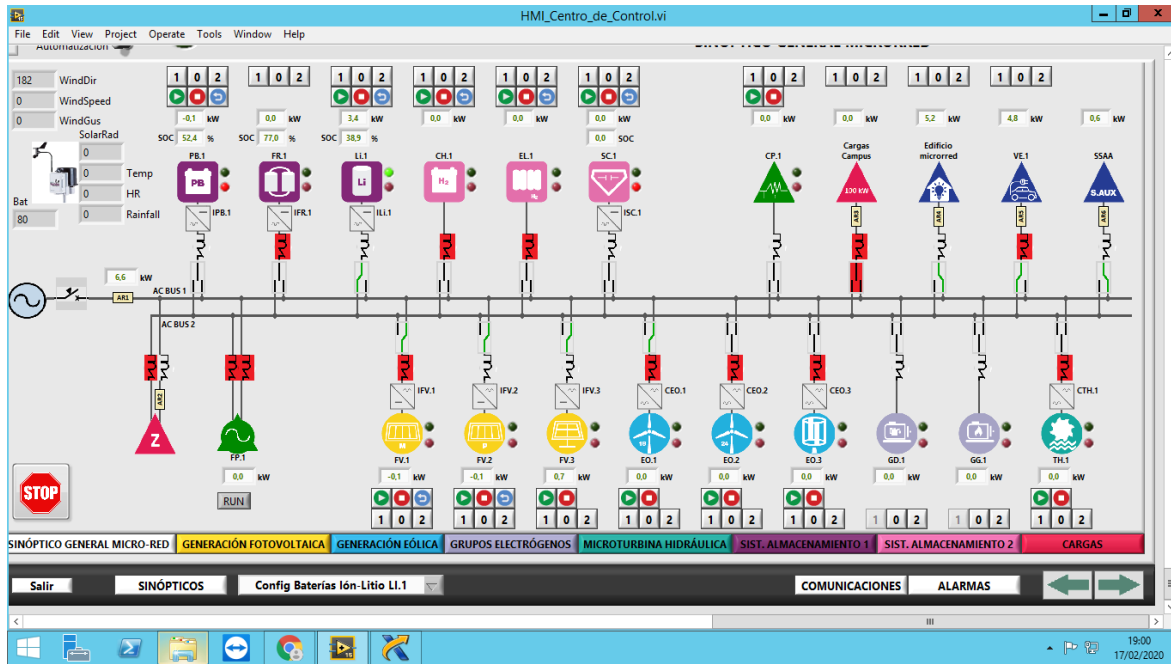


Figura 5.14: Diagrama de configuración empleado para las pruebas experimentales

Se utilizó la estructura presente en el Laboratorio de microrred de Balzay para llevar a cabo la ejecución de pruebas experimentales, con el propósito de evaluar el funcionamiento del algoritmo de control de frecuencia mediante la gestión de demanda del vehículo eléctrico desarrollado e implementado en este trabajo. Es así que para las pruebas se utilizó la capacidad del inversor de la batería de ion-litio conectado a la barra 2 que permite operar como maestro, al cual es posible fijar valores de tensión y frecuencia de operación y manipularlos según sea necesario. A ésta misma barra que se encuentra aislada, se conectó también la estación de carga lenta; con esto se logra que toda la energía proveniente de la batería fluya directamente hacia el EV. La Figura 5.15 muestra la configuración empleada para la evaluación del algoritmo de control primario de frecuencia.

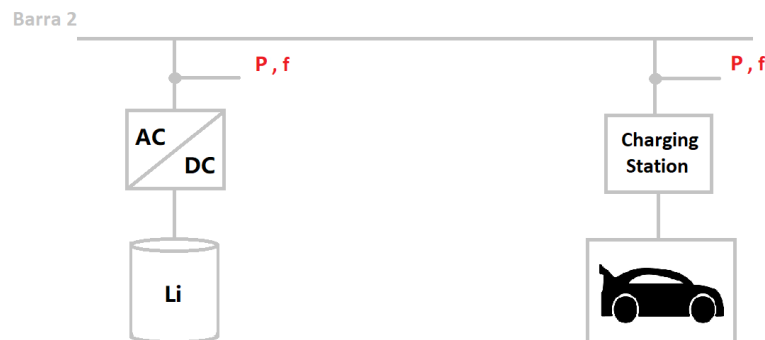


Figura 5.15: Diagrama de conexión: inversor + estación de carga EV

En pruebas preliminares se empleó otra configuración, es decir, se alimentaba la barra 2 con el generador a diésel y se forzaban modificaciones de la frecuencia mediante la conexión de una carga programable. Pero dicha configuración no permitía tener una frecuencia de estudio deseada en todo momento, lo que no resultaba factible para el proceso de programación y configuración del algoritmo de control implementado, motivo por el cual fue descartada.

5.3.1. Prueba 1

La frecuencia de muestreo del analizador de energía es de 1seg y la velocidad de respuesta del vehículo eléctrico es aproximadamente 2seg. Tomando en cuenta ambas condiciones y basándonos en una de las premisas en control que manifiesta que el sistema funciona a la velocidad del componente mas lento, entonces este tiempo de muestreo es más que suficiente para proceder a realizar las pruebas.

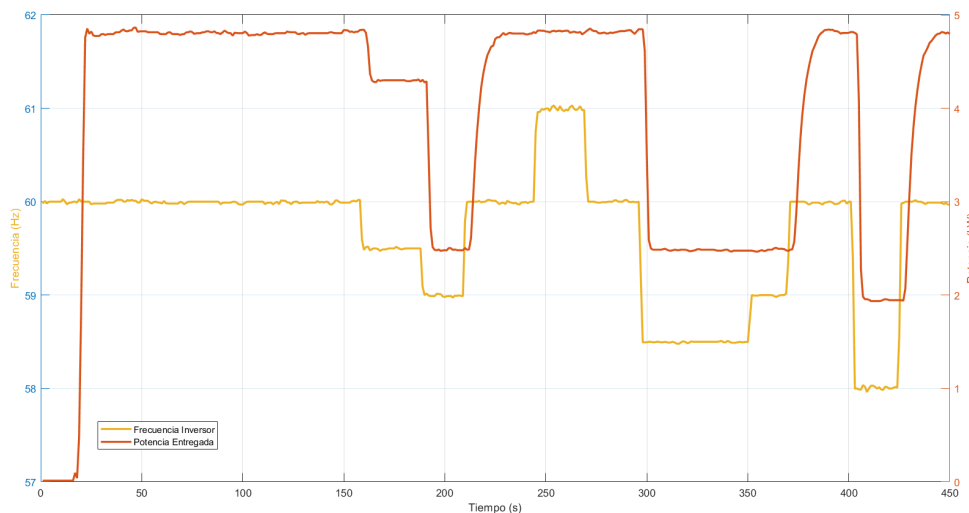


Figura 5.16: Variaciones de frecuencia en el inversor y de potencia entregada al vehículo eléctrico durante la prueba 1 (SCADA)

