

Diseño e Implementación de un Medidor de Energía Trifásica para Sistemas Eléctricos no Lineales.

**German Andres Sanchez Motta
Kevin Fabian Carrillo Carrillo**

Universidad Santo Tomas
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

Diseño e Implementación de un Medidor de Energía Trifásica para Sistemas Eléctricos no Lineales.

German Andres Sanchez Motta
Kevin Fabian Carrillo Carrillo

Monografía de proyecto de grado para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director:
Ing. Edwin Francisco Forero Garcia, M.Sc.

Universidad Santo Tomas
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

Dedicatoria

Principalmente a Dios y después a nuestros padres, quienes fueron de gran ayuda y confianza incondicional en esta trayectoria de formación personal y profesional.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido realizado bajo el acompañamiento y dirección de el ingeniero Edwin Francisco Forero Garcia, M.Sc, por habernos brindado su tiempo, conocimientos, paciencia, le expresamos nuestro más sincero agradecimiento por hacer posible la realización de este proyecto.

A nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad; muchos de nuestros logros se los debemos a ustedes en los que se incluye este. Clara Ines Motta Almario, German Sanchez Pinto, Nelly Faviola Carrillo Carrillo, William Marquez Carrillo Rey.

A nuestras parejas, amigos y colegas, por ayudarnos en este proceso, por aportar algún comentario y crítica a nuestro proyecto, por darnos motivación para culminar este proceso y por los momentos compartidos en espacios académicos y sociales. Julieth Garzon, David Ortiz, Sergio Zambrano, Nicolas Ramirez y Mateo Rojas.

A nuestros docentes, quienes desde el primer día que empezamos este proceso nos brindaron sus conocimientos y tiempo para ayudarnos a crecer como personas y profesionales.

GRACIAS

Contenido

Dedicatoria	3
Agradecimientos	5
Lista de Figuras	9
Lista de tablas	14
Lista de Símbolos y Abreviaciones	15
1. Introducción	18
2. Justificación	19
3. Objetivos	20
3.1. Objetivo General	20
3.2. Objetivos Específicos	20
4. Marco teórico	21
4.1. Medidores en la actualidad	21
4.2. Factor de potencia y distorsión de la onda.	23
4.3. Distorsión armónica total (THD) y valor RMS de la corriente distorsionada .	24
4.4. Definiciones del STD IEEE 1459 para la medición de calidad energética bajo condiciones balanceadas y des balanceadas	27
4.4.1. Mono-fase	27
4.4.2. Mono-fase no sinusoidal	30
4.4.3. Ejemplo monofásico	33
4.4.4. Sistema trifásico sinusoidal balanceado	36
4.4.5. Sistema trifásico sinusoidal no balanceada	37
4.5. Ejercicio Práctico	41
4.5.1. Análisis de datos obtenidos de tres cargas no lineales	41
4.6. Desarrollo de Software	48
4.6.1. Programación Orientada a Objetos	48
4.6.2. Desarrollo Web	49
4.6.3. Frontend	49
4.6.4. Backend	49

4.6.5. REST	49
4.7. Fourier	49
4.7.1. Transformada de Fourier	49
4.7.2. Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon	50
4.7.3. Transformada rápida de Fourier (FFT)	50
4.8. Convertidores ADC	51
4.9. Internet de las cosas	51
4.9.1. Raspberry pi 4	51
5. Desarrollo y ejecución del proyecto	52
5.1. Arquitectura del proyecto	52
5.2. Fase de integración	53
5.2.1. EVM430-F6779-3 Phase Electronic Watt-Hour EVM	53
5.2.2. EVAL-ADE 7978	54
5.2.3. 78M6631 3-Phase PowerMeasurement IC	55
5.3. Desarrollo del Hardware	56
5.3.1. Configuración inicial	56
5.3.2. Caracterización de la resistencia Shunt	58
5.3.3. Conversión de voltaje	62
5.3.4. Conversión de corriente	65
5.4. Desarrollo de Software	73
5.4.1. Implementación del protocolo I2C entre la raspberry y el ADE7978 . .	73
5.4.2. Backend Solución en c++	76
5.4.3. Backend Configuración del servidor	78
5.4.4. Backend Solución con Node.js	79
5.4.5. Frontend Solución en Angular	80
6. Resultados del proyecto	84
6.1. Primer Prueba	84
6.2. Segunda Prueba	87
6.2.1. Resultados en el ciclo heavy	88
6.2.2. Resultados en el ciclo regular	93
6.2.3. Resultados en el ciclo super wash	98
6.2.4. Resultados en el ciclo centrifugado	103
6.2.5. Resultados en el ciclo rinse	108
6.2.6. Resultados en el ciclo llenado	112
6.3. Tercer Prueba	117
6.3.1. Resultados de la prueba	119

<i>Contenido</i>	<i>Contenido</i>
<hr/>	
7. Conclusiones	124
8. Trabajo Futuro	126
Bibliografía	127
A. Anexo: Certificación de software de la raspberry	130
B. Anexo: Certificación de software del servicio web(API)	133
C. Anexo: Certificación de software de la página web	135

Listado de Figuras

4-1. Circuito RL	24
4-2. Señal de corriente con distorsión: (a) Fase de la corriente y su componente fundamental; (b) Componente de distorsión	25
4-3. Cuatro cuadrantes de las direcciones del flujo de potencia	29
4-4. Potencias aparentes aritméticas y vectoriales	40
4-5. Autor - Voltaje RMS	42
4-6. Clasificación, denominación y valores tensión nominal	44
4-7. Autor - Corriente	45
4-8. Autor - Porcentaje de THD_V	46
4-9. Autor - Porcentaje de THD_I	46
4-10. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general	48
5-1. Arquitectura del proyecto (Esquema realizado con la aplicación https://app.diagrams.net/)	52
5-2. Tarjeta EVM430-F6779-3	54
5-3. Tarjeta EVAL-ADE7978	54
5-4. Tarjeta 78M6631-EVM-DSL	55
5-5. Esquema de conexión para una distribución en Y, 3 fases, 4 hilos.	56
5-6. ADE 7978 configurado con las resistencias Shunt (Imagen del proyecto)	57
5-7. Esquema caracterización de las resistencias Shunt (Esquema realizado en MATLAB)	58
5-8. Caracterización ShuntA (Gráfica obtenida en MATLAB)	60
5-9. Caracterización ShuntB (Gráfica obtenida en MATLAB)	61
5-10. Caracterización ShuntC (Gráfica obtenida en MATLAB)	62
5-11. Divisor de voltaje ADC	64
5-12. Salida de voltaje del ADE 7978	64
5-13. Circuito de protección para los pines IP e IM	65
5-14. Nodos aplicados al circuito	66
5-15. Relacion ADC corriente	71
5-16. Conexión I2C (Esquema realizado en Orcad pspice)	73
5-17. Protocolo de escritura I2C	74
5-18. Protocolo de lectura I2C	74
5-19. Descarga de Node JS	81
5-20. Autor - Creación de proyecto en Angular (Terminal del computador)	81
5-21. Autor - Levantar servidor local en Angular (Terminal del computador)	82

5-22. Creación de componentes en Angular (Terminal del computador)	82
5-23. Componentes home y navbar	83
5-24. Componentes graphic y dashboard	83
6-1. Autor - Corriente Tarjeta vs Corriente Multímetro	86
6-2. Autor - Cargas utilizadas en la primera prueba	86
6-3. Autor - Esquema de conexión utilizado en la primera prueba (Esquema realizado en MATLAB)	86
6-4. Autor - Carga utilizada en la segunda prueba	87
6-5. Esquema de conexión utilizado en la segunda prueba (Esquema realizado en MATLAB)	88
6-6. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	88
6-7. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	89
6-8. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	89
6-9. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	89
6-10. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	90
6-11. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	90
6-12. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	90
6-13. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	91
6-14. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	91
6-15. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	91
6-16. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	92
6-17. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	92
6-18. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY	92
6-19. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	93
6-20. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	94
6-21. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	94
6-22. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	94
6-23. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	95
6-24. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	95
6-25. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	95
6-26. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	96
6-27. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	96
6-28. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	96
6-29. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	97

6-30. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	97
6-31. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR	97
6-32. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	98
6-33. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	98
6-34. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	99
6-35. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	99
6-36. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	99
6-37. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	100
6-38. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	100
6-39. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	100
6-40. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	101
6-41. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	101
6-42. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	101
6-43. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	102
6-44. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH	102
6-45. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	103
6-46. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	103
6-47. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	104
6-48. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFU- GADO	104
6-49. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRI- FUGADO	104
6-50. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	105
6-51. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRI- FUGADO	105
6-52. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRI- FUGADO	105
6-53. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRI- FUGADO	106
6-54. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO CENTRI- FUGADO	106

6-55. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	106
6-56. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	107
6-57. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO	107
6-58. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	108
6-59. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	108
6-60. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	108
6-61. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	109
6-62. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	109
6-63. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	109
6-64. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	110
6-65. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	110
6-66. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	110
6-67. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	111
6-68. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	111
6-69. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	111
6-70. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE	112
6-71. Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	112
6-72. Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	113
6-73. Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	113
6-74. Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	113
6-75. Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	114
6-76. Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	114
6-77. Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	114
6-78. Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	115
6-79. Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	115
6-80. Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	115
6-81. Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	116
6-82. Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	116
6-83. Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO	116
6-84. Autor - Cargas utilizadas en la tercera prueba	118
6-85. Esquema de conexión utilizado en la tercera prueba (Esquema realizado en MATLAB)	118
6-86. Autor - CORRIENTE RMS Y CORRIENTE FUNDAMENTAL	119

6-87. Autor - CORRIENTE ARMÓNICA Y DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE	119
6-88. Autor - VOLTAJE RMS Y VOLTAJE FUNDAMENTAL	120
6-89. Autor - VOLTAJE ARMÓNICA Y DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE	120
6-90. Autor - FACTOR DE POTENCIA TOTAL Y FACTOR DE POTENCIA FUNDAMENTAL	121
6-91. Autor - POTENCIA APARENTE TOTAL Y POTENCIA APARENTE FUNDAMENTAL	121
6-92. Autor - POTENCIA APARENTE ARMÓNICA Y ÁNGULO DE DESFASE ENTRE FASES	122
6-93. Autor - POTENCIA ACTIVA TOTAL Y POTENCIA ACTIVA ARMÓNICA	122
6-94. Autor - DISTORSIÓN DE POTENCIA (VAR) EN CORRIENTE Y VOLTAJE	123
6-95. Autor - CORRIENTE RMS EN NEUTRO Y POTENCIA (VAR) NO ACTIVA	123
A-1. Certificación de software raspberry	132
B-1. Certificación de software del servicio web	134
C-1. Certificación de software de la página web	137

Lista de Tablas

4-1. Autor - Características de medidores	23
4-2. Autor - Resultado del ejemplo monofásico no sinusoidal	36
4-3. Autor - Datos de caracterización de frecuencia	42
4-4. Autor - Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS	43
4-5. Autor - Datos de caracterización de corriente	43
4-6. Autor - Distorsión armónica en corriente y voltaje	45
4-7. Autor - TDD de corrientes	48
5-1. Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt A	59
5-2. Autor - Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt B	60
5-3. Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt C	61
6-1. Autor - Resultados de la prueba N° 1	85

Lista de Símbolos y Abreviaciones

V	Voltaje Rms total
V_1	Voltaje Rms de los componentes de frecuencia
V_H	Voltaje Rms término restante
I	Corriente Rms total
I_1	Corriente Rms de los componentes de frecuencia
I_H	Corriente Rms término restante
THD_V	Distorsión armónica total en voltaje
THD_I	Distorsión armónica total en corriente
THD_{eV}	Distorsión armónica total en voltaje efectivo
THD_{eI}	Distorsión armónica total en corriente efectiva
V_a	Voltaje en la línea A
V_b	Voltaje en la línea B
V_c	Voltaje en la línea C
V_{ll}	Voltaje línea a línea
V_{ab}	Voltaje entre línea A a línea B
V_{bc}	Voltaje entre línea B a línea C
V_{ca}	Voltaje entre línea C a línea A
I_a	Corriente en la línea A
I_b	Corriente en la línea B
I_c	Corriente en la línea C
I_E	Corriente efectiva
I_{E1}	Corriente efectiva fundamental
I_{EH}	Corriente efectiva armónica
V_E	Voltaje efectivo
V_{E1}	Voltaje efectivo fundamental

V_{EH}	Voltaje efectivo armónico
P	Potencia activa total
P_1	Potencia activa fundamental
P_H	Potencia armónica activa (Potencia activa no fundamental)
Q	Potencia reactiva total
Q_1	Potencia reactiva fundamental
Q_H	Potencia reactiva armónica
S	Potencia aparente total
S_1	Potencia aparente fundamental
S_H	Potencia aparente armónica (Potencia aparente no fundamental)
S_N	Potencia aparente no fundamental
S_A	Potencia aparente aritmética
S_V	Potencia aparente vectorial
S_E	Potencia aparente efectiva
S_{E1}	Potencia aparente efectiva fundamental
S_{EH}	Potencia aparente efectiva
S_{EN}	Potencia aparente no fundamental efectiva
S_U	Potencia desbalanceada
D_I	Distorsión de potencia en corriente
D_V	Distorsión de potencia en voltaje
D_H	Potencia de distorsión armónica
D_{EI}	Distorsión de potencia en corriente efectiva
D_{EV}	Distorsión de potencia en voltaje efectivo
D_{EH}	Potencia de distorsión armónica efectiva
N	Potencia no activa
P_{F1}	Factor de potencia fundamental
P_{Fe}	Factor de potencia efectivo

0 Lista de Símbolos y Abreviaciones

PF	Factor de potencia
VA	Potencia aparente
WATT	Potencia activa
VAR	Potencia reactiva
WATTHR	Potencia activa hora
VARHR	Potencia reactiva hora
VAHR	Potencia aparente hora
CAL	Dato calculado

1. Introducción

El presente proyecto hace referencia al diseño e implementación de un medidor en energía trifásica para sistemas eléctricos no lineales implementando el estándar IEEE-1459, el cual es una definición estándar para la medición de energía en condiciones balanceadas, desbalanceadas sinusoidales y no sinusoidales. Los medidores actuales no implementan dicho estándar y fueron diseñados asumiendo que tanto el voltaje como la corriente eran sinusoidales, por ende no se contempló la existencia de cargas desbalanceadas y las perturbaciones que estas le generan a la red eléctrica de 60Hz como lo menciona Andrew J Berrisfold en el proyecto del impacto armónico[1]. Dado esto, las empresas de energía no están realizando una tarificación correcta del KW h por mes a los hogares, residencias, industrias, etc... Por lo tanto se queda en incertidumbre si el valor de la factura, es mayor o menor al valor correcto.

Para analizar la problemática es necesario mencionar sus causas. Una de ellas es la evolución de la tecnología. Para estos días es común encontrar en hogares dispositivos electrónicos, tales como: computadores, televisores, licuadoras, etc... Al momento de hacer la medición de energía, estos dispositivos generan distorsiones armónicas las cuales no están siendo correctamente analizadas en los medidores.

La importancia de estudiar y analizar el estándar IEEE-1459, se debe a la incertidumbre que existe en las mediciones de energía domésticas e industriales. Al crear un medidor con un hardware y software que permita medir una carga en cualquier condición y emplear el correspondiente análisis de señales basado en el estándar ,permitirá saber si el consumo es menor o mayor al que se ha venido registrando. De esta manera se puede empezar a mirar las regulaciones que los medidores deben cumplir en Colombia con el fin de presentar al mercado un medidor mejorado en su medición.

Este proyecto se realiza seleccionando el tipo de tarjeta de desarrollo a utilizar para la medida de señales trifásicas, después de tener los instrumentos necesarios, implementar el sistema de medición, en donde a partir de sus coeficientes de Fourier de voltaje y corriente, se aplica el std IEEE 1459 del 2010, que se basa en la medición de energía en sistemas monofásicos y trifásicos con cargas desbalanceadas con sus respectivas fórmulas. Una vez obtenidos los resultados, se realizará un cuadro de comparación con otros medidores para determinar un porcentaje de error y garantizar los resultados obtenidos. Finalmente corroborados los datos, por medio de una página web se visualiza el valor exacto de consumo mensual a las empresas de energía.

2. Justificación

La economía es un factor que domina a todo el mundo, en el caso de Colombia, se busca lograr el ahorro o mejoramiento de este, por medio del medidor de energía que se propone en este proyecto; dado las circunstancias, se plantea obtener el valor total de la energía consumida por la población y dar un valor exacto en la factura de su consumo, esto debido a que las medidas que se registran, se realiza con medidores lineales a sistemas de cargas no lineales, por lo tanto, las pérdidas a la red no se contemplan y hace que en ocasiones el consumidor tenga que pagar por energía que no ha consumido o viceversa.

El estándar de medición IEEE 1459 del 2010, mejora la forma de medición de las cargas que se encuentran en una condición desbalanceada o no lineal reflejadas en la industria y en el hogar. Esto motiva a realizar estudios del mejoramiento y el uso de la energía eléctrica con el fin de mantener y preservar las fuentes hidroeléctricas que tiene Colombia, creando un mejor impacto ambiental.

Al tener valores más exactos sobre el consumo de energía eléctrica en los hogares y en la industria, se puede generar una cultura social con buenos hábitos de consumo eléctrico, creando conciencia de la cantidad de energía que se está desperdiciando en labores cotidianas.

Actualmente en los sectores comerciales no existen medidores que consideren los armónicos presentes en la señales de energía, por esta razón, es viable implementar un medidor que los considere en su medición, ya que éste tendría una alta demanda en el mercado. Por otro lado, si en Colombia se llegaría a exigir alguna regulación a los fabricantes de equipos tecnológicos en donde se deba corregir el factor de potencia y la señal de onda, nuestro medidor sería necesario para corroborar que dicha regulación se está implementando de manera correcta.