Se inician las pruebas del algoritmo de regulación de frecuencia implementado a una frecuencia nominal de 60Hz, lo que se traduce en una potencia de consumo del vehículo de 4.8kW (valor registrado por el Sistema SCADA). El primer cambio de frecuencia realizado es a 59.5Hz y se observa que la potencia de consumo del EV se reduce a 4.3kW en un lapso de tiempo de aproximadamente 2 segundos, es necesario esperar cerca de 10 seg hasta que el sistema se estabilice (5 veces la constante de tiempo del sistema), para realizar otro cambio de la frecuencia del inversor. Al realizar otro cambio en la frecuencia a 59Hz, se observa que la potencia se sigue reduciendo hasta llegar al valor de 2.48kW. El siguiente cambio realizado en la frecuencia es de 60Hz, aquí se observa que la potencia vuelve a subir a su valor nominal (4.8kW) debido al cambio de referencia del ciclo de trabajo del PWM de la señal piloto enviada por la estación de carga hacia el vehículo, manipulada por la frecuencia de la red medida. Seguidamente se sube la frecuencia al valor de 61Hz y luego se reduce a 60Hz y, en ambos casos se puede observar que la potencia de consumo del Kia no varía (es decir sigue siendo la nominal 4.8kW). Esto debido a que el algoritmo implementado no ejecuta ningún control cuando se tienen

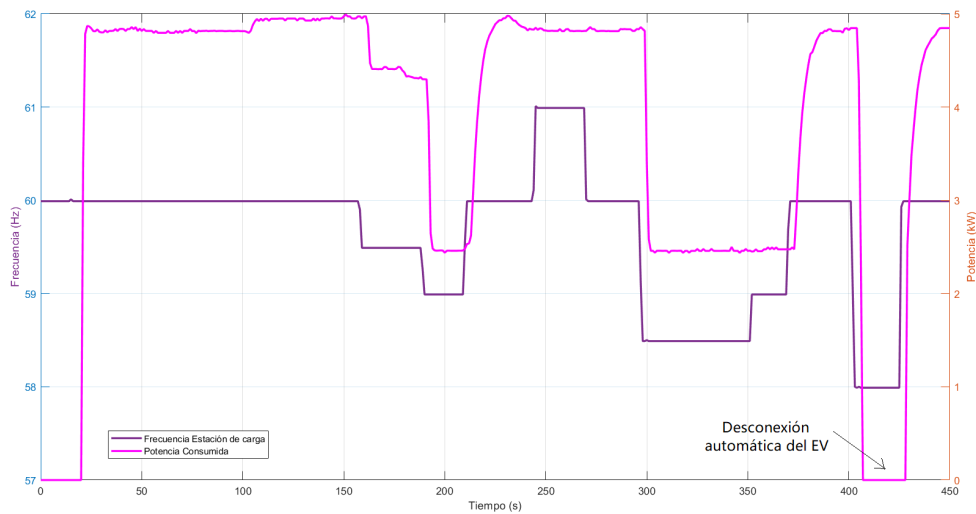


Figura 5.17: Variaciones de frecuencia y de potencia de consumo del EV durante la prueba 1 (AEMC 8333)

frecuencias superiores a 60Hz, ya que la capacidad de carga del vehículo limita estas acciones. Luego de esto se realiza un cambio brusco de frecuencia al valor de 58.5Hz y se observa que la potencia de entrega al vehículo baja a 2.48kW. Seguidamente se sube la frecuencia del inversor hasta el valor de 59Hz y cuando el sistema se estabiliza se observa que la potencia se mantiene en el valor de 2.48kW. Al subir la frecuencia al valor nominal de 60Hz, la potencia de consumo del EV vuelve a su valor nominal de 4.8kW. Luego se baja la frecuencia hasta 58Hz y se observa que la potencia entregada baja de golpe a 1.94kW, y debido a las características propias del vehículo, este se desconecta por completo cuando la frecuencia de la red se encuentra por debajo de los 58Hz. Finalmente volvemos a colocar una frecuencia nominal de 60 Hz y el sistema de carga se restablece a una potencia nominal de 4.8kW. La Figura 5.16 muestra las variaciones de frecuencia realizadas en el inversor de la batería ion-litio (Sistema SCADA) y la potencia entregada por el mismo al EV.

Los datos obtenidos en el sistema SCADA se comparan con los datos capturados por el analizador de energía AEMC. Todos los cambios de frecuencia y potencia realizados por el algoritmo implementado durante el proceso de carga del vehículo eléctrico antes mencionado, se muestra en la figura 5.17. Con ello se concluye que el algoritmo realiza el control de demanda correctamente de acuerdo a las variaciones de frecuencia correspondientes, previamente configuradas.

El sistema implementado inicia la reducción de potencia de consumo del EV 3 seg después de detectar el cambio de frecuencia. Es decir, al algoritmo le toma 1,18 seg actuar, ya que los 1.82 seg restantes son los que le toma el vehículo eléctrico realizar el cambio del PWM, esto se puede observar con detalle en la Figura 5.18).

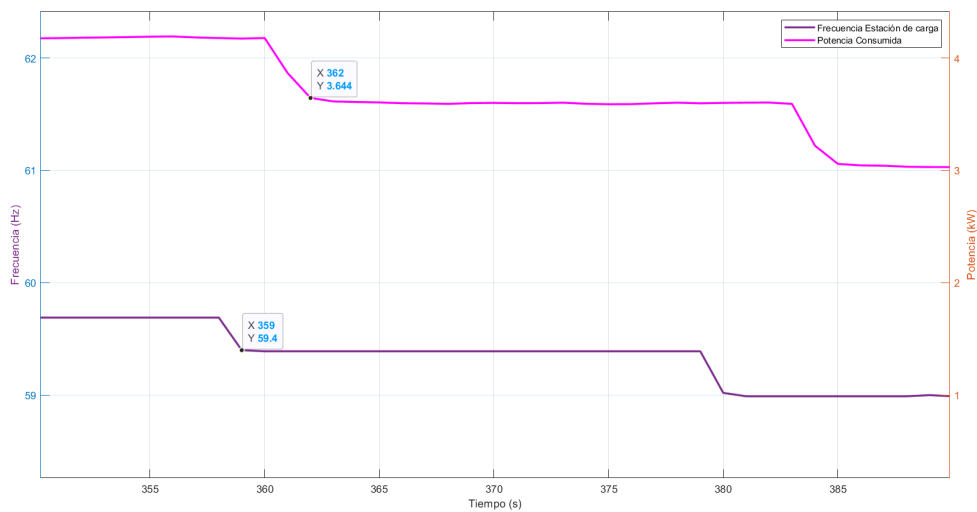


Figura 5.18: Tiempo de respuesta del algoritmo de control primario de frecuencia-potencia implementado

5.3.2. Prueba 2

Como se indicó en el capítulo anterior, se hizo un data logger para almacenar los valores de frecuencia medidos por el circuito analizador de frecuencia implementado en el Arduino Due, al igual que el ciclo de trabajo correspondiente para cada medida obtenida por el algoritmo de control. Esto con el fin de poder comparar la precisión de las mediciones del algoritmo implementado con respecto a las mediciones realizadas en el SCADA y analizador de energía.

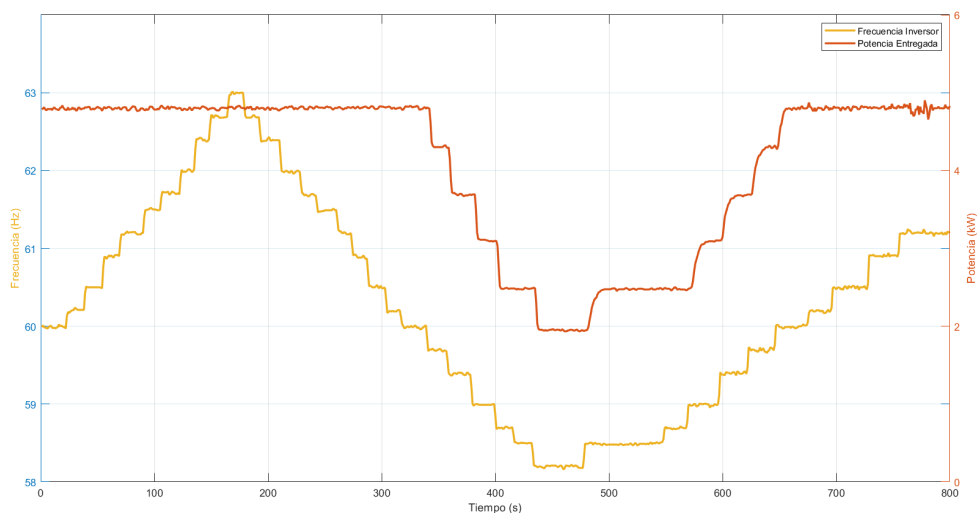


Figura 5.19: Variaciones de frecuencia en el inversor y potencia entregada al vehículo eléctrico durante la prueba 2 (SCADA)

En la prueba 2 se realizaron cambios en la frecuencia del inversor de la batería de ion-litio en rangos de 0.3Hz comenzando desde el valor nominal de 60Hz hasta llegar al valor máximo de 63 Hz. Luego de

lo cual se disminuyó la frecuencia hasta el valor de 58.2Hz, donde ocurrió la desconexión del vehículo eléctrico debido a que la frecuencia de la red es muy baja para continuar con su operación de carga y a que cuenta con un circuito interno que evita daños del mismo por mal funcionamiento. Finalmente se volvió a subir el valor de frecuencia del inversor hasta el valor nominal, todo este proceso se observa en la Figura 5.19. Así mismo se midió la potencia entregada por el inversor de la batería ion-litio al vehículo eléctrico en el sistema SCADA, todas las variaciones efectuadas por el algoritmo de control implementado.

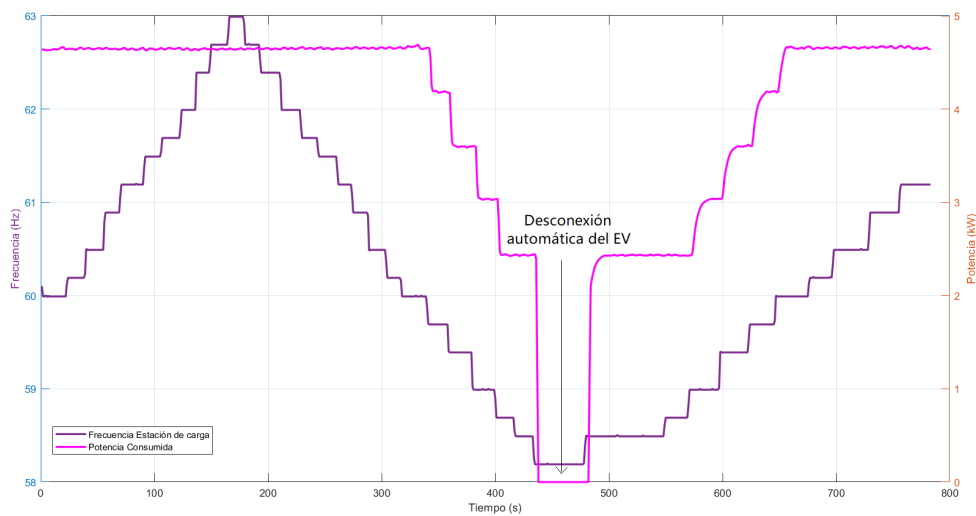


Figura 5.20: Variaciones de frecuencia y potencia de consumo del EV durante la prueba 2 (AEMC)

Los valores de frecuencia obtenidos por el analizador de calidad de energía conectado a la estación de carga se exhiben en la Figura 5.20, al igual que los cambios en la potencia de consumo del vehículo eléctrico gestionados por el algoritmo de regulación de frecuencia puesto en marcha. Además se puede observar el proceso de desconexión automática del vehículo eléctrico cuando la frecuencia toma valores menores a 58.5Hz.

La figura 5.21 ilustra los valores de frecuencia medidos por el algoritmo de control implementado en el Arduino Due, los cuales son similares a los valores configurados en el inversor medidos en el SCADA y a los medidos por el analizador de calidad de energía AEMC 8333, con lo que se corrobora que la FFT utilizada para medir la frecuencia presenta errores de medición muy pequeños que pueden ser despreciables. En esta figura también se presentan los valores del ciclo de trabajo de la señal PWM del piloto que se envían a la estación de carga para realizar el control de potencia de consumo del vehículo eléctrico, los mismos que cumplen la condición establecida en la tabla 3.4, es decir que para cada rango de frecuencia de la red se tiene un valor distinto de ciclo de trabajo. Comprobándose de esta manera el correcto funcionamiento del algoritmo de regulación primaria de frecuencia implementado.