Se requiere fortalecer los conceptos de potencias energéticas y adquirir nuevos conocimientos acerca de educación energética, con el fin de que el medidor propuesto, procese y analice señales con ondas no sinusoidales y cargas desbalanceadas. Dicho esto, se crean oportunidades de implementar herramientas como smart grids o redes inteligentes, donde la energía se pueda generar de otras fuentes y la medición siga siendo precisa y exacta.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Implementar un medidor de energía trifásica para sistemas eléctricos no lineales basados en la norma IEEE STD 1459 del 2010 para el manejo de cargas desbalanceadas y ondas no sinusoidales.

3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros matemáticos y electrónicos a considerar para el diseño propuesto de acuerdo con el estándar IEEE 1459-2010.
- Diseñar el sistema electrónico y digital para el sistema de medida propuesto, junto con un software que realice el tratamiento digital de las señales requeridas.
- Implementar el medidor diseñado con la arquitectura y software desarrollado.
- Desarrollar un banco y conjunto de pruebas para comparar los resultados del CIRCUITOR y el AEMC 45b y verificar la trazabilidad del sistema implementado.

4. Marco teórico

A continuación, se explican los conceptos claves que se deben saber para poder realizar este proyecto. Se inicia explicando las distorsiones en la onda, el factor de potencia y la distorsión armónica total en voltaje y corriente, con el fin de entender como se generan las distorsiones en la onda y como están compuestas. Siguiente a esto, se explica el estándar IEEE 1459 del 2010 que es el objetivo principal del proyecto en donde se explican las condiciones que una carga puede presentar y como se deben analizar estas cargas en dichas condiciones. Se procede a realizar un ejercicio práctico en donde se analiza una de las situaciones contempladas en el estándar IEEE 1459 para demostrar la implementación de esta.

Una vez demostrado el estándar, se procede a crear un software que nos permita realizar los cálculos de este de forma digital y al final mostrar los resultados en una página web. Para lograr este software se requiere tener claro los conceptos de programación orientada a objetos, programación web, definición del Front-end, definición del Back-end y la arquitectura de software REST. De esta manera ya es posible tener todo lo necesario para crear el software.

Para entender como funcionan la descomposición de onda y el proceso de convertir una señal análoga a digital, es necesario comprender los principios básicos de la transformada de Fourier y el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.

Por último, se requiere una definición de ¿qué es el internet de las cosas?, ¿qué permite? y ¿qué dispositivos se usan para lograr dicha funcionalidad? Para implementar este concepto, se utilizará la tarjeta raspberry pi, la cual cumple con las características fundamentales para conectar el medidor de energía a la red de internet.

4.1. Medidores en la actualidad

Thomas Alva Edison, al presentó el primer sistema de distribución eléctrico usando corriente alterna, creó un modelo de negocio en dónde la luz se pudiera vender de la misma manera que el gas. Su medidor eléctrico, patentado en Estados Unidos en 1881 usa efectos electroquímicos de corriente como método de funcionamiento.[2]

Este medidor contenía una celda una celda electrolítica, en donde su ubicaba una lámina de cobre pesada con precisión al inicio del periodo de facturación. A medida que la corriente eléctrica pasaba por la lámina provoca una deposición de cobre. Al finalizar el periodo de

facturación se vuelve a pesar el cobre y la diferencia en peso representó la cantidad de electricidad que había pasado. De tal forma se calibró el medidor para que las facturas pudieran expresarse en pies cúbicos de gas.[2]

Este medidor se usó hasta el fin del siglo XIX; pese a ello, obtener el valor de la medición era complicado de obtener para la empresa de servicios públicos y aún más para el cliente. Por ende, Edison creó un sistema de conteo para mejorar la lectura de este.[2]

En la misma década, otro medidor de energía fue creado usando el principio de oscilación o rotación proporcional a la energía el cual podría conducir a un registro de lectura. Este principio lo crearon los americanos William Edward Ayrton y John Perry en 1881. En su forma más avanzada, este medidor tenía dos péndulos, con una bobina en ambos péndulos conectados al voltaje. Debajo de los péndulos había dos bobinas de corriente que se enrollaban en direcciones opuestas. Por tanto, uno de los péndulos iba más lento y el otro más rápido que sin carga. La diferencia entre los tiempos de oscilación, promovió el mecanismo de conteo. El rol de los dos péndulos se intercambió cada minuto, de modo que se pudiera compensar la diferencia inicial entre los tiempos de oscilación de los péndulos. Al mismo tiempo, se dio cuerda al reloj.[2]

Estos medidores eran costosos porque contenían dos relojes y fueron reemplazados gradualmente por medidores de motor. Los medidores de péndulo miden amperios·hora o vatios·hora, pero solo se pueden usar para corriente continua.[2]

En los medidores de motor, el par motor es proporcional a la carga y está equilibrado por un par de frenado, de modo que la velocidad del rotor es proporcional a la carga cuando los pares están en equilibrio. El americano Elihu Thomson, inventó su Wattímetro de grabación en 1889 para General Electric. Era un motor sin hierro, con el rotor estimulado por el voltaje a través de una bobina y una resistencia, usando un conmutador.[2]

De tal manera, los medidores fueron mejorando sus características en cuanto su forma de medir la corriente eléctrica y la lectura de esta para los usuarios. Sin embargo, como lo menciona Andrew J Berrisfold en el proyecto del impacto armónico [1], dichos medidores no contemplaron las señales de voltaje y corriente fueran no sinusoidales, lo que conlleva a que las mediciones no puedan ser exactas.

El estándar IEEE 1459-2010 (1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions., n.d.) explica la forma en cómo se debe obtener las distintas potencias eléctricas en

el caso de condiciones desbalanceadas.

En la tabla **4-1** se enseña algunos de los medidores usados en la actualidad en Colombia y se hace un estudio de su ficha técnica para verificar si estos implementan el estándar IEEE 1459 y si cuentan con una aplicación web para ver las mediciones de este.

Medidor - Fabricante	IEEE 1459	Aplicación web	Referencia
MONOFÁSICO BIFILAR - 1F2H - RYMEL	NO	NO	[3]
MONOFÁSICO TRIFILAR - 1F3H - RYMEL	NO	NO	[4]
TRIFÁSICO TETRAFILAR - 3F4H-LCD - RYMEL	NO	NO	[5]
BIFÁSICO TRIFILAR - 2F3H-LCD - RYMEL	NO	NO	[6]
Todos los medidores - Iskra	NO	NO	[7]
Todos los medidores - Skaitek	NO	NO	[8]
Medidores de energía clase 1 - INELCA	NO	NO	[9]
Aclara I-210+c™ Electricity Meter - Sensus	NO	SI	[10]
Medidores inteligentes tipo SMETS 1 y SMETS 2	NO	SI	[11]

Tabla 4-1.: Autor - Características de medidores

Al obtener los resultados de la investigación, los medidores más antiguos no cumplen con los dos criterios propuestos; sin embargo, los medidores inteligentes (Smart Meters), cuentan con aplicaciones web, donde sus valores pueden ser visualizados, pero estas mediciones no implementan el IEEE 1459.

4.2. Factor de potencia y distorsión de la onda.

Las distorsiones presentes en la onda se interpretan como ruido eléctrico, estas distorsiones es la superposición de señales en múltiplos de la frecuencia fundamental. Muchas de estas distorsiones son generadas por equipos como por ejemplo televisores, computadores, microondas; etc.

$$P = V_s I_s \cos\phi \quad (4-1)$$

El factor de potencia (FP) se puede interpretar como la relación entre la energía transmitida a la carga y la energía máxima que podría transmitirse siempre que las pérdidas de línea se mantengan iguales. [12] Este se puede expresar como la analogía entre la potencia real media

P y el producto de la tensión y corriente:

$$PF = \frac{P}{V_s I_s} = \cos\phi \quad (\text{Usando 4-1}) \quad (4-2)$$

Y por lo tanto, la corriente es:

$$I_s = \frac{P}{V_s PF} \quad (\text{Usando 4-2}) \quad (4-3)$$

Esto demuestra que el PF y la corriente I_s son inversamente proporcional.

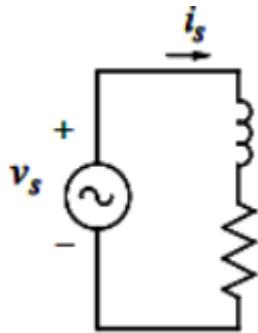


Figura 4-1.: Circuito RL
[13]

4.3. Distorsión armónica total (THD) y valor RMS de la corriente distorsionada

La corriente sinusoidal consumida por la carga lineal de la figura 4-1, no tiene distorsión, sin embargo, los accionamientos eléctricos toman corrientes con una forma de onda distorsionada como se muestra en la corriente $i_s(t)$ en la figura 4-2(a). La tensión de la red V_s se supone que es sinusoidal.[13]

El siguiente análisis se aplica al suministro de la red eléctrica, ya sea monofásico o trifásico, en cuyo caso el análisis se realiza por fases. [13]

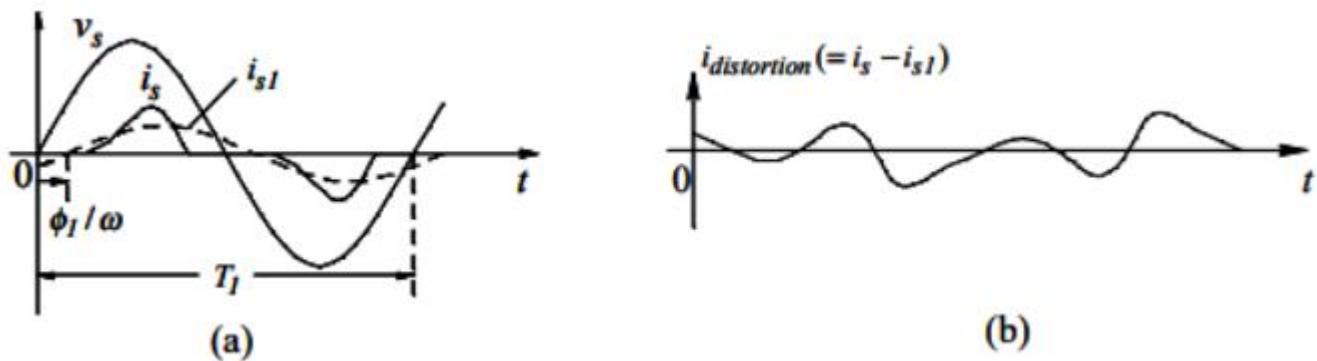


Figura 4-2.: Señal de corriente con distorsión: (a) Fase de la corriente y su componente fundamental; (b) Componente de distorsión

[13]

La onda periódica de la corriente $i_s(t)$ en la figura 4-2(a), se puede expresar en componentes de Fourier:

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{sh}(t) \quad (4-4)$$

Donde:

$$\sum_{h=2}^{\infty} i_{sh}(t) = i_{distortion}(t)$$

El componente dc se asume como cero e $i_{s1}(t)$ es la componente fundamental mostrada con una señal de puntos en la figura 4-2(a). Alguna de las frecuencias armónicas en la ecuación 4-4 podrían no tener valor. Partiendo de la ecuación 4-4 la componente de distorsión en la corriente es la diferencia entre $i_s(t)$ y su componente de frecuencia fundamental:[13]

$$i_{distortion}(t) = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} i_{sh}(t) \quad (4-5)$$

El componente de distorsión está graficado en la figura 4-2(b). En una onda de forma repetitiva con la frecuencia de linea f_1 y su tiempo de periodo $T_1 (= \frac{1}{f_1})$, los componentes en la expresión de la ecuación 4-5 son en los múltiplos de h en la frecuencia fundamental, como por ejemplo, el 3^{er} armónico ($h = 3$) está en 180Hz con un sistema de 60Hz.[13]

A continuación, se usa un concepto básico: en una forma de onda repetitiva, la integral de el producto de dos componentes armónicos (incluyendo la fundamental) en frecuencias desiguales sobre repeticiones del tiempo de periodo es igual a cero: [13]

$$\int_{T_1} f_{h1}(t) \cdot g_{h2}(t) \cdot dt = 0 \quad (4-6)$$

Donde:

$$h1 \neq h2$$

Con el fin de obtener el valor rms de $i_s(t)$ en la figura 4-2(a), se aplica el concepto básico de rms:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_{T_1} (i_s)^2(t) \cdot dt} \quad (4-7)$$

Donde, de la ecuación 4-4

$$i_s^2 = (i_{s1} + (\sum_{h=2}^{\infty} i_{sh})^2 = i_{s1}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} i_{sh}^2 + \text{productos en términos de frecuencia de cruce} \quad (4-8)$$

Sustituyendo la ecuación 4-8 en la ecuación 4-7 y reconociendo que cada integral de los términos del producto de frecuencia cruzada es igual a cero (de acuerdo a la ecuación 4-6),

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1} i_{s1}^2(t) \cdot dt + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{T_1} \int_{T_1} i_{sh}^2(t) \cdot dt} \quad (4-9)$$

Donde:

$$\frac{1}{T} \int_{T_1} i_{s1}^2(t) \cdot dt = I_{s1}^2$$

$$\sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{T_1} \int_{T_1} i_{sh}^2(t) \cdot dt = I_{distortion}^2$$

Por lo tanto,

$$I_s = \sqrt{I_{s1}^2 + I_{distortion}^2} \quad (4-10)$$

Donde el valor de el componente de la frecuencia fundamental y los componentes de distorsión son los siguientes:

$$I_{s1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1} i_{s1}^2(t) \cdot dt} \quad (4-11)$$

y

$$I_{distortion} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{1}{T_1} \int_{T_1} i_{sh}^2(t) \cdot dt \right)} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh}^2} \quad (4-12)$$

La ecuación descrita anteriormente, presenta que el valor de la componente de distorsión en la figura 4-2 puede ser obtenido de los valores de las componentes individuales de los armónicos.[13]

Tomando como referencia los valores de los componentes de la distorsión y la fundamental en la corriente $i_s(t)$, un índice de distorsión llamado Distorsión Armónica Total (THD) es definida en porcentaje y este mismo puede ser presentado en distintas formas bajo las siguientes ecuaciones:

$$\%THD = 100 * \frac{I_{distortion}}{I_{s1}} = 100 * \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh}^2}}{I_{s1}} \quad (4-13)$$

4.4. Definiciones del STD IEEE 1459 para la medición de calidad energética bajo condiciones balanceadas y desbalanceadas

4.4.1. Mono-fase

Mono-fase sinusoidal

Se parte de una entrada de tipo sinusoidal:

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (4-14)$$

Y si a esta, se le conecta una carga lineal, se producirá una corriente sinusoidal de tipo:

$$i\sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (4-15)$$

Donde:

V es el valor rms de el voltaje (V)

I es el valor rms de la corriente (*I*)

ω es la frecuencia angular $2\pi f(\text{rad/s})$

f es la frecuencia del sistema (Hz)

θ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente ($rads$)

t es el tiempo (s)

Potencia activa(W)

La potencia activa P o también conocida como potencia real, es la medición del flujo de energía durante un intervalo de tiempo τ a $\tau + KT$. [12]

$$P = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} pdt = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} p_a dt \quad (4-16)$$

Donde:

$T = 1/f$ es el ciclo de tiempo (s)

k es un número entero positivo (s)

τ es el momento cuando empieza la medición (s)

$$P = VI \cos \theta$$

Potencia Reactiva (var)

La magnitud de la potencia reactiva Q iguala la amplitud de la potencia reactiva instantánea P_q .[12]

$$Q = VI \sin \theta \quad (4-17)$$

$$Q = \frac{\omega}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} i \left[\int v dt \right] dt \quad (4-18)$$

Sí la carga es inductiva, entonces $Q > 0$. Sí la carga es capacitiva, entonces $Q < 0$. Por lo tanto, cuando la corriente atrasa el voltaje $\theta > 0$ y viceversa.