Finalmente en la figura 5.22 se denota la relación existente entre la reducción de potencia de consumo frente a la frecuencia de la red empleada por el algoritmo desarrollado para efectuar el control primario. Esto se resume en la tabla 5.1, donde es posible observar que la reducción de potencia se realiza en un 12.5 % por cada 0.3Hz de caída en la frecuencia. Probándose de esta manera el

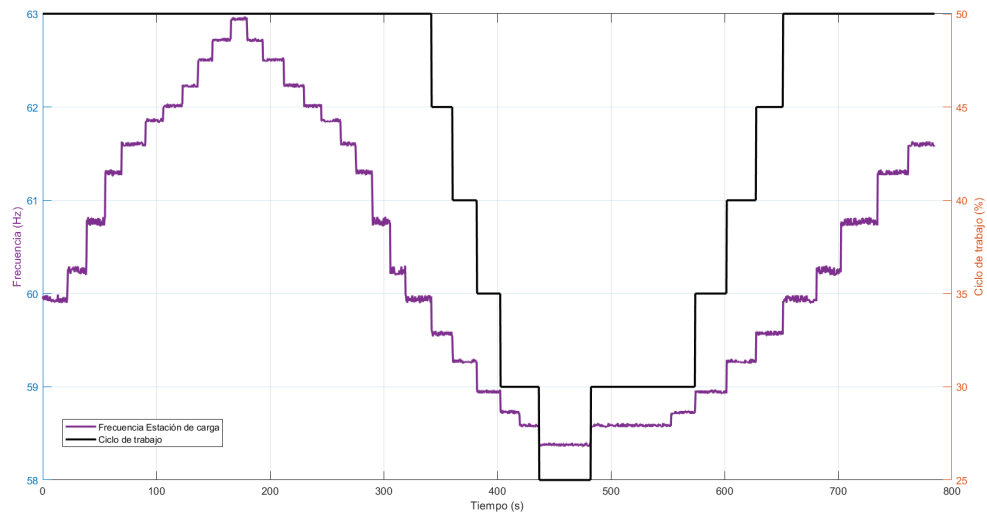


Figura 5.21: Variaciones de frecuencia medidas por el algoritmo de control de frecuencia y cambios del ciclo de trabajo durante la prueba 2

cumplimiento de la variación lineal de la potencia descrita en la ecuación 3.3.

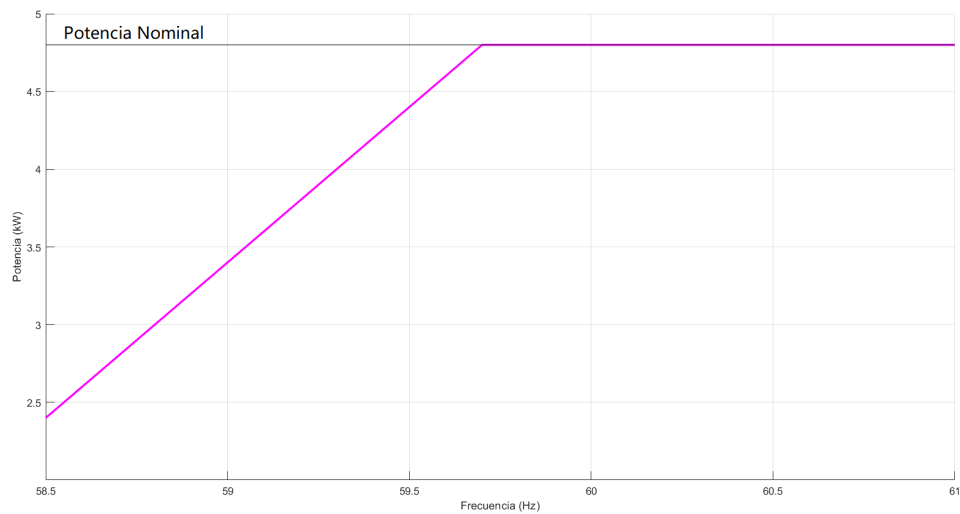


Figura 5.22: Relación potencia-frecuencia

Tabla 5.1: Relación frecuencia-reducción de potencia

Frecuencia	Ciclo de trabajo	Reducción de Potencia
>59.7Hz	50 %	0 %
59.4Hz-59.7Hz	45 %	12.5 %
59.1Hz-59.4Hz	40 %	25 %
58.8Hz-59.1Hz	35 %	37.5 %
58.5Hz-58.8Hz	30 %	50 %
58.2Hz-58.5Hz	25 %	100 %
57.9Hz-58.2Hz	20 %	100 %
57.6Hz-57.9Hz	15 %	100 %
57.3Hz-57.6Hz	10 %	100 %



Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

El presente trabajo de titulación implementa un algoritmo que contribuye a la regulación primaria de frecuencia mediante la manipulación de la gestión de potencia de la estación de carga nivel 2 bajo estudio. El algoritmo implementado logra modificar los índices de demanda del vehículo eléctrico mediante el cambio de la consigna de potencia enviada al vehículo eléctrico. De esta manera se otorga cierto nivel de inteligencia a la estación de carga para cumplir con los estándares de recarga, manteniendo la estabilidad del sistema ante sobrecargas de la red. Lo que le da una gran ventaja frente a la estación de carga comercial presente en el laboratorio.

La puesta en marcha del algoritmo para la regulación de frecuencia mediante la gestión de demanda en el proceso de carga lenta de vehículos eléctricos implementado obtuvo la respuesta deseada, es decir, que cada vez que la frecuencia de la red baja, la potencia demandada también lo hace. Este algoritmo realiza un control primario a partir de la detección de una disminución en la frecuencia de la red de 0.3Hz, cumpliendo así las directrices impuestas por el [CONELEC](#).

La estación de carga no se ve afectada por las variaciones de frecuencia y potencia, pues opera correctamente para los diferentes niveles de potencia a los que fue sometida por el algoritmo de control implementado, estos niveles varían desde 2.4KW hasta 4.8KW de acuerdo a la señal de consigna impuesta por el algoritmo diseñado.

Las pruebas determinaron que el tiempo de respuesta del vehículo eléctrico Kia Soul es de 1.82seg, algo lenta comparada con la respuesta del modelo BYD e5, cuyo tiempo de respuesta es 83ms. Se observó además que el tiempo de respuesta del algoritmo de control empezó a modificar la potencia de consumo del vehículo eléctrico 3 seg después de ocurrida una variación en la frecuencia de la red. Este valor se encuentra dentro del rango de operación del control primario de frecuencia que está entre 2 y 20 seg.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar otro tipo de sistema de medición de frecuencia de la red para comparar tiempos de respuesta así como grado de exactitud y determinar cual sería el más efectivo para emplear en futuras aplicaciones.