Potencia Aparente (VA)

La potencia aparente S es el producto del voltaje y corriente.[12]

$$S = VI \quad (4-19)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

La potencia aparente de una carga monofásica se puede interpretar como la potencia activa total que se puede transmitir a través de la misma línea mientras se mantiene el voltaje constante de la carga y a línea de alimentación de pérdida de potencia constante.[12]

Factor de potencia

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4-20)$$

El factor de potencia se puede interpretar como la razón entre la energía transmitida a la carga sobre la energía máxima que podría transmitirse, siempre y cuando las pérdidas de línea se mantengan iguales.[12]

Para un S y V dados, la utilización máxima de la línea es obtenida cuando $P = S$, por lo tanto, la razón P/S es un indicador de factor de utilización.[12]

Potencia Compleja (VA)

La potencia compleja, cuya magnitud se conoce como potencia aparente, se expresa como la suma vectorial de la potencia activa (parte real) y la potencia reactiva (parte imaginaria). [12]

$$S = P + jQ = VI^* \quad (4-21)$$

Esta expresión proviene del triángulo de potencias S, P Y Q . En la figura 4-3 se observa un resumen de las direcciones del flujo de potencia. El ángulo θ es el ángulo de fase de la impedancia equivalente compleja $Z/\theta = \mathbf{V}/\mathbf{I}$. [12]

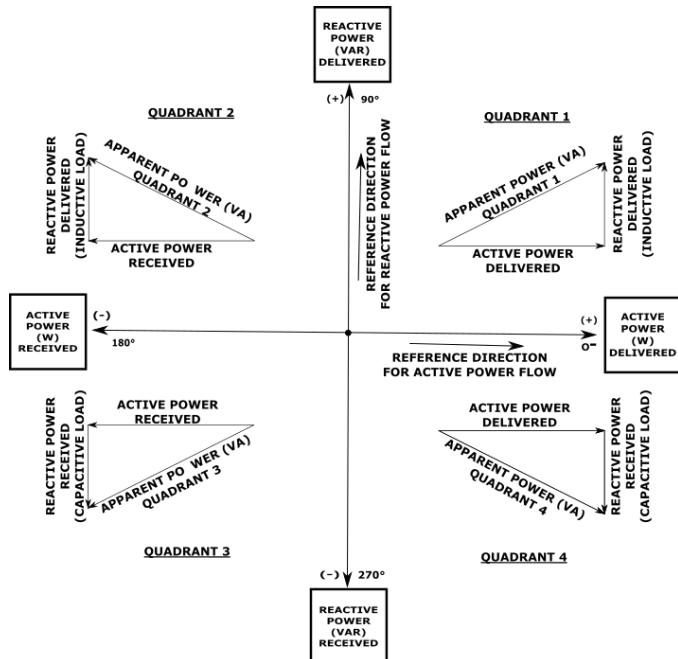


Figura 4-3.: Cuatro cuadrantes de las direcciones del flujo de potencia [12]

4.4.2. Mono-fase no sinusoidal

Para condiciones estables, una señal de corriente o voltaje no sinusoidal periódica, tiene dos componentes distintos: Los componentes del sistema de frecuencia V_1 e i_1 y el término restante v_H e i_H .[12]

$$v = v_1 + v_H \quad (4-22)$$

e

$$i = i_1 + i_H$$

Donde:

$$v_1 = \sqrt{2V_1} \sin(\omega t - \alpha_1)$$

$$i_1 = \sqrt{2I_1} \sin(\omega t - \beta_1)$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h)$$

Los valores rms al cuadrado son los siguientes:

$$\begin{aligned} V^2 &= V_1^2 + V_H^2 \\ I^2 &= I_1^2 + I_H^2 \end{aligned} \quad (4-23)$$

Las formas de ondas distorsionadas de a menudo contienen componentes de frecuencias llamadas armónicos. Un grupo especial de inter-armónicos es caracterizado por $h < 1$. Estos armónicos tienen periodos más largos que el periodo T de la frecuencia fundamental.[12]

Si la onda distorsionada de corriente y voltaje está compuesta únicamente de armónicos, la medición en intervalos de tiempo kT , permitirá una medición correcta de rms y valores de potencia. [12]

Si al menos uno de los inter-armónicos de orden h es irracional, la onda observada no es periódica. En tal caso las mediciones deberían ser infinitas con el fin de tener una medición correcta del rms y las potencias.[12]

Distorsión Total Armónica (THD)

La desviación en general de una onda distorsionada, se puede estimar con la ayuda de la distorsión armónica total. La distorsión armónica total del voltaje es el siguiente:

$$THD_v = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (4-24)$$

La distorsión armónica total de corriente es el siguiente:

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (4-25)$$

Potencia Activa (W)

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} pdt = \int_{\tau}^{\tau+kT} p_a dt \quad (4-26)$$

$$P = P_1 + P_H$$

Potencia activa fundamental (W)

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt = V_i I_1 \cos \theta_1 \quad (4-27)$$

Potencia Aparente (VA)

$$S = VI \quad (4-28)$$

La potencia aparente es la cantidad de potencia activa que pueden ser suministradas a la carga en condiciones ideales.[12]

Potencia aparente fundamental (VA)

La potencia fundamental S_1 y sus componentes P_1 y Q_1 son las cantidades actuales que ayudan a definir el tipo de flujo del campo magnético asociado con el voltaje y la corriente fundamental.[12]

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (4-29)$$

Potencia Aparente no fundamental

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (4-30)$$

También se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$S_N^2 = D_L^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (4-31)$$

Potencia de la Distorsión de Corriente (var)

$$D_1 = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (4-32)$$

Potencia de la Distorsión de Volatje (var)

$$D_v = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \quad (4-33)$$

Potencia de la Armónica Aparente (VA)

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_V) \quad (4-34)$$

Potencia de distorsión armónica (var)

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P^2} \quad (4-35)$$

Potencia no activa (var)

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4-36)$$

Esta potencia agrupa componentes no activas fundamentales y no fundamentales.[12]

Factor de potencia fundamental

$$PF_1 = \cos\theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (4-37)$$

Este coeficiente, facilita la evaluación de las condiciones del flujo energía. PF_1 es también conocido como factor de desplazamiento[12]

Factor de potencia

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4-38)$$

Dados un S y un V , la máxima utilización de la línea es obtenido cuando $P = S$, por lo tanto, la razón P/S es un indicador de factor de utilización.[12]

Cuando el $THD_v < 5\%$ y $THD_I > 40\%$, es conveniente usar la siguiente ecuación:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} PF_1 \quad (4-39)$$

4.4.3. Ejemplo monofásico

En un circuito de alimentación monofásico se tienen las siguientes medidas tomadas por un analizador de redes eléctricas: $V_{Total} = 120V$; $THD_i = 45\%$; $THD_v = 4\%$; $S_1 = 200 + j40VA$.

Estimar de acuerdo a los criterios de la norma IEEE 1459 las magnitudes de los siguientes parámetros: $V_1, I_1, P_1, Q_1, S_T, P_T, V_h, I_h, D_V, D_i, S_h$.

Según la ecuación 4-19:

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad S_1 = \sqrt{200^2 + 40^2}$$

$$* S_1 = 203,9608\text{VA}$$

Según la ecuación 4-24:

$$THD_v = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1}; \quad THD_v^2 = \left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1; \quad THD_v^2 = \frac{V^2 - V_1^2}{V_1^2}$$

$$THD_v^2 * V_I^2 = V^2 - V_I^2; \quad THD_v^2 * V_I^2 + V_I^2 = V^2; \quad V_I^2(THD_v^2 + 1) = V^2;$$

$$V_1^2 = \frac{V^2}{THD_{V^2} + 1}; \quad V_1 = \sqrt{\frac{V^2}{THD_{V^2} + 1}}; \quad V_1 = \sqrt{\frac{120V^2}{0,04^2 + 1}}$$

* $V_1 = 119,9041V$

$$V_H = THD_v * V_1; \quad V_H = 0,04 * 119,9041V$$

* $V_H = 4,7962V$

Según la ecuación 4-29:

$$S_1 = V_1 * I_1; \quad I_1 = \frac{S_1}{V_1}; \quad I_1 = \frac{203,960\text{VA}}{119,904\text{V}}$$

* $I_1 = 1,7010A$

$$I_H = THD_I * I_1; \quad I_H = 0,45 * 1,7010A$$

$$* I_H = 0,7654A$$

Según la ecuación 4-23:

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2; \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_H^2}; \quad I = \sqrt{1,7010A^2 + 0,7654A^2}$$

$$* I = 1,8653A$$

Según la ecuación 4-29:

$$S = V * I; \quad S = 119,9041V * 1,8653A$$

$$* S = 223,836VA$$

$$S_H = V_H * I_H; \quad * S_H = 4,7962V * 0,7654A = 3,6710VA$$

Según la ecuación 4-30:

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2}; \quad S_N = \sqrt{223,836VA^2 - 203,9608VA^2}$$

$$* S_N = 92,2094VA$$

Según la ecuación 4-32:

$$* D_i = V_1 * I_H = 119,9041V * 0,7654A = 91,7745VA$$

$$* D_v = V_H * I_1 = 4,7962V * 1,7010A = 8,1583VA$$

Según la ecuación 4-27:

$$P_1 = V_1 * I_1 * \cos\theta_1; \quad \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{P_1}{V_1 * I_1}\right); \quad \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{200VA}{119,9041V * 1,7010A}\right)$$

$$* \theta_1 = 11,3044$$

Según la ecuación 4-38:

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_1}; \quad PF_1 = \frac{203,9608VA}{200VA};$$

* $PF_1 = 0,9805$

Según la ecuación 4-39:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} PF_1; \quad PF = \frac{1}{\sqrt{1+0,45^2}} 0,9805$$

* $PF = 0,8941$

Según la ecuación 4-38:

$$PF = \frac{P}{S}; \quad P = PF * S; \quad P = 0,8941 * 223,836VA$$

* $P = 200,1317\text{VA}$

Según la ecuación 4-36:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad \sqrt{223,836VA^2 - 200,1317VA^2}$$

* $N = 100,248$ VAR

Según la ecuación 4-2

Según la ecuación 4-26:

* $P_H = 0.1317VA$

Según la ecuación 4-55:

* $P_H = 0,1317VA$

Según la ecuación 4-35:

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P^2 H}; \quad D_H = \sqrt{3,6710VA^2 - 0,1317VA^2}$$

* $D_H = 3,6686\text{VAR}$

En la tabla 4-2, se relacionan los resultados obtenidos del ejemplo anterior.

Parametro	Total (T)	Fundamental (1)	No fundamental (H)
V (V)	120	119,9041	4,7962
I (A)	1,8653	1,701	0,7654
THDV (%)	4	N/A	N/A
THDI (%)	45	N/A	N/A
P (W)	200,1317	200	0,1317
Q (VAR)	N/A	40	N/A
S (VA)	223,836	203,9608	3,671
S _N (VA)	92,2094	N/A	N/A
D _I (VA)	91,7745	N/A	N/A
D _V (VA)	8,1583	N/A	N/A
θ (°)	N/A	11,3044	N/A
PF	0,8941	0,9805	N/A
N (VAR)	100,2489	N/A	N/A
D _H (VAR)	3,6686	N/A	N/A

Tabla 4-2.: Autor - Resultado del ejemplo monofásico no sinusoidal

4.4.4. Sistema trifásico sinusoidal balanceado

Para este caso se asume un sistema de secuencia positiva rotativa en sentido anti-horario, a, b, c, lo voltaje linea a neutro son los siguientes:

$$v_a = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (4-40)$$

$$v_b = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_c = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Las líneas de corriente tienen ecuaciones similares, las cuales son:

$$i_a = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (4-41)$$

$$i_b = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta - 120^\circ)$$

$$i_c = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta + 120^\circ)$$

En sistemas trifásicos balanceados y perfectamente sinusoidal, los sistemas de bajo voltaje no son comunes, solo bajo condiciones de laboratorio en donde se usan amplificadores de potencia de baja distorsión.[12]

En el caso de un sistemas de tres líneas, con voltajes línea a neutro son definidas asumiendo un nodo neutral artificial, el cual se obtienen con ayuda de tres resistencias idénticas conectadas en **Y**.

Potencia activa (w)

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} pdt \quad (4-42)$$

$$P = 3VI\cos\theta = \sqrt{3}V_{\ell\ell}I\cos\theta$$

Donde

V es el voltaje de línea a neutro

V_{ll} es el voltaje línea a línea

Potencia reactiva

$$Q = 3VI \sin \theta = \sqrt{3}V_{\ell\ell}I \sin \theta \quad (4-43)$$

$$|Q| = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Potencia aparente

$$S = 3VI = \sqrt{3}V_{ff}I \quad (4-44)$$

Factor de potencia

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4-45)$$

4.4.5. Sistema trifásico sinusoidal no balanceada

En este caso, los tres hilos de corriente I_a , I_b y I_c , no tienen las mismas magnitudes y no están desplazadas exactamente 120° con respecto una a la otra. Las cargas no balanceadas conlleva a corrientes asimétricas que a su vez causan asimetría de voltaje. En algunas ocasiones sucede que los tres fasores de voltaje no son simétricos. Esto conduce a corrientes asimétricas incluso cuando la carga está perfectamente balanceada.[12]

Las ecuaciones de voltaje línea a neutro son los siguientes:

$$v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \alpha_a) \quad (4-46)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \alpha_b - 120^\circ)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \alpha_c + 120^\circ)$$

Donde por lo menos una de las tres amplitudes linea a neutro $\sqrt{2}V_q$, $\sqrt{2}V_b$, o $\sqrt{2}V_c$ tiene un valor diferente que al de las otras dos amplitudes. Lo mismo debe aplicar a los ángulos de las fases α_a , α_b , y α_c . Si un ángulo de fase tiene un valor distinto que los otros dos, el sistema está perdiendo simetría y no es balanceado.[12]

Las ecuaciones de corriente líneas a neutro son las siguientes:

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \beta_a) \quad (4-47)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \beta_b - 120^\circ)$$

$$i_c = \sqrt{2}i_c \sin(\omega t + \beta_c + 120^\circ)$$

Potencia Activa

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} pdt \quad (4-48)$$

$$P = P_a + P_b + P_c$$

Donde P_a , P_b y P_c son potencias de fases activas:

$$P_a = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_a i_a dt = V_a I_a \cos \theta_a; \quad \theta_a = \alpha_a - \beta_a \quad (4-49)$$

$$P_b = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_b i_b dt = V_b I_b \cos \theta_b; \quad \theta_b = \alpha_b - \beta_b$$

$$P_c = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_c i_c dt = V_c I_c \cos \theta_c; \quad \theta_c = \alpha_c - \beta_c$$

Potencias activa en secuencias positivas, negativas y cero (w)

En sistemas de cuatro hilos, hay situaciones cuando el uso componentes simétricos pueden ser de ayuda. Los componentes simétricos de voltaje V^+ , V^- y V_0 y las componentes de corriente I^+ , I^- e I_0 con sus respectivos ángulos θ^+ , θ^- y θ^0 producen los siguientes tres componentes de potencia activa:[12]

La potencia de secuencia positiva:

$$P^+ = 3V^+I^+\cos\theta^+ \quad (4-50)$$

La potencia de secuencia negativa:

$$P^- = 3V^- I^- \cos \theta^- \quad (4-51)$$

La potencia de secuencia cero:

$$P^0 = 3V^0 I^0 \cos\theta^0 \quad (4-52)$$

La potencia activa total es:

$$P = P^+ + P^- + P^0 \quad (4-53)$$

Potencia reactiva (var)

Las potencias reactivas por fase son definidas con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$Q_a = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_a \left[\int v_a dt \right] dt = V_a I_a \sin \theta_a \quad (4-54)$$

$$Q_b = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_b [\int v_b dt] dt = V_b I_b \sin \theta_b$$

$$Q_c = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_c [\int v_c dt] dt = V_c I_c \sin \theta_c$$

La potencia reactiva total es:

$$O = O_a + O_b + O_c \quad (4-55)$$

Potencias aparentes en fase

$$S_a \equiv V_a I_a; \quad S_b \equiv V_b I_b; \quad S_c \equiv V_c I_c \quad (4-56)$$

$$S_a^2 = P_a^2 O_a^2; \quad S_b^2 = P_b^2 O_b^2; \quad S_c^2 = P_c^2 I_c$$

Potencia aparente aritmética

$$S_A = S_C + S_B + S_C \quad (4-57)$$

$$S_A \equiv \sqrt{P^2 + O^2}$$

Potencia aparente del vector

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4-58)$$

En la figura 4-4, se muestra un interpretación de S_V y S_A .

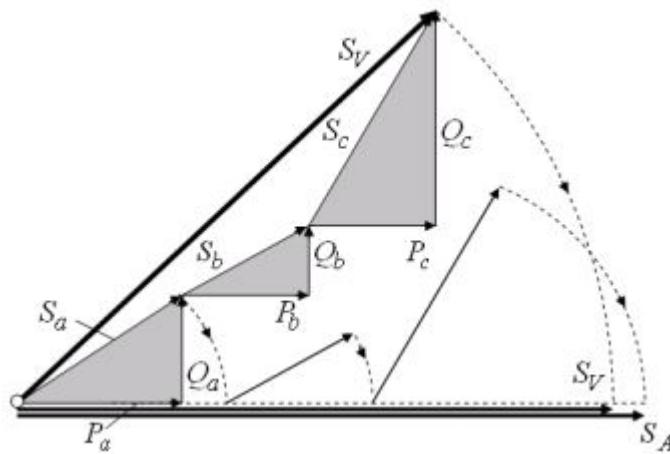


Figura 4-4.: Potencias aparentes aritméticas y vectoriales
[12]

Factor de potencia aritmético y del vector

$$PF_V = \frac{P}{S_V} \quad (4-59)$$

$$PF_A = \frac{P}{S_A}$$

Una línea trifásica que abastece a uno o más clientes debería ser vista como un solo camino, una entidad que transmite la energía eléctrica a lugares donde es convertida en otras forma de energía. Esta mal ver cada fase como una ruta de energía independiente.[12]

Potencia aparente efectiva

Este concepto asume un circuito balanceado virtual que tiene exactamente las mismas líneas de perdidas como el circuito des balanceado actual. Para un sistema de 4 líneas, el balance de la perdida de potencia es expresado en la siguiente ecuación:[12]

$$r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2) = 3rI_e^2 \quad (4-60)$$

Donde:

r es la resistencia

I_n es la corriente actual

r_n Es el cable neutro de la resistencia

De las ecuaciones anteriores, la corriente equivalente de un sistema de 4 líneas es el siguiente:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2}{3}} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2 + (1 + 3\rho)(I^0)^2} \quad (4-61)$$

Y para un sistema de tres hilos donde $I^0 = 0$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2} \quad (4-62)$$

Factor de potencia efectiva

$$PF_e = \frac{P}{S_e} \quad (4-63)$$

4.5. Ejercicio Práctico

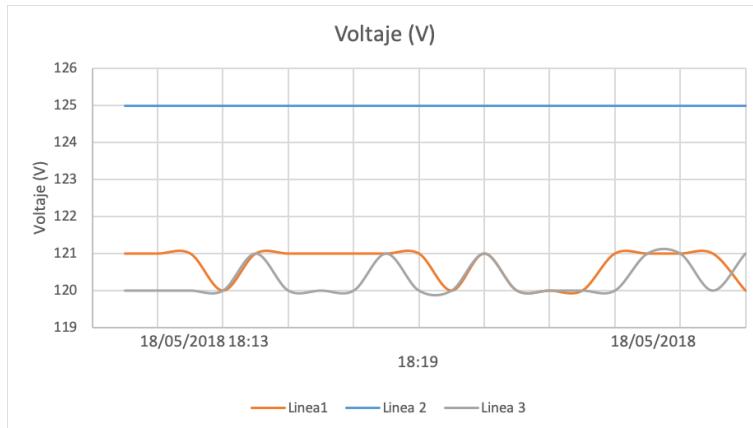
4.5.1. Análisis de datos obtenidos de tres cargas no lineales

A continuación, se muestra el análisis de los datos obtenidos por el circutor de tres computadores de los ETM de la Universidad Santo Tomás en la sede central, siguiendo las normas establecidas para cada caso a nivel nacional.

El circutor no posee una memoria que almacene los datos medidos, por tal razón, los datos obtenidos se transmiten en tiempo real por comunicación serial a un computador por medio de un programa realizado en Visual Studio, donde se pueden adquirir las medidas de potencia, tensiones, voltajes, THDi, THDv, en una hoja de cálculo.

Las medidas tomadas y el análisis de estas, se realizaron tomando como referencia la norma NTC 1340 (tercera actualización) y el IEEE 1159, el cual establece el tiempo de muestreo para el monitoreo de calidad de energía eléctrica que es mayor a un minuto para sistemas de larga duración en variaciones de rms.

Nombre	Fecha	Hora	Prom	Min	Max	Muestras	Duración	Unidades
Frecuencia	18/05/2018	18:13	60	60	60	30	6:00	min:s

Tabla 4-3.: Autor - Datos de caracterización de frecuencia**Figura 4-5.:** Autor - Voltaje RMS

Según la norma NTC 1340 (Tercera actualización) expresa que el 100 % de los valores medidos en el rango establecido del IEEE 1159, deben estar dentro del intervalo definido en la figura 4-6

Con los valores de la figura 4-5 se evidencia que los valores máximos y mínimos de VRMS, cumplen con los porcentajes establecidos.

$$X1 = \frac{Vmaxl1}{120} = \frac{121}{120} = 1,008; \textbf{0,8\%VRMS}$$

$$X2 = \frac{Vmaxl2}{120} = \frac{125}{120} = 1,041; \textbf{4,1\%VRMS}$$

$$X3 = \frac{Vmaxl3}{120} = \frac{121}{120} = 1,008; \textbf{0,8\%VRMS}$$

Porcentaje máximos de volatjes

$$y1 = \frac{V_{minl1}}{120} = \frac{120}{120} = 1,00; \textbf{0 \%VRMS}$$

$$y2 = \frac{V_{minl2}}{120} = \frac{125}{120} = 1,041; \textbf{4,1 \%VRMS}$$

$$y3 = \frac{V_{minl3}}{120} = \frac{120}{120} = 1,00; \textbf{0 \%VRMS}$$

Porcentaje mínimos de volatjes

VRMS	MÁXIMO	MÍNIMO
L1V	0.8 %	0 %
L2V	4,1 %	4,1 %
L3V	0.8 %	0 %

Tabla 4-4.: Autor - Tabla de rangos máximos y mínimos de VRMS

Al comparar los datos de la tabla en la figura 4-6 con la tabla 4-4, se afirma que la tensión nominal de las cargas cumple con los intervalos establecidos en la norma NTC 1340.

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
L1 I	18/05/2018	18:13	605,1	537	808	mA	6:00	min:s
L2 I	18/05/2018	18:13	624,1	576	790	mA	6:00	min:s
L3 I	18/05/2018	18:13	576,5	553	730	mA	6:00	min:s

Tabla 4-5.: Autor - Datos de caracterización de corriente

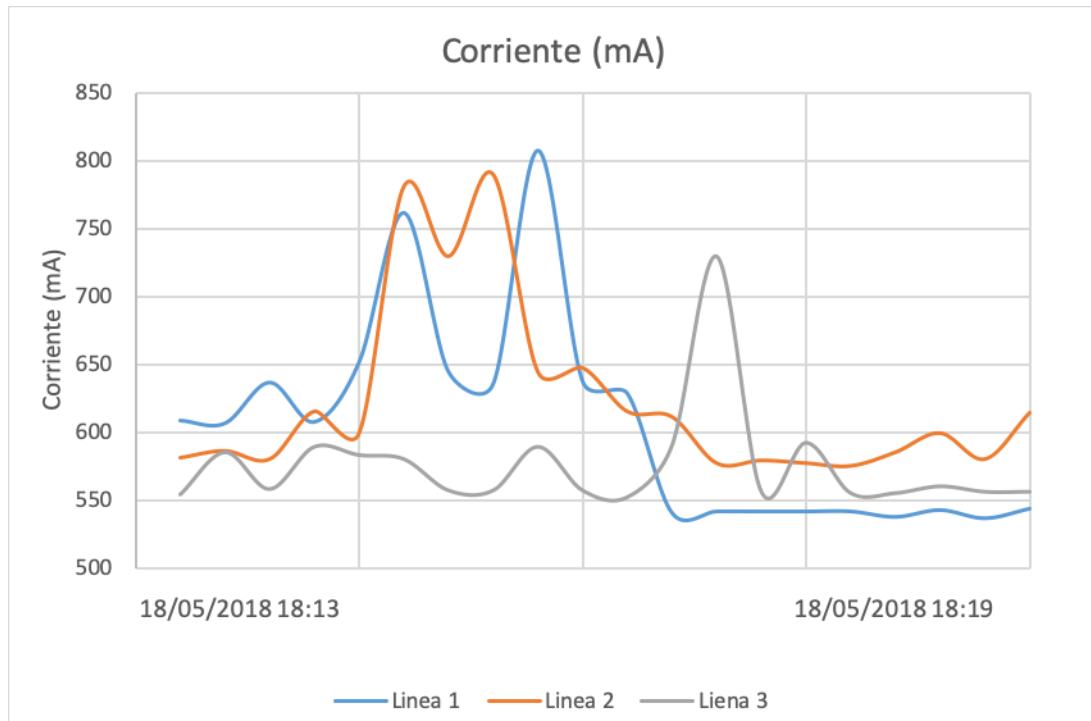
Tabla 2. Clasificación, denominación y valores de la tensión nominal

Clasificación	Nivel	Tensión Nominal (V)		Tensión máxima (% de la nominal)	Tensión mínima (% de la nominal)
		Sistemas Trifásico de 3 ó 4 conductores	Sistemas Monofásico de 3 ó 4 conductores		
Baja Tensión $V_n < 1 \text{ kV}$	Nivel 1 $V_n < 1 \text{ kV}$	-	120	+5	-10
		120/208	-		
		-	120/240		
		127/220	-		
		220	-		
		277/480	-		
		480	-		
Media Tensión $1 \text{ kV} \leq V_n < 57,5 \text{ kV}$	Nivel 2 $1 \text{ kV} \leq V_n < 30 \text{ kV}$	4 160	-	+5	-10
		-	7 620		
		11 400	-		
		13 200	-		
		13 800	-		
	Nivel 3 $30 \text{ kV} \leq V_n < 57,5 \text{ kV}$	34 500	-		
		44 000	-		
Alta Tensión $57,5 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$	Nivel 4 $57,5 \text{ kV} \leq V_n < 220 \text{ kV}$	57 500	-	+5	-5
		66 000	-		
		115 000	-		
		-	230 000		
Extra Alta Tensión $230 \text{ kV} < V_n$		500 000	-		

NOTA La clasificación por niveles es de tipo informativo y corresponden con la regulación CREG 082/2002 o la resolución que la modifique o sustituya.

Figura 4-6.: Clasificación, denominación y valores tensión nominal

[14]

**Figura 4-7.: Autor - Corriente**

La figura 4-7 corresponde a la corriente consumida dentro del intervalo ya establecido, se observa que los valores cambian en un rango de 300 mA, debido al uso que le aplican al computador.

Nombre	Fecha	Hora	RMS	Min	Max	Unidades	Duración	Unidades
L1 THDv	18/05/2018	18:13	2,9	2	3	%	6:00	min:s
L2 THDv	18/05/2018	18:13	2,85	2	3	%	6:00	min:s
L3 THDv	18/05/2018	18:13	2,9	2	3	%	6:00	min:s
L1 THDi	18/05/2018	18:13	40,44	34,2	45,4	%	6:00	min:s
L2 THDi	18/05/2018	18:13	39,75	25,6	44,9	%	6:00	min:s
L3 THDi	18/05/2018	18:13	40,45	30,9	44,5	%	6:00	min:s

Tabla 4-6.: Autor - Distorsión armónica en corriente y voltaje

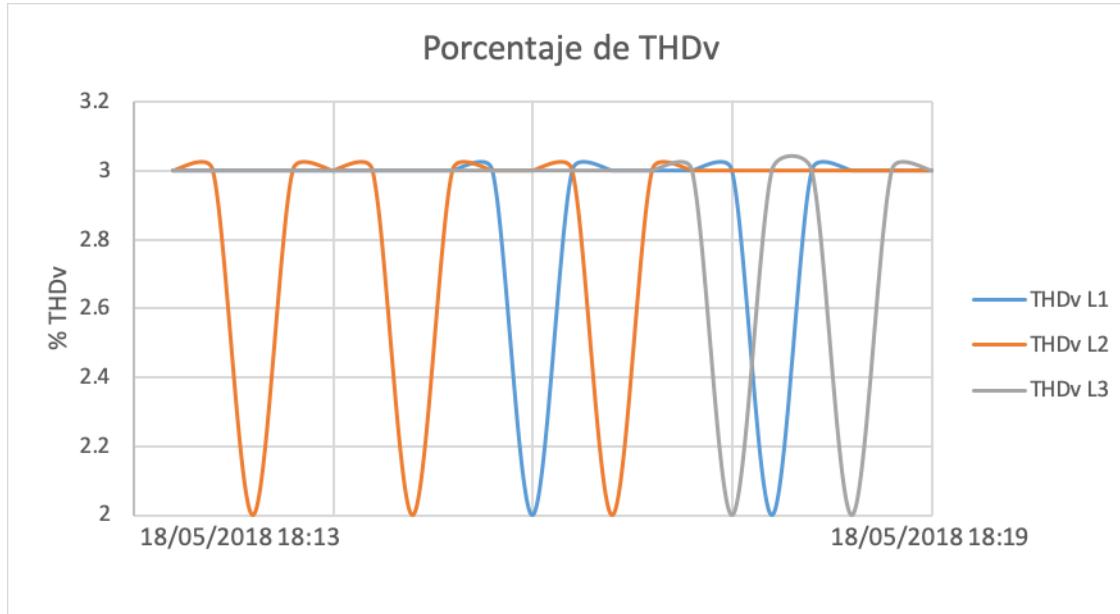


Figura 4-8.: Autor - Porcentaje de THD_v

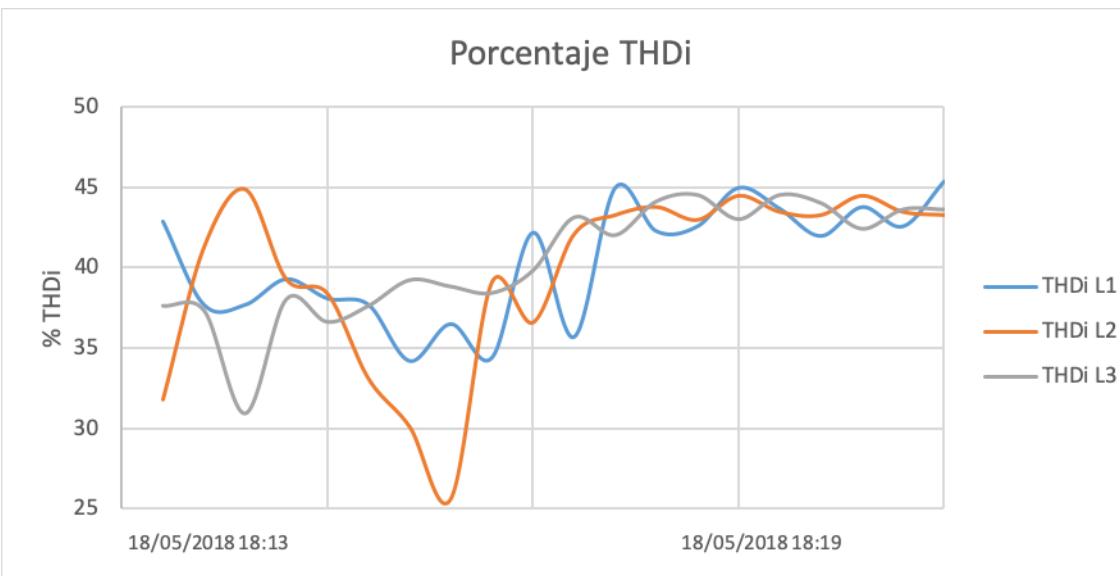


Figura 4-9.: Autor - Porcentaje de THD_i

Los datos de distorsión armónica reflejados en la tabla 4-6 y las figuras 4-8, 4-9 dan a entender como esta afectando las cargas no lineales en el sistema. Según el estándar IEEE 519 en el capítulo 11.1 indica el límite máximo que debe tener el THD en tensión (5%), de acuerdo

en la figura 4-8, los THD de tensión no exceden el valor indicado anteriormente, por lo tanto, la red está cumpliendo la normatividad internacional.

En los THD de corriente, para su análisis es necesario hallar la distorsión de la demanda total con la siguiente ecuación:

$$TDD = \frac{I1 * THD}{IL} \quad (4-64)$$

Ecuación 4-64. Distorsión de demanda total.

La corriente de carga (IL1) se toma el promedio de la tabla de datos que se obtiene por medio del CIRCUTOR de la siguiente manera:

$$IL1 = L1I_{rms\ RMS} = 605,1$$

$$I_{1a1} = IL1 - (IL1 * 0,4044) = 0,605 - (0,605 * 0,4044) = 0,3603$$

Aplicando la ecuación 4-64

$$TDD_1 = \frac{I_{1a1} * THD_1}{IL1} = \frac{0,3603 * 0,4044}{0,605} = 0,2408 = 24,08\%$$

La corriente de carga (IL2) se toma el promedio de la tabla de datos que se obtiene por medio del CIRCUTOR de la siguiente manera:

$$IL2 = L2I_{rms\ RMS} = 624,1$$

$$I_{1a2} = IL2 - (IL2 * 0,3975) = 0,624 - (0,624 * 0,3975) = 0,3760$$

Aplicando la ecuación 4-64

$$TDD_2 = \frac{I_{1a2} * THD_2}{IL2} = \frac{0,3760 * 0,3975}{0,624} = 0,2395 = 23,95\%$$

La corriente de carga (IL3) se toma el promedio de la tabla de datos que se obtiene por medio del CIRCUTOR de la siguiente manera:

$$IL3 = L3I_{rms\ RMS} = 576,5$$

$$I_{1a3} = IL3 - (IL3 * 0,4045) = 0,576 - (0,576 * 0,4045) = 0,2330$$

Aplicando la ecuación 4-64

$$TDD_3 = \frac{I_{1a3} * THD_3}{IL3} = \frac{0,2330 * 0,4045}{0,576} = 0,1636 = 16,36\%$$

Tomando como referencia la figura 4-10, la cual está en el estándar IEEE 519 y la tabla 4-7,

Corrientes	TDD
AL1	24.08 %
AL2	23.95 %
AL3	16.63 %

Tabla 4-7.: Autor - TDD de corrientes

se observa que los resultados de TDD obtenidos en las ecuaciones anteriores están dentro del rango aceptado en el estándar, comprobando que el sistema está trabajando en un estado estable.

**Table 10.3
Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)**

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	11≤ h <17	17≤ h <23	23≤ h <35	35≤ h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.
Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Figura 4-10.: Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general [15]

4.6. Desarrollo de Software

El desarrollo de software es un campo de la ciencia computacional dedicado a la creación, diseño, implementación y soporte de software.

El software se compone de una serie de instrucciones o programas que le dicen al computador que debe hacer. Es independiente del hardware y hace a los computadores programables. [16]

4.6.1. Programación Orientada a Objetos

La programación orientada a objetos (POO) es un paradigma de programación basado en convertir objetos que puedan ser tangibles o intangibles a objetos digitales los cuales tienen

métodos y propiedades. Esto genera ventajas en modularidad y reusabilidad en código. Los objetos que usualmente son instancias de clases, son utilizados para interactuar uno con otro para diseñar aplicaciones y programas de computadores. [17]

4.6.2. Desarrollo Web

El desarrollo web es una área del desarrollo de software la cuál construye, crea y mantiene sitios web. Dentro de su funcionamiento incluye el diseño web, publicación web y administración de base de datos. [18]

4.6.3. Frontend

Frontend se entiende como la parte de un programa en la cuál se crea una interfaz de usuario para que el programa interactue con las personas. Los lenguajes principales desarrollo del frontend son Html5, Javascript y Css 3; aunque hay muchos frameworks facilitan la creación de frontend, cómo lo son: React, Angular2+, Vuejs y Bootsrap entre otros.

4.6.4. Backend

En la capa de arquitectura de un proyecto de software, el backend no es accesible por los usuarios ya que este es el encargado de ejecutar todas las funciones y la lógica del sistema, administra, guarda y envía información a la base de datos.

4.6.5. REST

REST se compone de una serie de principios de comunicación web en la cual se diseñan servicios web orientados a recursos de sistemas, incluyendo como los estados de los recursos son ubicados y transferidos a través del protocolo HTTP por un gran rango de clientes que usan distintos lenguajes de programación. [19]

4.7. Fourier

4.7.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier transforma una señal que depende del tiempo en una señal que depende de la frecuencia (tiempo continuo a tiempo discreto).

$$F(g(t)) = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4-65)$$

Se define como la transformada de Fourier. [20]

$$F^{-1}(G(f)) = g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4-66)$$

Se define como la inversa de Fourier. [20]

4.7.2. Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon

Sea una señal de $x(t)$ de finita y de banda limitada a B , entonces:

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{n}{2B}\right) \frac{\sin(\pi(2Bt - n))}{2Bt - n} \quad [21]$$

para reconstruir una señal limitada entre la banda B es necesario tener una señal de muestreo de $2B$, esta frecuencia se denomina frecuencia de Nyquist.

$$F_{min} > 2f \quad (4-67)$$

Donde:

F_{min} = Frecuencia mínima de muestreo.

f = Frecuencia fundamental de la señal.