6.3. Trabajos futuros

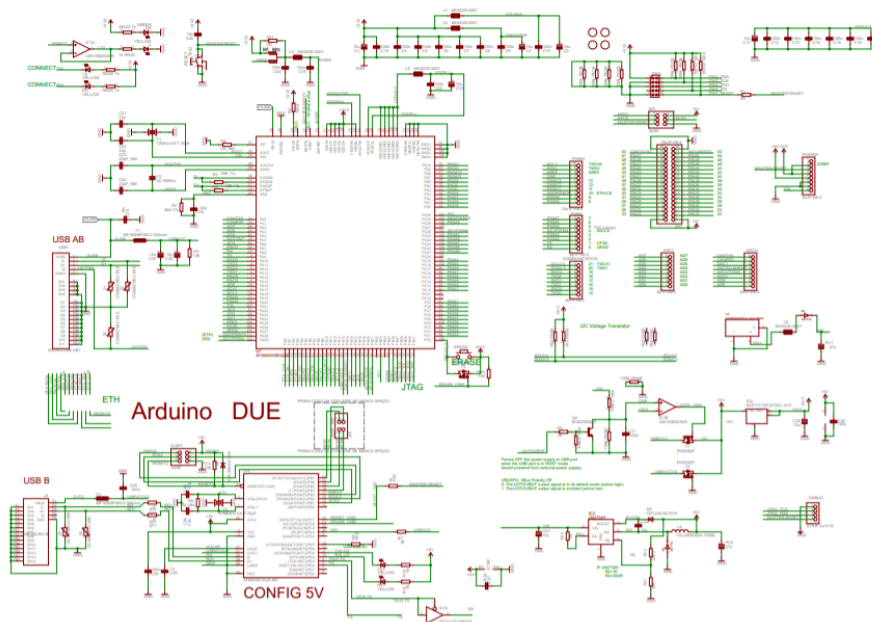
Es posible continuar desarrollando nuevos y mejores prototipos de la estación de carga lenta, pero tomando en cuenta algunas consideraciones extras, por ejemplo: incluir un conector o un adaptador que permita usar el estándar [CCS](#). Lo que ayudará a la compatibilidad de la estación de carga con más vehículos eléctricos.

Es posible además complementar el desarrollo de este trabajo con una aplicación móvil donde el usuario obtenga los datos de la potencia consumida por el vehículo eléctrico e incluso pueda modificar dicho parámetro a su conveniencia

Como trabajo futuro se podría implementar el término V2G, es decir permitir que el vehículo eléctrico descargue la energía almacenada en las baterías a la red para compensar la distorsión de frecuencia en la red.



Especificaciones técnicas de los componentes



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS". Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OR MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The customer must not rely on the absence of characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined". Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. The ARDUINO logo is a trademark of Arduino LLC registered in the US and in the rest of the world. Use of the Arduino name must be compliant with <http://www.arduino.cc/en/Main/Policy>

Figura A.1: Diagrama esquemático del Arduino Due [1]



LM158, LM258, LM358

Low-power dual operational amplifiers

Datasheet — production data

Features

- Internally frequency-compensated
- Large DC voltage gain: 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1.1 MHz (temperature compensated)
- Very low supply current per operator essentially independent of supply voltage
- Low input bias current: 20 nA (temperature compensated)
- Low input offset voltage: 2 mV
- Low input offset current: 2 nA
- Input common-mode voltage range includes negative rails
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0 V to ($V_{CC}^+ - 1.5$ V)

Description

These circuits consist of two independent, high-gain, internally frequency-compensated op-amps, specifically designed to operate from a single power supply over a wide range of voltages. The low-power supply drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op-amp circuits, which can now be more easily implemented in single power supply systems. For example, these circuits can be directly supplied with the standard +5 V, which is used in logic systems and will easily provide the required interface electronics with no additional power supply.

In linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.



DIP8
(Plastic package)



SO-8 & MiniSO-8
(Plastic micropackage)

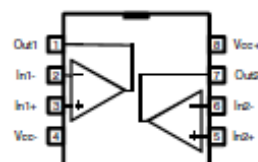


DFN8 2 x 2 mm
(Plastic micropackage)



TSSOP8
(Thin shrink small outline package)

Pin connections
(Top view)



April 2012

Doc ID 2163 Rev 10

1/21

This is information on a product in full production.

www.st.com

Figura A.2: Especificaciones técnicas del amplificador operacional LM358 [2]



MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1 μ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns (Tcy/16)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns (Tcy)
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C Compiler Optimized Architecture with optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Figura A.3: Especificaciones técnicas del PIC 18F4550 [3]



Algoritmo de control primario de frecuencia-potencia

B.1. Código para la medición de frecuencia de la red y control de potencia de consumo del vehículo eléctrico

```
1  #include "arduinoFFT.h"      //FFT
2  #include <LiquidCrystal.h>    //LCD
3  #include <SPI.h>              //Comunicación SPI
4  #include <SD.h>              //módulo microSD
5  #include <Wire.h>            //Comunicación I2C
6  #include "RTClib.h"          //módulo RTC
7
8  #define SAMPLES 512          //Tamaño de la ventana
9  #define SAMPLING_FREQUENCY 2000 //Frecuencia de muestreo
10
11 //Inicialización de librerías
12 const int rs = 9, en = 8, d4 = 6, d5 = 5, d6 = 3, d7 = 2;
13 LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
14
15 File myFile;
16 int CS_PIN = 4;
17 RTC_DS1307 rtc;
18
19 String daysOfTheWeek[7] = { "Domingo", "Lunes", "Martes", "Miercoles", "Jueves", "Viernes", "
    Sabado" };
20 String monthsNames[12] = { "Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo", "Junio", "Julio", "Agosto"
    , "Septiembre", "Octubre", "Noviembre", "Diciembre" };
21
```

```

22 | arduinoFFT FFT = arduinoFFT();
23 |
24 | //Declaración de variables
25 | unsigned int sampling_period_us;
26 | unsigned long microseconds;
27 |
28 | double vReal[SAMPLES];
29 | double vImag[SAMPLES];
30 |
31 | int dutycycle=127;
32 | float frequency;
33 | int ciclo=50;
34 | String cmd;
35 |
36 | int lastUpdate;
37 | int currentDueTime;
38 | bool updateFlag=true;
39 |
40 | void setup() {
41 |     //Configuración I2C
42 |     #ifdef AVR
43 |         Wire.begin();
44 |     #else
45 |         Wire1.begin();
46 |     #endif
47 |
48 |     //configuración comunicación UART
49 |     Serial1.begin(9600);
50 |
51 |     //Configuración LCD
52 |     lcd.begin(16, 2);
53 |     Serial.begin(9600);
54 |     delay(1000);
55 |
56 |     //configuración periodo de muestreo FFT
57 |     sampling_period_us = round(1000000*(1.0/SAMPLING_FREQUENCY));
58 |
59 |     //Inicialización módulo RTC
60 |     if (!rtc.begin()) {
61 |         Serial.println("No se pudo encontrar el RTC");
62 |         while (1);
63 |     }
64 |     //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__),F(__TIME__))); //se ajusta el reloj