4.7.3. Transformada rápida de Fourier (FFT)

Todas las señales periódicas pueden ser representadas en sumatorias de Fourier, de esta sumatoria de Fourier se puede sacar la transformada de Fourier discreta calculando un tiempo finito, esta transformada se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}; \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots N-1 \quad (4-68)$$

$$\text{donde } W_N = e^{-j \frac{2\pi}{N}}$$

La FFT surge en dividir el tiempo, es decir en la descomposición en transformadas de Fourier Discretas mas simples, para esto se asume que la N es potencia de 2, descomponiendo la como:

$$X[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r](W_{N/2})^{rk} + W_N^K \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1](W_{N/2})^{rk} \quad (4-69)$$

$$\text{donde } W_{N/2} = e^{-j \frac{2\pi}{N/2}}, N \text{ siendo el número de muestras. [22]}$$

Esta manera es la que usan la mayoría de conversores análogos digitales y procesadores.

4.8. Convertidores ADC

El convertidor análogo digital (ADC) fue creado para representar en una palabra digital el nivel de voltaje existente en una en una entrada análoga, transformándola en una señal binaria de un número de muestras (N), en la electrónica la resolución de la señal de entrada la da la cantidad de bits disponibles para la conversión, entre mas grande sea la cantidad de bits, mayor es la resolución de la señal y mas confiable es ésta.

4.9. Internet de las cosas

El concepto de internet de las cosas o por su sigla en inglés (IoT) - internet of things, tiene como objetivo conectar lo desconectado, esto significa que algún dispositivo que no tenga comunicación con la red lo pueda tener y así puedan interactuar con las personas y otros objetos. IoT es una tecnología de transición en donde los dispositivos permitirán sentir y controlar el mundo físico haciendo los objetos inteligentes y conectándolos a través de una red inteligente. Esta transición de volver un dispositivo intelectual se puede realizar de distintas formas pero la más común para empezar es la Raspberry. [23]

4.9.1. Raspberry pi 4

La Raspberry Pi 4 es la nueva generación de computadores soportando más memoria RAM y un mejor rendimiento en CPU, GPU y puertos de entrada y salida. Esta tarjeta cuenta con conectividad Bluetooth 2.0, USB, Red y Wifi, también tiene el protocolo de comunicación I2C el cual permite comunicarse con sistemas digitales electrónicos con el fin de recibir y transmitir información y por medio de la conectividad Wifi, se puede hacer conectividad a la red dispositivos que no tienen conectividad. El mayor beneficio de esta funcionalidad de la Raspberry hace posible el concepto de IoT y así puede haber una interacción entre las personas y los dispositivos. [24]

5. Desarrollo y ejecución del proyecto

5.1. Arquitectura del proyecto

El medidor se planteó con base a una arquitectura combinada entre software y hardware, en donde las cargas que se miden serán la entrada inicial del sistema; dicha entrada pasa por un proceso de converison y analisis de datos, estos resultados se pueden visualizar de manera gráfica y númerica en una aplicación web.

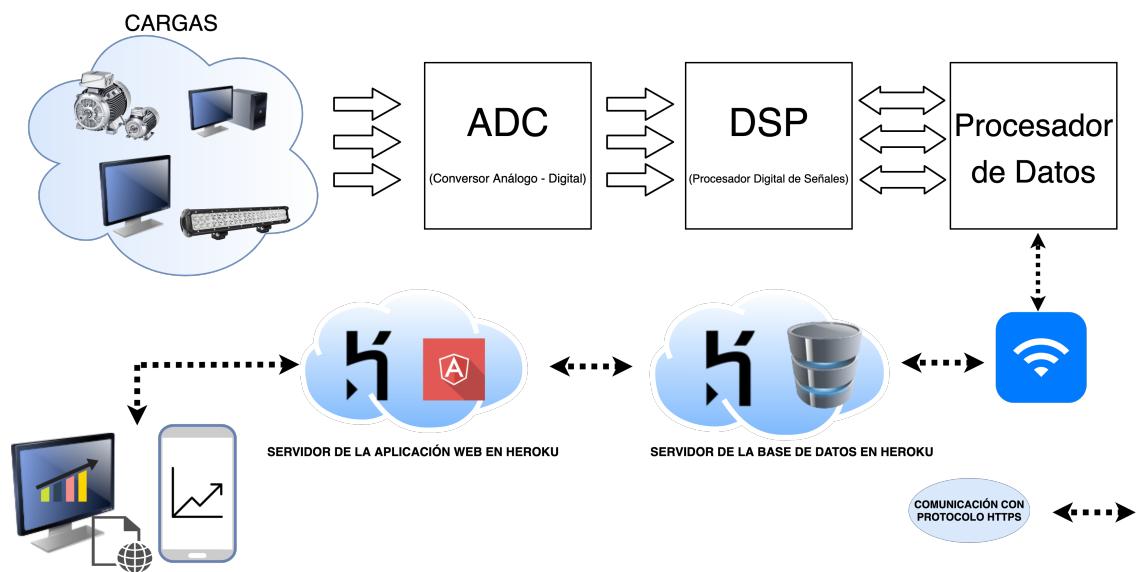


Figura 5-1.: Arquitectura del proyecto (Esquema realizado con la aplicación <https://app.diagrams.net/>)

El proceso de medición empieza en el momento de conectar una carga eléctrica al conversor de señal análoga a digital. Estas señales pasan a un procesador digital de señales, dónde se aplica los parámetros matemáticos establecidos en el estándar IEEE 1459 del 2010, el cual permite la medición de la potencia eléctrica en cualquier tipo de condición.

Dicho esto, la información se envía a un procesador de datos encargado de administrar la lectura, escritura y filtración de datos. El procesador debe contar con conexión a internet, con el fin de enviar la información al servidor de base datos alojado en la nube. La comunicación entre el procesador de datos y el servidor se realiza a través del protocolo de comunicación

HTTPS.

Por lo tanto, el servidor en la nube que se planteó es Heroku ya que tiene la opción de una cuenta gratuita y así alojar la base de datos y la aplicación web sin ningún costo. Por ende las restricciones que tiene este plan, es que no se puede escoger el dominio de la página y hay un límite de espacio de 512MB pero es más que suficiente para el peso que tiene la base de datos de 21.5MB y la aplicación web de 65.2MB.

Una vez configurado el servidor, se escogió el framework javascript Angular 7 para el desarrollo de la aplicación web, ya que por medio del lenguaje de programación Typescript, el cual es un lenguaje tipado y robusto, nos permite tener mayor manipulación y consistencia en los datos; la aplicación utiliza una arquitectura RESTful y este permite, realizar peticiones HTTPS a la base de datos.

Finalmente, la información se visualiza de forma gráfica y numérica en una página web, en donde se pueden ver los valores de voltaje (V), corriente (A), potencia activa(W), potencia aparente (VA), potencia reactiva(VAR) y porcentaje de distorsión armónica en corriente y voltaje en cada fase.

Dicha arquitectura se puede ver en la figura 5-1

5.2. Fase de integración

Considerando las fases y la magnitud del proyecto se decidió investigar e integrar un dispositivo que hiciera el análisis de las señales aplicando las ecuaciones del STD IEEE 1459 del 2010. Durante la búsqueda se encontró que los dispositivos más cercanos son los siguientes:

1. EVM430-F6779-3 Phase Electronic Watt-Hour EVM
2. EVAL-ADE 7978
3. 78M6631 3-Phase PowerMeasurement IC

A continuación se detalla las tarjetas mencionadas:

5.2.1. EVM430-F6779-3 Phase Electronic Watt-Hour EVM

- Es posible ejecutar aplicaciones de medición en tiempo real.



Figura 5-2.: Tarjeta EVM430-F6779-3

[25]

- Viene con software de medición.
- Se puede conectar a cualquier sistema de prueba o voltaje AC.
- Fuentes de alimentación capacitiva y aisladas presentes
- Fácil visualización de resultados y calibración a través de RS-232
- Pantalla LCD de 160 segmentos
- Conectores RF para soporte AMR / AMI
- Soporte RTC de 32 kHz (cabecera disponible para calibración RTC)
- Encabezados para alimentación MSP430 o solo RTC a través de fuentes de alimentación auxiliares

5.2.2. EVAL-ADE 7978



Figura 5-3.: Tarjeta EVAL-ADE7978

[26]

- Permite sensores Shunt en medidores de energía polifásica.
- Inmune a la manipulación magnética.
- Alta precisión; admite EN 50470-1, EN 50470-3, IEC 62053-21, IEC 62053-22, IEC 62053-23, ANSI C12.20, y la estándar IEEE 1459.

- Compatible con 3 fases, 3 o 4 lineas (Delta o estrella).
- Calcula la energía Activa, Pasiva y Aparente en cada fase y en el sistema general.
- Menos del 0.2 % de error en energía activa y reactiva en un rango dinámico de 2000 a 1 a TA = 25°C
- Menos del 0.1 % de error en voltaje, en un rango dinámico de 500 a 1 a TA = 25°C.
- Menos del 0.25 % de error en corriente, en un rango dinámico de 500 a 1 a TA = 25°C.
- Mediciones de calidad de , incluida la distorsión armónica total (THD).
- Suministro de 3.3 V.
- Temperatura de funcionamiento: -40°C a +85°C.
- Interfaces seriales flexibles I2C, SPI y HSDC.

5.2.3. 78M6631 3-Phase PowerMeasurement IC

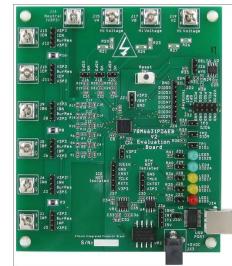


Figura 5-4.: Tarjeta 78M6631-EVM-DSL
[27]

- 0.5 % de precisión de vatios sobre 2000 : 1 corriente Rango y temperatura exclusiva
- Excede los estándares IEC 62053 / ANSI C12.20.
- Referencia de voltaje <40 ppm/ °C.
- Seis entradas analógicas que admiten entradas de medición de corriente y voltaje trifásico.
- Configuración delta o estrella.
- ADC Delta-Sigma de 22 bits con motor de cómputo (CE) independiente de 32 bits.
- MPU de 8 bits (80515), un ciclo de reloj por instrucción con 4 KB MPU XRAM.
- 128 KB Flash con seguridad.
- Base de tiempo de 32 kHz con temporizador de vigilancia de hardware

- Opciones de interfaz de host UART, I2C y High-Speed Slave SPI.
- 17 pines I/O tolerante a 5V de uso general.

Teniendo en cuenta las características encontradas en las tres tarjetas, se decidió escoger el dispositivo ADE 7978 ya que cumple con la norma IEEE 1459 y tiene una medición precisa, ademas de esto la resolución del dispositivo es mucho mejor que el de los otros (24 bits).

5.3. Desarrollo del Hardware

5.3.1. Configuración inicial

La conexión que se realizó, fue una configuración de 3 fases, 4 hilos, distribución estrella. El diagrama de conexión se ve en la figura 5-5

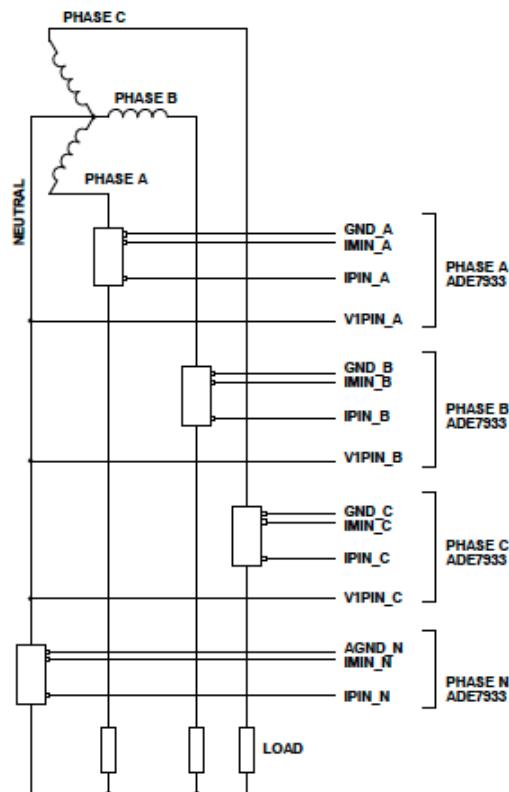


Figura 5-5.: Esquema de conexión para una distribución en Y, 3 fases, 4 hilos.

[28]

Materiales

- 4 resistencias Shunt.
- 1m de cable 7 hilos 22 AWG azul - V1PIN.
- 1m de cable 7 hilos 22 AWG café - GND.
- 1m de cable 7 hilos 22 AWG amarillo - IMIN.
- 1m de cable 7 hilos 22 AWG rojo - IPIN.
- 2m de cable duplex 2x10 AWG blanco
- 10 TYP UK2.50.
- Carril de aluminio.
- lámina de acetato.
- 20 terminales.
- 4 postes Met 10mm.

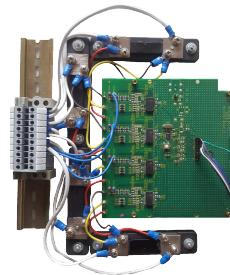


Figura 5-6.: ADE 7978 configurado con las resistencias Shunt (Imagen del proyecto)

Para configurar la tarjeta fue necesario encontrar una resistencia Shunt que se ajustará a las especificaciones del circuito a implementar, sin embargo este trabajo fue mas complicado, ya que las resistencias Shunt disponibles en el mercado son costosas y la mayoría de ellas vienen con resistencias bajas, elevando el voltaje de salida y ampliando el rango de medición del medidor ($\frac{I}{R} = V$), se decidió comprar 4 resistencias Shunt caseras las cuales tenían un costo de tan solo \$4.000 COP muy bajo comparado con las importadas o fabricadas industrialmente, en las que su valor esta entre \$50.000 COP - \$ 200.000 COP.

Teniendo todos los materiales, se realiza la conexión de la figura 5-5, utilizando el cable azul para el pin V1PIN, el cable café para el pin GND, el cable amarillo para el pin IMIN, el cable

rojo para el pin IPIN y el cable blanco para conectar las shunt con el bloque de terminales, todo el montaje puesto sobre una lamine de acetato elevando la tarjeta con los 4 postes Met como se muestra en la figura **5-6**

5.3.2. Caracterización de la resistencia Shunt

Ya que las resistencias que se compraron son caseras o no tienen una procedencia muy confiable, se realizó la caracterización con los siguientes materiales

Materiales

- Funente AC fija.
- Resistencia lineal variable.
- Shunt.
- Osciloscopio.
- Sonda atenuada de tension.
- Sonda de corriente.

Con estos materiales se crea un circuito para variar la corriente que pasa por la resistencia Shunt, cambiando la resistencia lineal variable, de esta manera se mide la corriente y el voltaje que cae sobre la resistencia figura: **5-7**.