```

```

65
66 Serial.print("Iniciando tarjeta SD...");
67
68 if (!SD.begin(4)) {
69     Serial.println("La Inicialización ha fallado");
70     while (1);
71 }
72 Serial.println("Inicialización correcta");
73 }
74
75 //Función para obtener la hora y fecha
76 void printDate(DateTime date)
77 {
78     Serial.print(date.year(), DEC);
79     Serial.print('/');
80     Serial.print(date.month(), DEC);
81     Serial.print('/');
82     Serial.print(date.day(), DEC);
83     Serial.print(" (");
84     //Serial.print(daysOfTheWeek[date.dayOfTheWeek()]);
85     Serial.print(") ");
86     Serial.print(date.hour(), DEC);
87     Serial.print(':');
88     Serial.print(date.minute(), DEC);
89     Serial.print(':');
90     Serial.print(date.second(), DEC);
91     Serial.println();
92 }
93
94 //Función para el control de frecuencia–potencia
95 void control_frecuencia(){
96     if(frequency >= 59.70){
97         ciclo=50;
98         cmd="A";
99     }
100     else if (frequency < 59.70 && frequency >= 59.40){
101         dutycycle=dutycycle - 12;
102         ciclo=45;
103         cmd="B";
104     }
105     else if (frequency < 59.40 && frequency >= 59.10){
106         dutycycle=dutycycle - 25;
107         ciclo=40;

```

```

108     cmd="C";
109 }
110 else if (frequency < 59.10 && frequency >= 58.80){
111     dutycycle=dutycycle - 37;
112     ciclo=35;
113     cmd="D";
114 }
115 else if (frequency < 58.80 && frequency >= 58.50){
116     dutycycle=dutycycle - 50;
117     ciclo=30;
118     cmd="E";
119 }
120 else if (frequency < 58.50 && frequency >= 58.20){
121     dutycycle=dutycycle - 62;
122     ciclo=25;
123     cmd="F";
124 }
125 else if (frequency < 58.20 && frequency >= 57.90){
126     dutycycle=dutycycle - 75;
127     ciclo=20;
128     cmd="G";
129 }
130 else if (frequency < 57.90 && frequency >= 57.60){
131     dutycycle=dutycycle - 87;
132     ciclo=15;
133     cmd="H";
134 }
135 else if (frequency < 57.60 && frequency >= 57.30){
136     dutycycle=dutycycle - 100;
137     ciclo=20;
138     cmd="I";
139 }
140 //Impresión del ciclo de trabajo en la LCD
141 lcd.setCursor(12,1);
142 lcd.print(ciclo);
143 }
144
145 void loop() {
146 //Muestreo de la señal de entrada
147 for(int i=0; i<SAMPLES; i++)
148 {
149     microseconds = micros();
150     vReal[i] = analogRead(0); // se lee la entrada analógica

```

```

151     vImag[i] = 0;
152
153     while(micros() < (microseconds + sampling_period_us)){
154     }
155 }
156
157 //FFT
158 FFT.Windowing(vReal, SAMPLES, FFT_WIN_TYP_HAMMING, FFT_FORWARD);
159 FFT.Compute(vReal, vImag, SAMPLES, FFT_FORWARD);
160 FFT.ComplexToMagnitude(vReal, vImag, SAMPLES);
161 double peak = FFT.MajorPeak(vReal, SAMPLES, SAMPLING_FREQUENCY); //frecuencia
    dominante
162
163 frequency=peak-0.21;    //Frecuencia medida
164
165 //Impresión de la frecuencia en la LCD
166 lcd.clear();
167 lcd.print("Frecuencia-Ciclo");
168 lcd.setCursor(2,1);
169 lcd.print(frequency);
170
171 control_frecuencia();    //funcion de control de frecuencia-potencia
172
173 //Escritura en el archivo (Fecha-Hora-Frecuencia-Ciclo)
174 myFile = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);    // abre el archivo
175 if (myFile) {    // si el archivo se abre correctamente, escribe en el:
176     DateTime now = rtc.now();
177     printDate(now);    // Obtención de fecha actual y visualización en el monitor serial
178     myFile.print(now.year(),DEC);
179     myFile.print('/');
180     myFile.print(now.month(),DEC);
181     myFile.print('/');
182     myFile.print(now.day(),DEC);
183     myFile.print('-');
184     myFile.print(now.hour(),DEC);
185     myFile.print(':');
186     myFile.print(now.minute(),DEC);
187     myFile.print(':');
188     myFile.print(now.second(),DEC);
189     myFile.print('-');
190     myFile.print(frequency);
191     myFile.print('-');
192     myFile.println(ciclo);

```

```
193     //delay(5000);
194     myFile.close();                // cierra el archivo
195 } else {
196     Serial.println("error al abrir datos.txt");    // si el archivo no abre, imprime un error
197 }
198
199 //Comunicacion UART Arduino-PIC
200     String txtSample = (String) cmd;
201     Serial1.print(txtSample+"x");    //Envío del ciclo de trabajo para el control de potencia
202
203     delay(10);
204 }
```

Listado B.1: Código para medir la frecuencia de la red en tiempo real utilizando FFT y variar el ciclo de trabajo de la señal piloto

B.2. Código para la comunicación UART con la estación de carga

```
1  //*****===== LCD =====*****
2  sbit LCD_RS at LATD0_bit;
3  sbit LCD_EN at LATD1_bit;
4  sbit LCD_D4 at LATD2_bit;
5  sbit LCD_D5 at LATD3_bit;
6  sbit LCD_D6 at LATD4_bit;
7  sbit LCD_D7 at LATD5_bit;
8
9  sbit LCD_RS_Direction at TRISD0_bit;
10 sbit LCD_EN_Direction at TRISD1_bit;
11 sbit LCD_D4_Direction at TRISD2_bit;
12 sbit LCD_D5_Direction at TRISD3_bit;
13 sbit LCD_D6_Direction at TRISD4_bit;
14 sbit LCD_D7_Direction at TRISD5_bit;
15
16 //+++++ Declaración de variables +++++
17 int ciclo=127;
18 char receive;
19
20 void inicio()    //funcion de inicializacion de puertos
21 {
22 //Puertos UART
23   TRISC7_bit=1;      //puerto Rx
24   TRISC6_bit=0;      //Puerto Tx
25 }
26
27 void main()
28 {
29   inicio();
30   //===== PWM =====
31   PWM1_Init(1000);    // Definimos frecuencia del pwm en 1000Hz
32   PWM1_Set_Duty(ciclo); // Establece ciclo de trabajo del pwm
33   PWM1_Start();
34   //===== LCD =====
35   Lcd_Init();          // Inicializa LCD
36   Lcd_Cmd(_Lcd_CLEAR); // Limpia display
37   Lcd_Cmd(_Lcd_CURSOR_OFF);
38
39   //===== UART =====
```

```

40 //inicializacion del hardware UART1 y establecimiento de la comunicacion a 9600 bps
41 UART1_Init(9600);
42 //##### PROGRAMA #####
43 while(1){
44     receive=""; //se enceran las variables
45     //Recepcion de datos por el puerto serial
46     if (UART1_Data_Ready() == 1) { //si el dato esta listo, empieza a leer
47         UART1_Read_Text(receive, "x",8);
48     }
49     Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); //Se imprime el valor del ciclo recibido por el arduino
50     if (strcmp("A",receive)==0){
51         ciclo=127;
52         Lcd_Out(2,1,"127");
53     }else if (strcmp("B",receive)==0){
54         ciclo=115;
55         Lcd_Out(2,1,"115");
56     }else if (strcmp("C",receive)==0){
57         ciclo=102;
58         Lcd_Out(2,1,"102");
59     }else if (strcmp("D",receive)==0){
60         ciclo=90;
61         Lcd_Out(2,1,"90");
62     }else if (strcmp("E",receive)==0){
63         ciclo=77;
64         Lcd_Out(2,1,"77");
65     }else if (strcmp("F",receive)==0){
66         ciclo=65;
67         Lcd_Out(2,1,"65");
68     }else if (strcmp("G",receive)==0){
69         ciclo=52;
70         Lcd_Out(2,1,"52");
71     }else if (strcmp("H",receive)==0){
72         ciclo=40;
73         Lcd_Out(2,1,"40");
74     }else if (strcmp("I",receive)==0){
75         ciclo=27;
76         Lcd_Out(2,1,"27");
77     }
78     PWM1_Set_Duty(ciclo); //Se establece el valor de la senal PWM
79     Delay_ms(600);
80 }