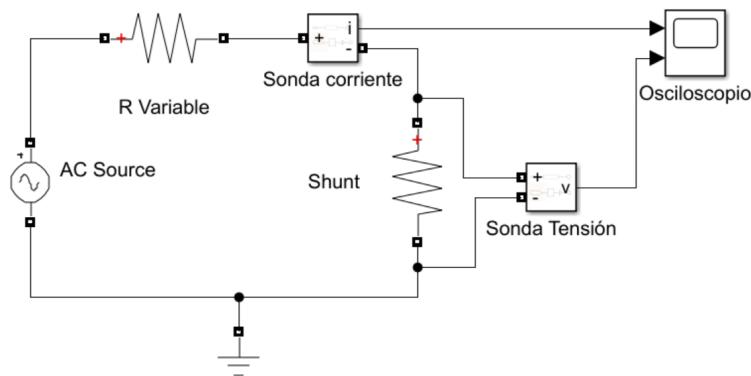


Figura 5-7.: Esquema caracterización de las resistencias Shunt (Esquema realizado en MATLAB)

Shunt A

Corriente (A)	0.552	0.558	0.565	0.566	0.575	0.583	0.586	0.597
Voltaje (V)	0.00105	0.00105	0.00107	0.00107	0.00107	0.00108	0.00109	0.00109
Corriente (A)	0.609	0.621	0.639	0.651	0.68	0.7	0.73	0.757
Voltaje (V)	0.00111	0.00113	0.00115	0.00117	0.0012	0.00122	0.00125	0.0013
Corriente (A)	0.784	0.813	0.85	0.888	0.935	1.02	1.06	1.12
Voltaje (V)	0.00134	0.00136	0.00143	0.00148	0.00153	0.00162	0.0017	0.00179
Corriente (A)	1.21	1.28	1.38	1.45	1.59	1.63	1.75	1.8
Voltaje (V)	0.0019	0.002	0.0022	0.00226	0.00246	0.00254	0.0027	0.00277
Corriente (A)	1.75	1.67	1.5	1.42	1.35	1.24	1.18	1.1
Voltaje (V)	0.00269	0.00257	0.00233	0.00222	0.00211	0.00196	0.00187	0.00176
Corriente (A)	1.06	1.01	0.97	0.92	0.879	0.84	0.816	0.777
Voltaje (V)	0.00169	0.00163	0.00158	0.00151	0.00145	0.0014	0.00137	0.00131
Corriente (A)	0.753	0.734	0.71	0.693	0.67	0.652	0.629	0.616
Voltaje (V)	0.00127	0.00125	0.00122	0.00119	0.00116	0.00115	0.00112	0.00111
Corriente (A)	0.605	0.591	0.575	0.562	0.555			
Voltaje (V)	0.0011	0.00108	0.00107	0.00105	0.00104			

Tabla 5-1.: Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt A

```

x = [0.552 0.558 0.565 0.566 0.575 0.583 0.586 0.597 0.609 0.621 0.639 0.651
y = [0.00105 0.00105 0.00107 0.00107 0.00107 0.00108 0.00109 0.00109 0.00109 0.00111
plot( x, y, 'ob', 'markersize', 4, 'markerfacecolor', 'b' ),
grid,xlabel( 'Corriente ( A )' ), ylabel( 'Voltaje ( V )' ),
title( 'Caracterización de la resistencia Shunt A' )

```

Con ayuda de matlab se optine la ecuacion de la recta que mas se ajusta a los datos donde V_{out} = Voltaje de salida de la Shunt, I = Corriente de entrada a la Shunt

$$V_{out} = 0,0013805 * I + 0,00025643 \quad (5-1)$$

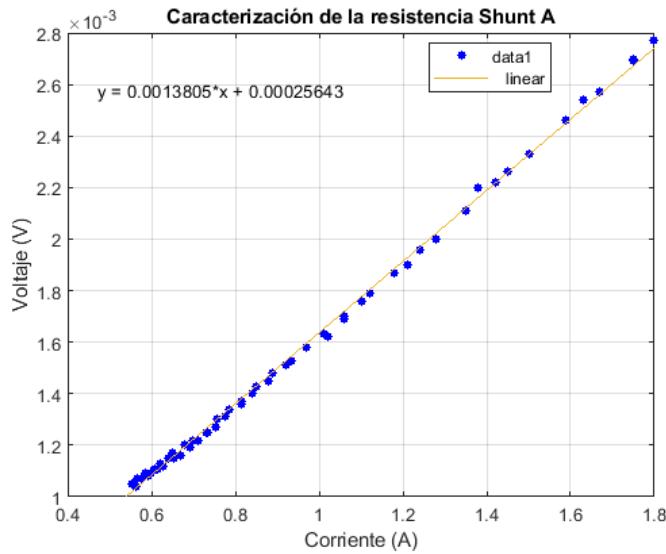


Figura 5-8.: Caracterización ShuntA (Gráfica obtenida en MATLAB)

Shunt B

Corriente (A)	0.549	0.574	0.606	0.633	0.67	0.698	0.744	0.77
Voltaje (V)	0.00107	0.00111	0.00112	0.00115	0.00119	0.00125	0.0013	0.00133
Corriente (A)	0.823	0.867	0.922	0.99	1.05	1.15	1.23	1.36
Voltaje (V)	0.0014	0.00145	0.00152	0.0016	0.0017	0.00186	0.00196	0.00213
Corriente (A)	1.48	1.69	1.8	1.7	1.48	1.35	1.22	1.15
Voltaje (V)	0.0023	0.0026	0.00278	0.00262	0.0023	0.00214	0.00194	0.00182
Corriente (A)	1.05	0.977	0.913	0.85	0.811	0.76	0.728	0.685
Voltaje (V)	0.0017	0.00162	0.00151	0.00143	0.00139	0.00132	0.00127	0.0012
Corriente (A)	0.662	0.635	0.611	0.599	0.58	0.557		
Voltaje (V)	0.00119	0.00116	0.00113	0.0011	0.00109	0.00108		

Tabla 5-2.: Autor - Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt B

```

x = [ 0.549 0.574 0.606 0.633 0.67 0.698 0.744 0.77 0.823 0.867 0.922 0.99 1.05 1.15 1.48 1.69 1.8 1.7 1.05 0.977 0.913 0.85 0.811 0.76 0.728 0.685
y = [ 0.00107 0.00111 0.00112 0.00115 0.00119 0.00125 0.0013 0.00133 0.0014 0.00145 0.0017 0.00162 0.00151 0.00143 0.00139 0.00132 0.00127 0.0012
plot(x,y,'ob','markersize',4,'markerfacecolor','b'),
grid,xlabel('Corriente (A)'),ylabel('Voltaje (V)'),
```

```
title('Caracterización de la resistencia Shunt B')
```

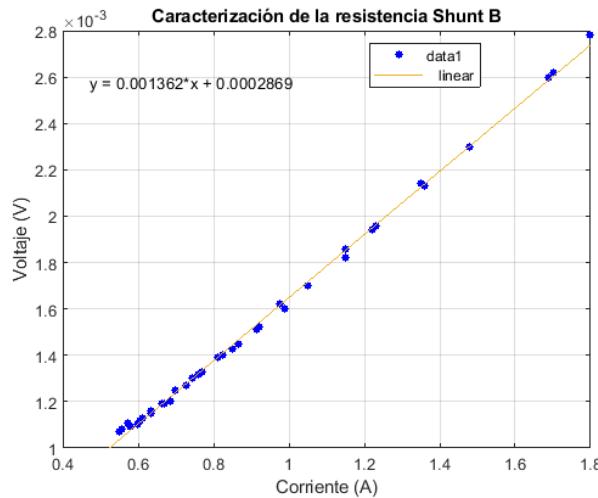


Figura 5-9.: Caracterización ShuntB (Gráfica obtenida en MATLAB)

Con ayuda de matlab se optine la ecuacion de la recta que mas se ajusta a los datos donde V_{out} = Voltaje de salida de la Shunt, I = Corriente de entrada a la Shunt

$$V_{out} = 0,001362 * I + 0,0002869 \quad (5-2)$$

Shunt C

Corriente (A)	0.557	0.573	0.593	0.631	0.654	0.69	0.717	0.752
Voltaje (V)	0.00106	0.00108	0.0011	0.00115	0.00117	0.00122	0.00126	0.00131
Corriente (A)	0.8	0.838	0.896	0.95	1.03	1.09	1.19	1.29
Voltaje (V)	0.00137	0.00141	0.00149	0.00155	0.00166	0.00175	0.00189	0.00205
Corriente (A)	1.47	1.59	1.8	1.63	1.52	1.37	1.27	1.15
Voltaje (V)	0.0023	0.00246	0.00276	0.00251	0.00237	0.00215	0.00199	0.00183
Corriente (A)	1.07	0.98	0.925	0.86	0.816	0.766	0.737	0.697
Voltaje (V)	0.00172	0.0016	0.00153	0.00144	0.00138	0.00131	0.0013	0.00121
Corriente (A)	0.661	0.633	0.616	0.599	0.558			
Voltaje (V)	0.00119	0.00115	0.00113	0.00111	0.00107			

Tabla 5-3.: Corriente vs Voltaje en la resistencia shunt C

```

x = [ 0.557 0.573 0.593 0.631 0.654 0.69 0.717 0.752 0.8 0.838 0.896 0.95 1.03 1.09 1.
y = [ 0.00106 0.00108 0.0011 0.00115 0.00117 0.00122 0.00126 0.00131 0.00137 0.00141 0.
plot(x,y,'ob','markersize',4,'markerfacecolor','b'),
grid,xlabel('Corriente (A)'),ylabel('Voltaje (V)'),
title('Caracterización de la resistencia Shunt C')

```

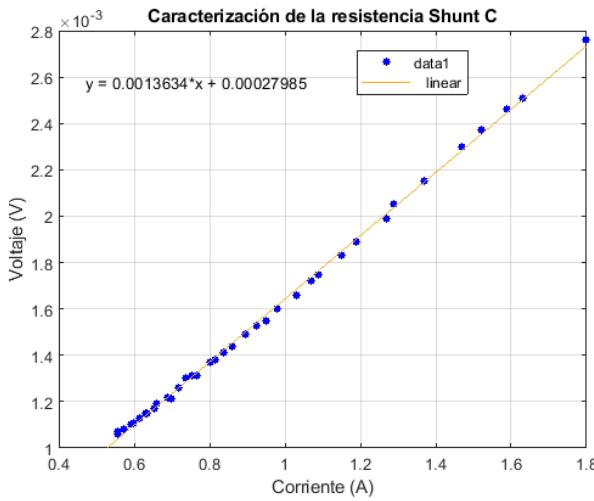


Figura 5-10.: Caracterización ShuntC (Gráfica obtenida en MATLAB)

Con ayuda de matlab se optine la ecuacion de la recta que mas se ajusta a los datos donde V_{out} = Voltaje de salida de la Shunt, I = Corriente de entrada a la Shunt

$$V_{out} = 0,0013634 * I + 0,00027985 \quad (5-3)$$

5.3.3. Conversión de voltaje

Para obtener el voltaje de entrada del ADE7978, se realizaron los siguientes pasos:

La carga se conecta a la fase siguiendo el diagrama de conexión **5-5**. Los pines V1PIN y GND_A, pasan por un divisor de voltaje donde su salida es el pin V1P y VM como se ve en la figura **5-11**. El divisor se modela bajo la siguiente ecuación:

$$V1P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (5-4)$$

Donde $R1 = 990150\Omega$, $R2 = 1K\Omega$.

$$V1P = 0,00100893 * V_{in} \quad (5-5)$$

El divisor de voltaje es necesario ya que el conversor ADE7933 solo debe recibir valores en un rango de $\pm 0,5V$.

El voltaje VA es la diferencia de voltaje que hay entre V1P y VM, esta es la señal que el conversor transforma a digital. La salida digital que entrega el conversor tiene un rango de $\pm 5,320,000$ como se ve en la figura 5-12. Esta señal entra al ADE7978 y de ahí en adelante, todos los procesos que se ejecutan, son basados en la conversión anteriormente descrita.

La relación de entrada y salida del conversor ADE7933, consiste en un voltaje pico de entrada de $0,5V$, genera una señal de salida de $5,320,000$.

La siguiente ecuación relaciona la señal de salida del conversor con la señal de entrada al medidor:

$$0,5V \rightarrow 5,320,000.$$

$$V1P \rightarrow DRV$$

Donde $DRV =$ Dato del rango de voltaje del conversor

$$V1P = \frac{DRV * 0,5}{5,320,000} \quad (5-6)$$

$$V1P = DRV * 9,39845 * 10^{-8} \quad (5-7)$$

Reemplazando la ecuación del divisor de voltaje 5-5 en 5-7

$$0,00100893 * V_{in} = DRV * 9,39845 * 10^{-8}$$

$$V_{in} = DRV * 0,00009315311 \quad (5-8)$$

La ecuación 5-8 modela la relación del voltaje de entrada al circuito al rango de voltaje del conversor.

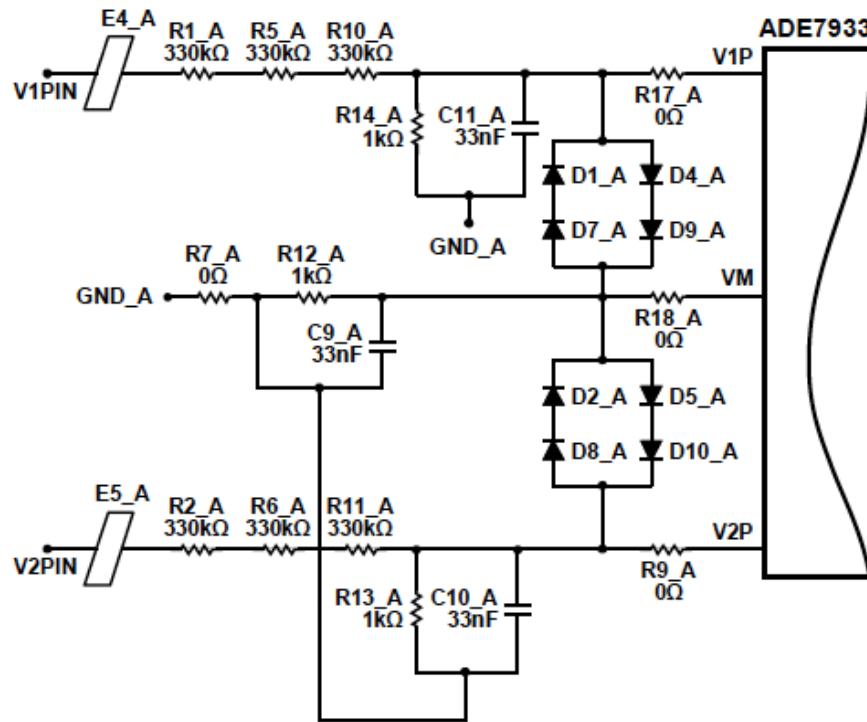


Figura 5-11.: Divisor de voltaje ADC
[28]

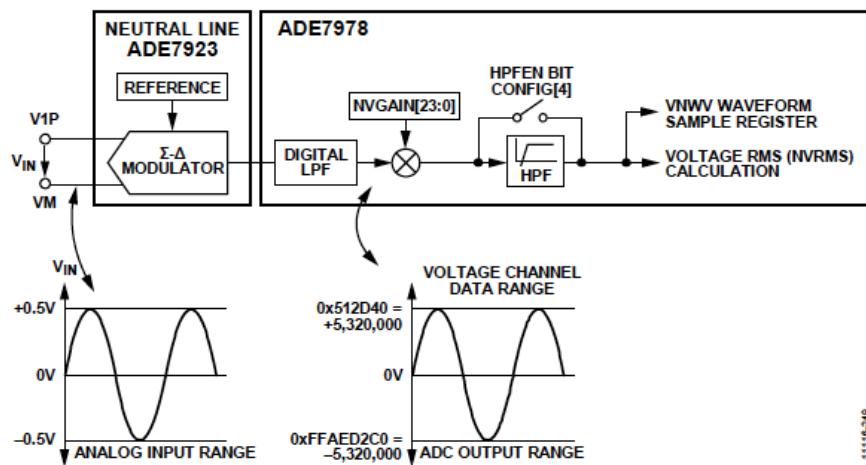


Figura 5-12.: Salida de voltaje del ADE 7978
[29]

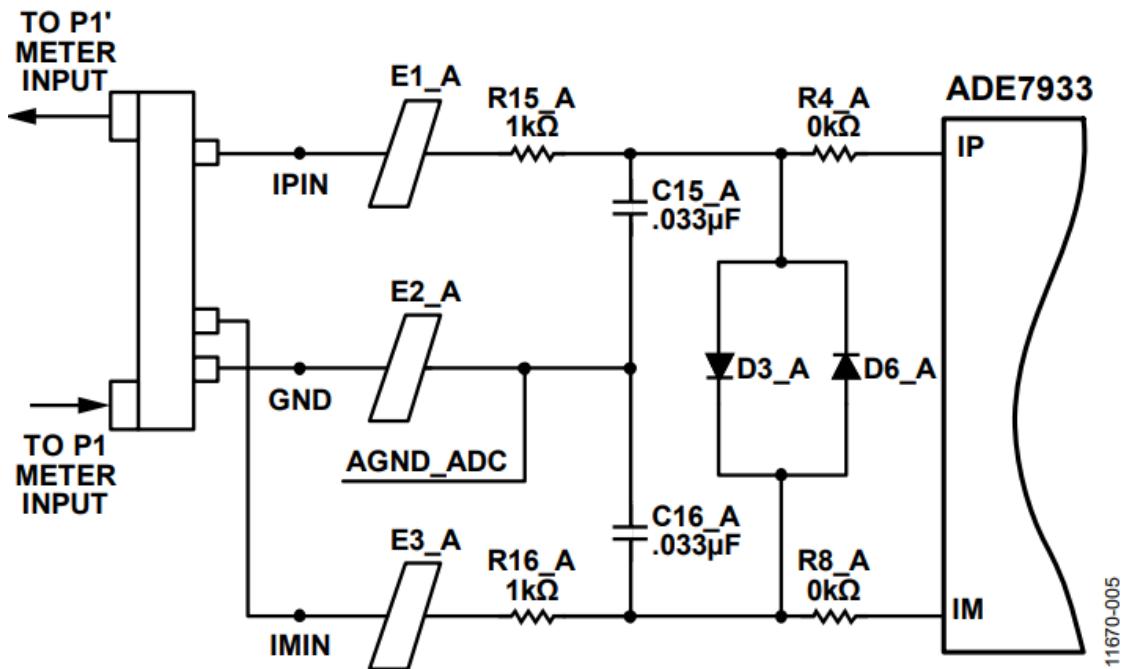


Figura 5-13.: Circuito de protección para los pines IP e IM

[28]

5.3.4. Conversión de corriente

Para encontrar la relación que hay entre la entrada de corriente y el convertidor ADC fue necesario utilizar la ecuación de la recta arrojada por las muestras de la caracterización de las shunt y también fue necesario hallar la relación de voltaje entre el pin IP e IM que son los usados por el ADC para convertir la señal figura 5-13

Como ya se tiene la relación entre la corriente de entrada y el voltaje de salida en la Shunt se procede hallar el voltaje entre el pin IP e IM resolviendo el circuito por medio del teorema de nodos como se muestra en la figura 5-14, los diodos de protección se eliminan ya que la tarjeta viene sin ellos de fabrica.

Para simplificar el circuito electrónico se remplaza el filtro de ferrita con la resistencia de 1k por R1, como el valor de los condensadores es el mismo, ambos condensadores se simbolizan con la letra C 5-14.

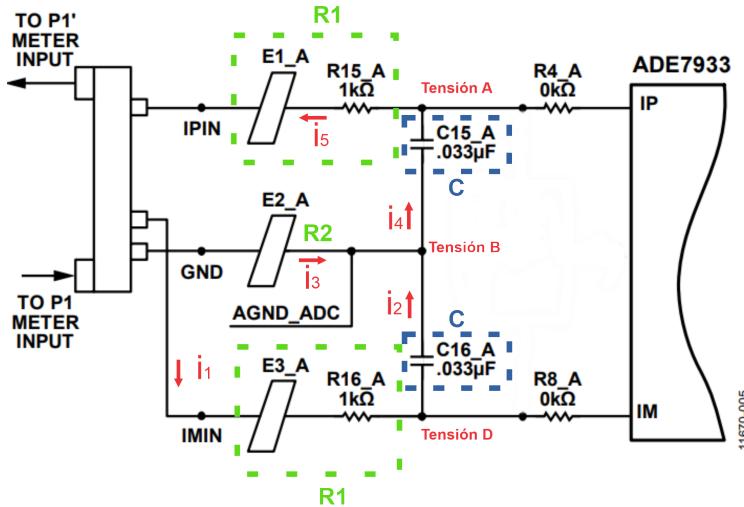


Figura 5-14.: Nodos aplicados al circuito
[28]

Se asume que el circuito se alimenta con una fuente de voltaje AC con terminal + en GND e IMIN y terminal - en IPIN resolviendo de la siguiente manera :

■ **Tensión D**

$$i_1 = i_2$$

$$\frac{V_i}{R_1} - \frac{D}{R_1} = \frac{D}{ZC} - \frac{B}{ZC}$$

$$\frac{B}{ZC} = \frac{D}{ZC} - \frac{V_i}{R_1} + \frac{D}{R_1}$$

$$\frac{B}{ZC} = D\left(\frac{1}{ZC} + \frac{1}{R_1}\right) - \frac{V_i}{R_1}$$

$$\frac{B}{ZC} = D\frac{R_1 + ZC}{R_1 ZC} - \frac{V_i}{R_1}$$

$$B = D\frac{R_1 + ZC}{R_1} - V_i \frac{ZC}{R_1} \quad (5-9)$$

■ Tensión B

$$\mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 = \mathbf{i}_4$$

$$\frac{D}{ZC} - \frac{B}{ZC} + \frac{V_i}{R_2} - \frac{B}{R_2} = \frac{B}{ZC} - \frac{A}{ZC}$$

$$\frac{D}{ZC} + \frac{V_i}{R_2} + \frac{A}{ZC} = B \frac{2}{ZC} + \frac{B}{R_2}$$

$$\frac{D}{ZC} + \frac{V_i}{R_2} + \frac{A}{ZC} = B \left(\frac{2}{ZC} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{D}{ZC} + \frac{V_i}{R_2} + \frac{A}{ZC} = B \frac{2R_2 + ZC}{R_2 ZC}$$

$$D \frac{R_2}{2R_2 + ZC} + V_i \frac{ZC}{2R_2 + ZC} + A \frac{R_2}{2R_2 + ZC} = B \quad (5-10)$$

■ Tensión A

$$\mathbf{i}_4 = \mathbf{i}_5$$

$$\frac{B}{ZC} - \frac{A}{ZC} = \frac{A}{R_1}$$

$$\frac{B}{ZC} = \frac{A}{R_1} + \frac{A}{ZC}$$

$$\frac{B}{ZC} = A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{ZC} \right)$$

$$\frac{B}{ZC} = A \frac{R_1 + ZC}{R_1 ZC}$$

$$B = A \frac{R_1 + ZC}{R_1} \quad (5-11)$$

Remplazando la ecuación de Tensión D 5-9 en la ecuación de tensión B 5-10

$$D \frac{R_1 + ZC}{R_1} - V_i \frac{ZC}{R_1} = D \frac{R_2}{2R_2 + ZC} + V_i \frac{ZC}{2R_2 + ZC} + A \frac{R_2}{2R_2 + ZC}$$

$$A \frac{R_2}{2R_2 + ZC} = D \frac{R_1 + ZC}{R_1} - V_i \frac{ZC}{R_1} - D \frac{R_2}{2R_2 + ZC} - V_i \frac{ZC}{2R_2 + ZC}$$

$$A \frac{R_2}{2R_2 + ZC} = D \left(\frac{R_1 + ZC}{R_1} - \frac{R_2}{2R_2 + ZC} \right) - V_i \left(\frac{ZC}{R_1} + \frac{ZC}{2R_2 + ZC} \right)$$

$$A \frac{R_2}{2R_2 + ZC} = D \frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - R_1 R_2}{R_1(2R_2 + ZC)} - V_i \frac{ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC}{R_1(2R_2 + ZC)}$$

$$A = D \frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - R_1 R_2}{R_1 R_2} - V_i \frac{ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC}{R_1 R_2} \quad (5-12)$$

Remplazando la ecuación de tensión D 5-9 en la ecuación de tensión A 5-11

$$D \frac{R_1 + ZC}{R_1} - V_i \frac{ZC}{R_1} = A \frac{R_1 + ZC}{R_1}$$

$$A = D - V_i \frac{ZC}{R_1 + ZC} \quad (5-13)$$

Remplazando la ecuación 5-12 en la ecuación 5-13 para dejar D en términos de V_i

$$D \frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - R_1 R_2}{R_1 R_2} - V_i \frac{ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC}{R_1 R_2} = D - V_i \frac{ZC}{R_1 + ZC}$$

$$D \frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - R_1 R_2}{R_1 R_2} - D = V_i \frac{ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC}{R_1 R_2} - V_i \frac{ZC}{R_1 + ZC}$$

$$D \left(\frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - R_1 R_2}{R_1 R_2} - 1 \right) = V_i \left(\frac{ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC}{R_1 R_2} - \frac{ZC}{R_1 + ZC} \right)$$

$$D \left(\frac{(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2}{R_1 R_2} \right) = V_i \frac{[ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC][R_1 + ZC] - R_1 R_2 ZC}{R_1 R_2 (R_1 + ZC)}$$

$$D = V_i \frac{[ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC][R_1 + ZC] - R_1 R_2 ZC}{[(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2][R_1 + ZC]} \quad (5-14)$$

Remplazando 5-14 en la ecuación 5-13 para obtener A en términos de V_i

$$A = V_i \frac{[ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC][R_1 + ZC] - R_1 R_2 ZC}{[(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2][R_1 + ZC]} - V_i \frac{ZC}{R_1 + ZC}$$

$$A = V_i \left(\frac{[ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC][R_1 + ZC] - R_1 R_2 ZC}{[(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2][R_1 + ZC]} - \frac{ZC}{R_1 + ZC} \right)$$

$$A = V_i *$$

$$\frac{([ZC(2R_2 + ZC) + R_1 ZC][R_1 + ZC] - R_1 R_2 ZC)(R_1 + ZC) - ZC[(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2][R_1 + ZC]}{[(R_1 + ZC)(2R_2 + ZC) - 2R_1 R_2][R_1 + ZC][R_1 + ZC]} \quad (5-15)$$

Con ayuda del software Matlab se remplazan los valores y se resuelve la ecuación D y A

```
R1 = 1150;
R2 = 150;
```

```

f = 60;
W = 2*pi*f;
C = 33*10^(-9);
ZC = -j/(W*C);

NumD = ( ZC*(2*R2+ZC) + R1*ZC )*(R1+ZC)-R1*R2*ZC
DenD = ((R1+ZC)*(2*R2+ZC)-2*R1*R2)*(R1+ZC)
D= NumD/DenD

NumA = ((ZC*(2*R2+ZC)+R1*ZC)*(R1+ZC)-R1*R2*ZC)*(R1+ZC)-ZC *
((R1+ZC)*(2*R2+ZC)-2*R1*R2)*(R1+ZC)
DenA = ((R1+ZC)*(2*R2+ZC)-2*R1*R2)*(R1+ZC)*(R1+ZC)
A= NumA/DenA

```

$$D = V_i(1,0000 - 0,0000j) \quad (5-16)$$

$$A = V_i(0,0002 + 0,0143j) \quad (5-17)$$

El voltaje que le entra a la tarjeta es la diferencia entre la tensión D y la tensión A

$$V_{IM-IP} = D-A$$

$$V_{IM-IP} = V_i(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-18)$$

Usando la relación entre corriente y voltaje de las Shunt ecuaciones (5-1,5-2, 5-3) se remplaza para despejar la ecuación en términos de corriente y voltaje entre IM-IP

- **Shunt A**

$$V_{IM-IP} = (0,0013805 * I + 0,00025643)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-19)$$

- **Shunt B**

$$V_{IM-IP} = (0,001362 * I + 0,0002869)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-20)$$

- **Shunt C**

$$V_{IM-IP} = (0,0013634 * I + 0,00027985)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-21)$$

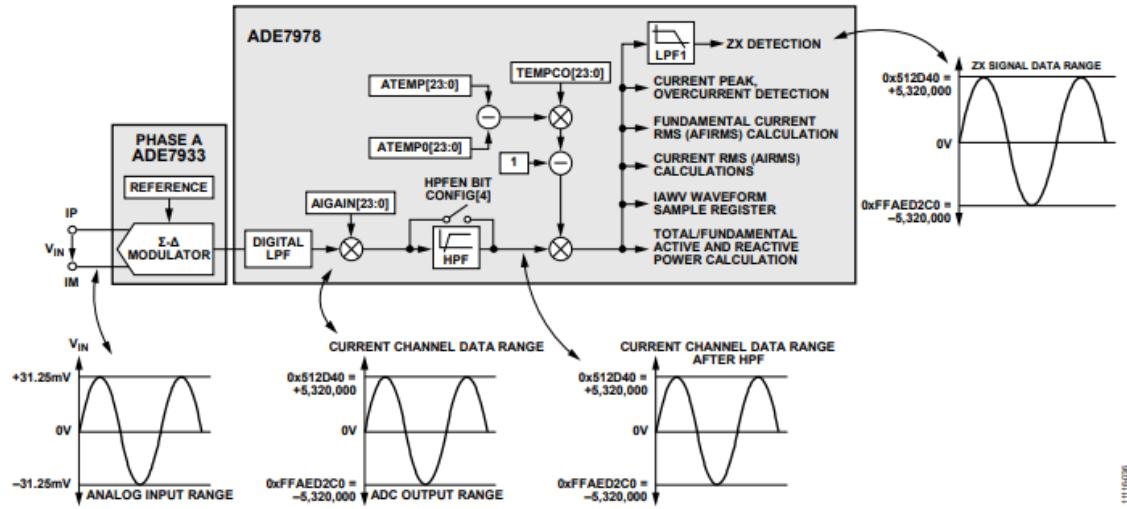


Figura 5-15.: Relacion ADC corriente [29]

Teniendo en cuenta la conversion de salida del ADC figura 5-15 se halla la relacion entre corriente y salida del conversor con la ecuacion

$$31,25mV \rightarrow 5,320,000.$$

$$V_{IM-IP} \rightarrow DRI$$

Donde $DRI =$ Dato del rango de corriente del conversor

$$V_{IM-IP} = \frac{DRI * 0,03125}{5,320,000} \quad (5-22)$$

■ Shunt A

$$\frac{DRI * 0,03125}{5,320,000} = (0,0013805 * I + 0,00025643)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-23)$$

■ Shunt B

$$\frac{DRI * 0,03125}{5,320,000} = (0,001362 * I + 0,0002869)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-24)$$

■ Shunt C

$$\frac{DRI * 0,03125}{5,320,000} = (0,0013634 * I + 0,00027985)(0,9998 - 0,0143j) \quad (5-25)$$

Con ayuda de Matlab se resuelve la ecuación dejándola en términos de $I = f(ADCI)$.

■ Shunt A

```
eqn=(0.0013805*I + 0.00025643 )*VIPIM == ADCI*0.03125/5320000
solveI=solve(eqn,I)
```

$$I = ADCI * (4,2550e^{-6} + 6,0876e^{-8}j) - 1,8575e^{-1}$$

Esta expresión es la que se iba a usar para convertir la salida del ADCI en términos de corriente, pero como la Raspberry Pi no acepta números imaginarios, es necesario tener una constante de multiplicación para la conversión.

Para resolver esto, se decidió despreciar la parte imaginaria ya que tiene un valor muy pequeño comparado con la parte real

$$I = 4,2550e^{-6} * ADCI - 1,8575e^{-1} \quad (5-26)$$

■ Shunt B

```
eqn=(0.001362*I+0.0002869 )*VIPIM == ADCI*0.03125/5320000
solveI=solve(eqn,I)
```

$$I = ADCI(4,3128e^{-6} + 6,1703e^{-8}i) - 2,1065e^{-1}$$

En la Shunt B también se cumple la misma condición de la Shunt A.

$$I = 4,3128e^{-6} * ADCI - 2,1065e^{-1} \quad (5-27)$$

■ Shunt C

```
eqn=(0.0013634*I + 0.00027985 )*VIPIM == ADCI*0.03125/5320000
solveI=solve(eqn,I)
```

$$I = ADCI * (4,3084e^{-6} + 6,1639e^{-8}i) - 2,0526e^{-1}$$

En la Shunt C también se cumple la misma condición de la Shunt A.

$$I = 4,3084e^{-6} * ADCI - 2,0526e^{-1} \quad (5-28)$$

5.4. Desarrollo de Software

5.4.1. Implementación del protocolo I2C entre la raspberry y el ADE7978

El protocolo I2C es un estandar internacional para la comunicacion entre dispositivos. Siguiendo la teoria de comunicacion I2C se conectó GPIO de la raspberry con el puerto de comunicacion del ADE7978 como se muestra en la figura 5-16

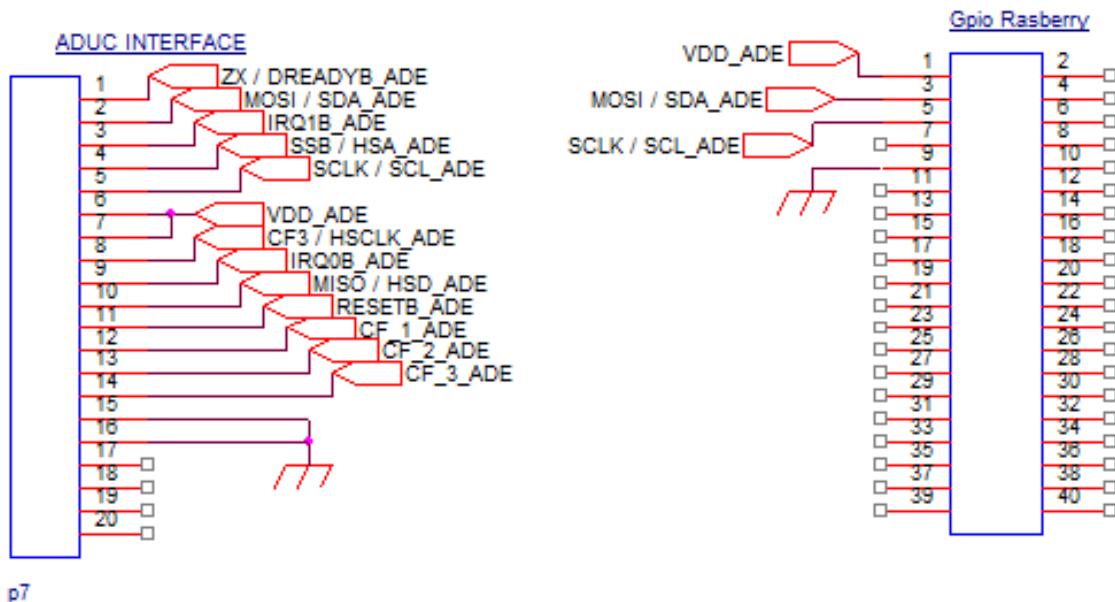


Figura 5-16.: Conexión I2C (Esquema realizado en Orcad pspice)

El puerto de comunicacion del ADE7978 funciona 100 % como un esclavo a un clock maximo de 400kHz; en la operación de escritura se envia un bit en 0 para indicar que la operación va a iniciar, seguido de la dirección del dispositivo que es de 8 bits, seguido de la dirección del registro que se quiere escribir y por ultimo la información que se quiere escribir en el registro fig: 5-17; para la operación de lectura se debe envia un 0 para indicar que la operación va a iniciar, seguido de la dirección del dispositivo y la dirección del registro que se quiere leer, seguido de otro bit en 0 y la dirección del dispositivo nuevamente, en ese momento se empieza a recibir la información que esta alojada en ese registro fig: 5-18.