```

Listado B.2: Código para recibir el ciclo de trabajo de la señal PWM que se envía al vehículo eléctrico

B.3. Estación de carga inteligente

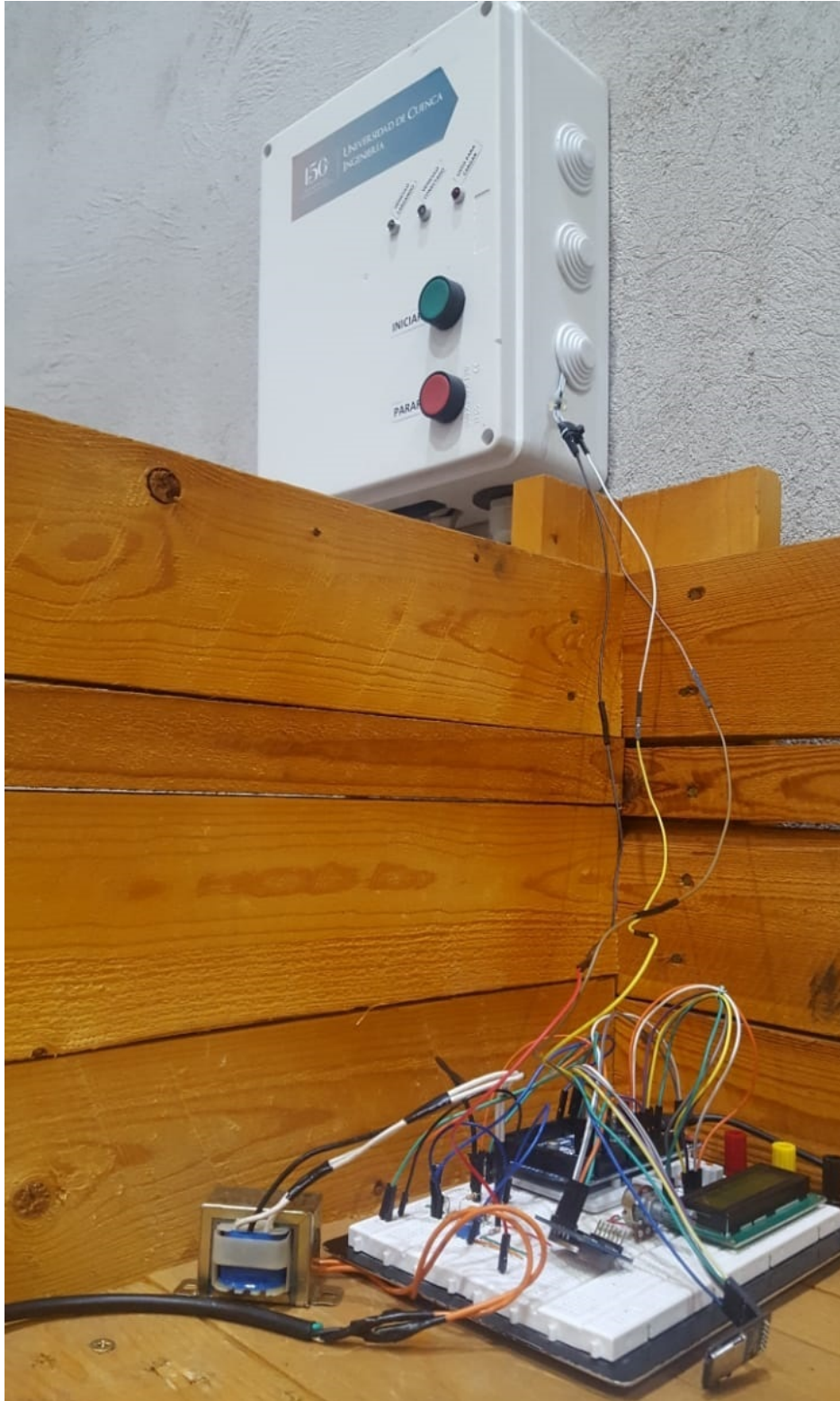


Figura B.1: Integración del circuito de control de frecuencia-potencia a la estación de carga lenta



Bibliografía

- [1] “Arduino Due | Arduino Official Store.” [En línea]. Disponible: <https://store.arduino.cc/usa/duo>
- [2] STMicroelectronics, “Low-power dual operational amplifiers LM158, LM258 y LM358.” [En línea]. Disponible: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22762/STMICROELECTRONICS/LM358.html>
- [3] “PIC18F4550 - Microcontrollers and Processors.” [En línea]. Disponible: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F4550>
- [4] A. P. Chica Gallardo y J. A. Guamán Argudo, “Modelo de estado estacionario de la microrred del laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca,” Tesis, 2017.
- [5] P. Chatupromwong y A. Yokoyama, “System frequency control using multi-step smart charging of electric vehicles,” in *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*. Ho Chi Minh City: IEEE, Nov. 2012, pp. 474–479. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6523314/>
- [6] K. Shimizu, T. Masuta, Y. Ota, y A. Yokoyama, “A new load frequency control method in power system using vehicle-to-grid system considering users’convenience,” in *Proc. 17th Power System Computation Conference*, 2011, pp. 1–7.
- [7] W. R. Astudillo Astudillo y D. X. Caguana Buele, “Estudio y desarrollo de un prototipo de estación de carga nivel l2 para vehículos eléctricos,” Tesis, 2018.
- [8] H. Liu, K. Huang, Y. Yang, H. Wei, y S. Ma, “Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, num. 1, p. 13, Dic. 2018. [En línea]. Disponible: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-018-0085-1>
- [9] Y. Mu, J. Wu, J. Ekanayake, N. Jenkins, y H. Jia, “Primary Frequency Response From Electric Vehicles in the Great Britain Power System,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, num. 2, pp. 1142–1150, Jun. 2013. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6397579/>
- [10] S. Falahati, S. A. Taher, y M. Shahidehpour, “A new smart charging method for EVs for frequency control of smart grid,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 458–469, 2016.
- [11] J. J. C. Mediavilla, L. X. O. Hinojosa, J. A. T. Csanoba, y C. A. G. Calvache, “Análisis de incentivos y proyecciones del vehículo 100 % eléctrico en el Ecuador,” *INNOVA Research Journal*, pp. 112–124, 2017.

-
- [12] J. Espinoza, L. González, y R. Sempértégui, "Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador," in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. IEEE, 2017, pp. 1–7.
- [13] ARCONEL, "Balance nacional de energía eléctrica - abril 2019," 2019.
- [14] MEER, "INFORME DE RENDICIÓN DE CUENTAS 2017," p. 47. [En línea]. Disponible: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2019/01/Informe-RC-2017-MEER.pdf>
- [15] D. G. Photovoltaics y E. Storage, "IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems," 2011.
- [16] E. N. Power, *Avtron Load bank Instruction Manual LSH150 1115529*, 2016.
- [17] J. G. V. Sánchez, "Análisis y Estimación de la Demanda Eléctrica con la Implementación de Vehículos Eléctricos conectados a una Red de Distribución en Cuenca y El Ecuador," Tesis, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2017.
- [18] "Tipos de batería para coche eléctrico." [En línea]. Disponible: <http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>
- [19] "Are you on-board? Demystifying EV charging systems - Power management - Technical articles - TI E2E support forums." [En línea]. Disponible: https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/archive/2017/07/31/are-you-on-board-demystifying-ev-charging-systems
- [20] E. d. Aragón, "Qué necesito saber sobre modos y tipos de carga de un vehículo eléctrico," Jul. 2018. [En línea]. Disponible: <https://movilidadelectrica.com/modos-y-tipos-de-carga-de-un-vehiculo-electrico/>
- [21] "La venta de vehículos cae, pero hay marcas que ganan." [En línea]. Disponible: <http://www.elcomercio.com/actualidad/venta-vehiculos-cae-marcas-ganancia.html>
- [22] El Telégrafo, "La venta de autos híbridos y eléctricos creció en 2017," Jun. 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/venta-autos-hibridos-electricos-ecuador>
- [23] United Nations Environment Programme (UNEP), "Electric Mobility: Oportunities For Latin America," p. 81, 2016. [En línea]. Disponible: http://www.pnuma.org/cambio{__}climatico/publicaciones/informe{__}movilidad{__}electronica.pdf
- [24] "Boletín Sector Automotor en Cifras – AEADE." [En línea]. Disponible: <https://www.aeade.net/boletin-sector-automotor-en-cifras/>
- [25] "El coche eléctrico, el transporte del futuro." [En línea]. Disponible: <http://circutor.es/es/formacion/vehiculo-electrico/el-coche-electrico-el-transporte-del-futuro>
- [26] El Telégrafo, "En Cuenca, los carros generan el 76 % de la polución," Jul. 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/septimo/1/en-cuenca-los-carros-generan-el-76-de-la-polucion>
- [27] "¿Es factible la movilidad eléctrica en las ciudades más grandes del Ecuador?" Ene. 2019. [En línea]. Disponible: <https://bydelectrico.com/movilidad-electrica-ecuador/>

-
-
- [28] M. Peláez y J. Espinoza, “Eficiencia energética y ahorro de energía en el Ecuador,” *Energías Renovables en el Ecuador-Situación Actual tendencias y perspectivas*, V, vol. 255, 2015.
- [29] CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), “Estudio y Gestión de la Demanda Eléctrica,” *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022*, vol. 2, p. 206, 2013.
- [30] “FAQs- Corriente de carga EV: ¿Cuál es la diferencia entre CA y CC?” [En línea]. Disponible: https://wallbox.com/es_es/faqs-corriente-de-carga-ev-cual-es-la-diferencia-entre-ca-y-cc
- [31] A. B. Pedersen, S. Martinenas, P. B. Andersen, T. M. Sorensen, y H. S. Hoj, “A method for remote control of EV charging by modifying IEC61851 compliant EVSE based PWM signal,” in *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Miami, FL, USA: IEEE, Nov. 2015, pp. 539–544. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7436356/>
- [32] “Soul EV Características | Eco.” [En línea]. Disponible: <https://www.kia.com/ec/showroom/soul-ev.html>
- [33] H. Liu, J. Qi, J. Wang, P. Li, C. Li, y H. Wei, “Ev dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of ev owners,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, num. 4, pp. 3763–3772, 2016.
- [34] C. Bernardi y D. Gotti, “(PDF) Estudio de la contribución de la generación renovable al control frecuencia potencia,” 10 2018. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/328266383_Estudio_de_la_contribucion_de_la_generacion_renovable_al_control_frecuencia_potencia
- [35] C. Bordons, F. Garcia-Torres, y M. A. Ridao, *Model Predictive Control of Microgrids*. Springer, 2020.
- [36] “9.1.2 Frequency Regulation | EBF 483: Introduction to Electricity Markets.” [En línea]. Disponible: <https://www.e-education.psu.edu/ebf483/node/705>
- [37] CONELEC, “Procedimientos de despacho y operacion (versión 2.0).” [En línea]. Disponible: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/ProcedimientosDespacho.pdf>
- [38] M. Vahedipour-Dahraie, H. Rashidizadeh-Kermani, H. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, y J. Guerrero, “Coordination of EVs Participation for Load Frequency Control in Isolated Microgrids,” *Applied Sciences*, vol. 7, num. 6, p. 539, May 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/6/539>
- [39] D. Ibrahim, “Accurate Measurement of the Mains Electricity Frequency,” *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, p. 5, 2011.
- [40] B. Yu, “An Improved Frequency Measurement Method from the Digital PLL Structure for Single-Phase Grid-Connected PV Applications,” *Electronics*, vol. 7, num. 8, p. 150, Ago. 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/2079-9292/7/8/150>
-

-
-
- [41] M. Aasvik, “What Is FFT and How Can You Implement It on an Arduino?” [En línea]. Disponible: <https://www.norwegiancreations.com/2017/08/what-is-fft-and-how-can-you-implement-it-on-an-arduino/>
- [42] “El bus I2C en Arduino.” [En línea]. Disponible: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>
- [43] “El bus SPI en Arduino.” [En línea]. Disponible: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>
- [44] “Comunicación de Arduino con puerto serie.” [En línea]. Disponible: <https://www.luisllamas.es/arduino-puerto-serie/>
- [45] byd-admin, “Auto Eléctrico E5 | BYD ECUADOR.” [En línea]. Disponible: <https://bydelectrico.com/autos-electricos/e5/>