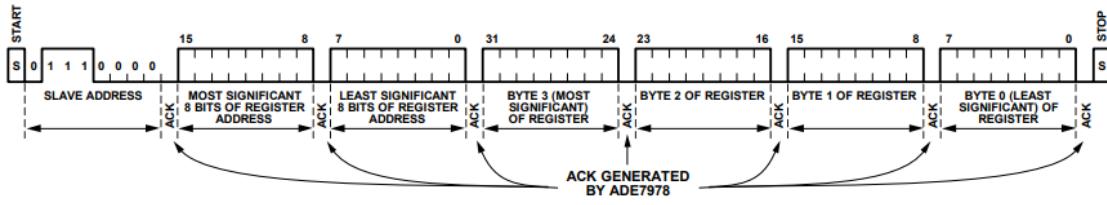


Figura 5-17.: Protocolo de escritura I2C

[29]

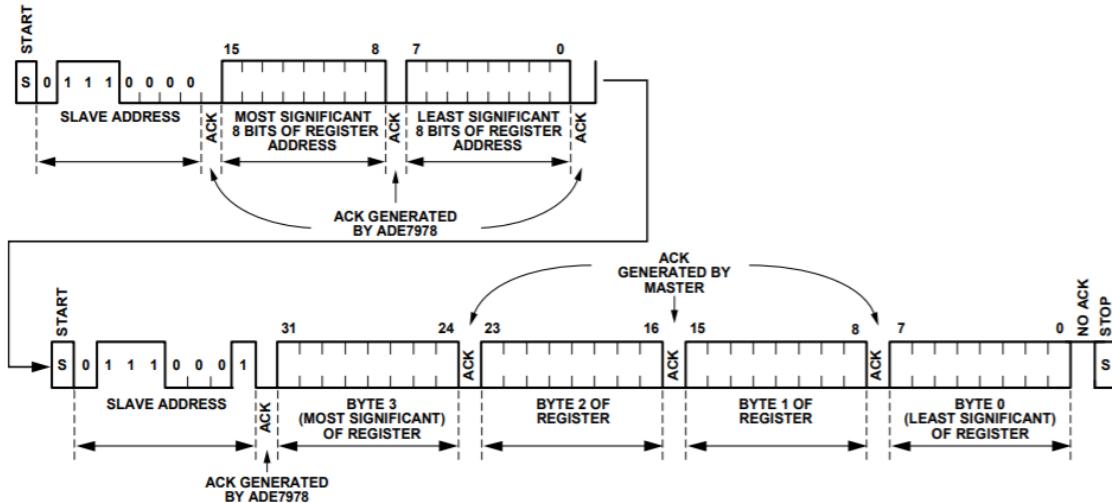


Figura 5-18.: Protocolo de lectura I2C

[29]

Con la teoría obtenida del datasheet, se realizó la programación de esta comunicación por medio del lenguaje c++, usando la librería BCM2835 [30], a esta librería fue necesario realizarle un cambio en la función de lectura del puerto I2C, ya que esta librería está desarrollada para enviar direcciones de registro de solo 8 bits y en el caso del ADE 7978 cada dirección de registro es de 16 bits, esta modificación se realizó en el método **bcm2835_i2c read register rs** agregandole un segundo carácter al la operación de envio de la siguiente manera :

```

/* Clear FIFO */
bcm2835_peri_set_bits(control, BCM2835_BSC_C_CLEAR_1 , BCM2835_BSC_C_CLEAR_1 );
/* Clear Status */
bcm2835_peri_write(status, BCM2835_BSC_S_CLKT | BCM2835_BSC_S_ERR | BCM2835_BSC_S_DONE);
/* Set Data Length */

```

```

bcm2835_peri_write(dlen, 1);
/* Enable device and start transfer */
bcm2835_peri_write(control, BCM2835_BSC_C_I2CEN);
bcm2835_peri_write(fifo, regaddr[1]);
bcm2835_peri_write(fifo, regaddr[0]);
bcm2835_peri_write(control, BCM2835_BSC_C_I2CEN | BCM2835_BSC_C_ST);

```

Teniendo el código editado, se instaló la librería como lo recomienda el fabricante, una vez instalada la librería se desarrolló la primera parte de la comunicación en c++ tomando como ejemplo la comunicación que realiza el mismo fabricante

- Importar la librería bcm2835.h
- Iniciar el puerto de pines de la raspberry
- Iniciar el puerto de comunicación I2C
- Cargar la dirección del dispositivo esclavo
- Cargar la frecuencia del clock
- Llamar el método de lectura pasandole la dirección del registro, bus de datos y la longitud del mismo
- Terminar la comunicación del puerto I2C y del puerto de la raspberry

Con estos pasos ya se obtiene el dato en el bus, el código de los pasos es el siguiente:

```

//iniciar puerto raspberry
//bcm2835_init();
init = I2C_BEGIN;
if (!bcm2835_init())
{
    printf("Falló bcm2835_init, corra el programa con permisos de administrador");
}
// I2C begin if specified
if (init == I2C_BEGIN)
{
    if (!bcm2835_i2c_begin())
    {
        printf("Falló bcm2835_begin, corra el programa con permisos de administrador");
    }
}

```

```
//Cargar dirección del esclavo
bcm2835_i2c_setSlaveAddress(slave_address);
//Cargar la frecuencia del clock
bcm2835_i2c_setClockDivider(clk_div);

//Cargar variable buf con el Value
bcm2835_i2c_read_register_rs(dir, buf, Len_dato);
//termina la comunicación para no sobresaturar el puerto
bcm2835_i2c_end();
bcm2835_close();
```

5.4.2. Backend Solución en c++

Con la prueba exitosa se comenzó a desarrollar toda la logica del programa para tomar todos los registros de la DSP

- Se creó una clase que contenga todas las propiedades y métodos que describan el funcionamiento de los registros
- Crear un objeto de la clase creada por cada registro de la DSP
- Crear funciones dentro del programa que permitan la manipulacion y el analisis de dichos registros
- Mantener el programa principal en un bucle infinito para que siempre se ejecute.

Se creó una clase con el nombre Registro conteniendo las siguientes propiedades y métodos

Propiedades

- Address: dirección en exadecimal de la posición en memoria del registro.
- Len dato: tamaño en bytes de la información contenida en el registro.
- Name: Nombre del registro dado por el datasheet.
- Value: Valor actual de la ultima lectura o escritura realizada al registro.
- ConValue: Valor convertido.

Métodos

- Constructores: se crean dos constructores al primero se le pasa el nombre la dirección y la longitud del registro, el segundo constructor se crea sin parametros para inicializar los registros y despues configurarlos.
- GetName: Metodo para obtener el nombre que tiene el registro.
- GetValue: Metodo para obtener el valor cargado o leido en el registro.
- GetConValue: Metodo para obtener el valor convertido cargado en el registro.
- Read: Metodo para activar el puerto I2C y leer el registro cargando el valor leido en Value.
- Write: Metodo para activar el puerto I2C, escribir y actualizar el contenido de un registro.
- SetValue: Metodo para cargar en el registro el valor que se quiere escribir en el ADE
- SetConValue: Metodo para cargar el valor convertido en el registro.
- Config_Obj: Metodo para pasarle la configuracion de los registros, en este método resive el nombre del registro, la dirección de memoria y el tamaño del dato.

Teniendo las propiedades métodos de la clase declarados en el programa, se realizó la logica del programa para analisar los datos obtenidos y enviarlos al front, para realizar esto se crearon varios métodos que posteriormente se llamaran en el programa principal, los métodos creados son los siguientes

- Read_all_registers : Metodo para leer todos los registros configurados.
- Config_registers : Metodo para crear todos los registros como un objeto de la clase Registro, pasandole a cada uno su nombre, direccion y longitud del dato que guarda en bytes.
- Burst_mode: Metodo para leer los registros de una sola vez al mismo tiempo.
- Run_DSP: Metodo para escribir en el registro de inicio de la DSP y ponerla en marcha.
- Stop_DSP: Metodo para escribir en el registro de inicio de la DSP y apagarla.
- Initializing_the_chipset: Metodo para configurar los registros de la DSP segun el datasheet.

- Read_registers: Método para leer los registros deseados.
- SetJsonCurrent: Método que convierte los datos de corriente leidos del ADE a formato Json
- SetJsonVoltaje: Método que convierte los datos de voltaje leidos del ADE a formato Json

Para mas información de como esta diseñado el programa, visitar el repositorio publico github [31]

5.4.3. Backend Configuración del servidor

Se realizó una investigación de servidores en la nube y se optó por usar Heroku ya que tiene una opción gratuita que permite alojar hasta 5 aplicaciones con un límite de peso de 512MB.

Configuración de la base de datos

Para realizar la configuración de la base de datos en Heroku, se hizo a través del gestor de paquetes de javascript Node Js. En las instrucciones del package.json se ejecuta el comando npm run start el cual ejecuta un archivo javascript con el siguiente código:

```
const jsonServer = require('json-server');
const server = jsonServer.create();
const router = jsonServer.router('db.json');
const middlewares = jsonServer.defaults();
const port = process.env.PORT || 3000;

server.use(middlewares);
server.use(router);

server.listen(port);
```

De esta manera, Node levanta un servidor local en el puerto 3000 y heroku lo expone públicamente a través de la URL <https://json-ade-metering.herokuapp.com/>.

Para configurar el archivo .json con la información, se creó un archivo llamado 'db.json' con una estructura básica inicial para almacenar datos. La estructura básica se muestra a continuación:

```
{
  "registers": [
```

```

    {
}
]
```

De esta manera se habilita la consulta de los registros por medio una petición GET a la URL <https://json-ade-metering.herokuapp.com/registers>. Si se desea insertar (POST), actualizar (PUT) o eliminar (DELETE) información, se apunta al mismo endpoint pero con su respectivo método.

Configuración de la aplicación en Angular 7

La configuración del proyecto en Angular es muy similar a la de la base da datos. Se hace a través del gestor de paquetes de javascript Node Js. De igual manera en el archivo package.json se ejecuta el comando npm run start y acciona el siguiente script:

```

//Install express server
const express = require('express');
const path = require('path');

const app = express();

// Serve only the static files form the dist directory
app.use(express.static('./dist/angular-pro-sidebar'));

app.get('/**', function (req, res) {

  res.sendFile(path.join(__dirname, '/dist/angular-pro-sidebar/index.html'));
});

// Start the app by listening on the default Heroku port
app.listen(process.env.PORT || 8080);
```

La aplicación en Angular se habilita en el puerto 8080 y heroku lo expone publicamente por medio de la URL <https://ieee-1459-usta.herokuapp.com/home>.

5.4.4. Backend Solución con Node.js

Se requirió realizar un programa en javascript, que cumpla la función de enviar el archivo vodb.json que genera el programa en C++, a la base de datos en Heroku. Para la comunicación se usó el paquete "xmlhttprequest", para relizar las peticiones HTTPS a la base de

datos. El código que se desarrolló, es el siguiente:

```

setInterval(init, 50)

function init() {
  try {
    var XMLHttpRequest = require("xmlhttprequest").XMLHttpRequest;
    var xhr = new XMLHttpRequest();
    const fs = require('fs')
    let rawdata = fs.readFileSync('db.json')
    let registers = JSON.parse(rawdata)
    xhr.open("PUT", 'https://json-ade-metering.herokuapp.com/registers/1', true);
    xhr.setRequestHeader('Content-Type', 'application/json');
    xhr.send(JSON.stringify(registers));
    console.log(registers);
    console.log("ESCRIBE")
  } catch {
    console.log("ERROR")
  }
}

```

El código anteriormente descrito, se ejecuta cada 50 milisegundos a través de una función de javascript llamada "setInterval(callback,timer)", esa función dispara la función init, la cual lee el archivo db.json y hace una petición PUT al servidor para actualizar los registros.

5.4.5. Frontend Solución en Angular

Para la creación de la página web, se usó el framework javascript Angular 7, ya que implementa el lenguaje de programación 'TypeScript' y permite asignar un tipo de variable a las variables de javascript y tener un mayor control del proyecto. De igual manera es necesario saber de HTML5, CSS3 y javascript para la creación de la página.

Para instalar Angular es necesario tener node instalado en el computador. Para instalar node, por medio de la URL <https://nodejs.org/es/>, se descargó y se siguió el paso a paso del instalador. Figura 5-19

Una vez instalado Node, se abrió una consola de comandos y se ejecutó el comando 'npm install -g @angular/cli' y de esta manera se instaló angular de forma global en el computador.

Para crear el proyecto en Angular se utilizó el comando 'ng new usta-tesis' y de esta forma, Angular generó todos los archivos y dependencias necesarias para generar la aplicación. Una



Figura 5-19.: Descarga de Node JS

[32]

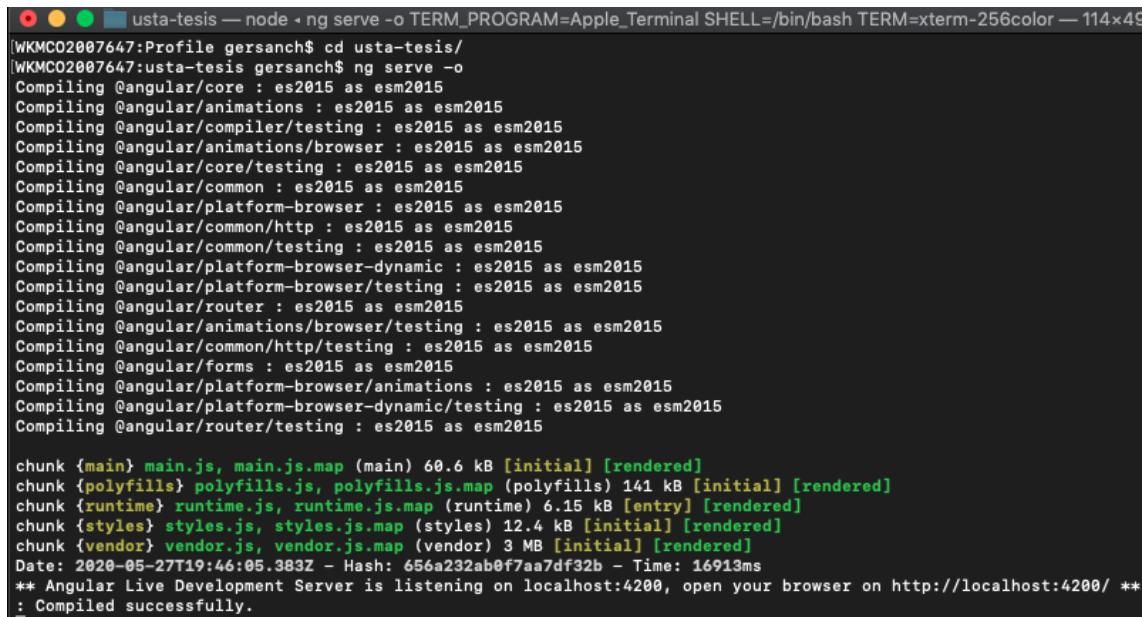
```
[WKMCO2007647:Profile gersanch$ ng new usta-tesis
[?] Would you like to add Angular routing? Yes
[?] Which stylesheet format would you like to use? CSS
```

Figura 5-20.: Autor - Creación de proyecto en Angular (Terminal del computador)

vez hecha la configuración, se derigió a la raíz de proyecto ejecutando el comando 'cd usta-tesis', después se ejecutó el comando 'ng serve -o' y este comando levanta un servidor local que por defecto es en la dirección http://localhost:4200 y la aplicación ya queda visible para empezar a trabajar en el proyecto. Figura 5-20, 5-21

En Angular, un componente hace referencia a una sección visual de la página y estos componentes se crean a través del comando 'ng generate component componentName'. Cada componente cuenta con un archivo .html , .ts y .css. Para el proyecto creamos 4 componentes con los comandos de la figura 5-22.

Con los componentes creados, se empezó a implementar el código necesario para crear la vista, los estilos y la funcionalidad.



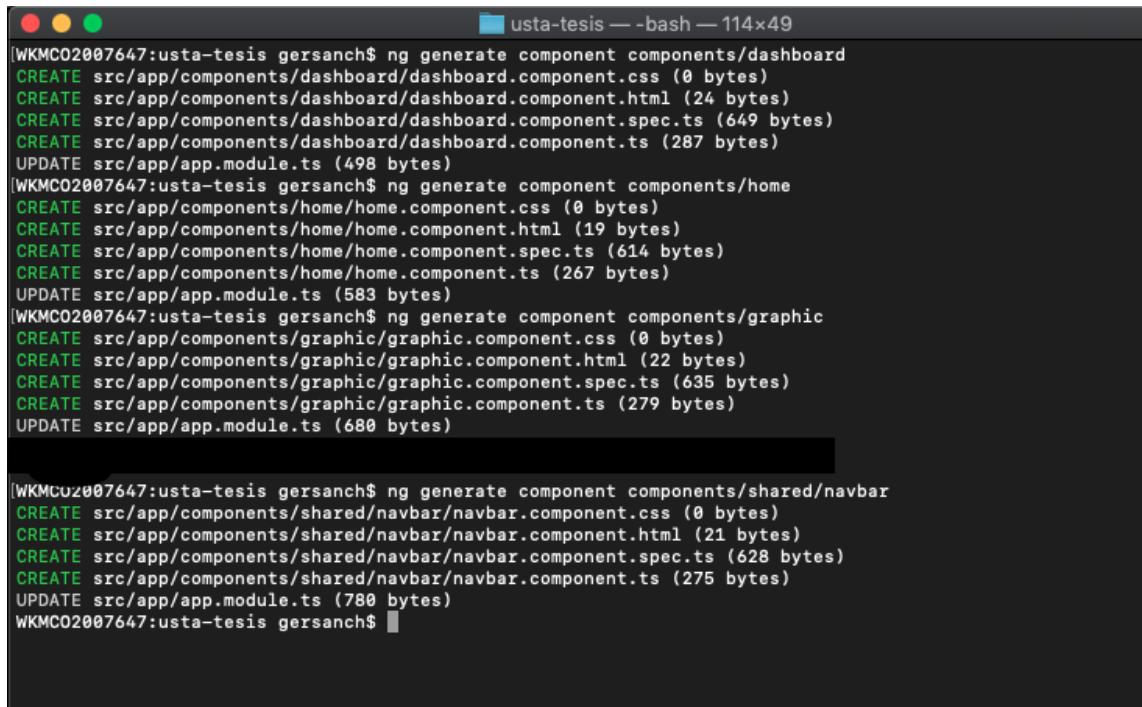
```

usta-tesis — node -o TERM_PROGRAM=Apple_Terminal SHELL=/bin/bash TERM=xterm-256color — 114x49
[WKMC02007647:Profile gersanch$ cd usta-tesis/
[WKMC02007647:usta-tesis gersanch$ ng serve -o
Compiling @angular/core : es2015 as esm2015
Compiling @angular/animations : es2015 as esm2015
Compiling @angular/compiler/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/animations/browser : es2015 as esm2015
Compiling @angular/core/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/common : es2015 as esm2015
Compiling @angular/platform-browser : es2015 as esm2015
Compiling @angular/common/http : es2015 as esm2015
Compiling @angular/common/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/platform-browser-dynamic : es2015 as esm2015
Compiling @angular/platform-browser/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/router : es2015 as esm2015
Compiling @angular/animations/browser/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/common/http/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/forms : es2015 as esm2015
Compiling @angular/platform-browser/animations : es2015 as esm2015
Compiling @angular/platform-browser-dynamic/testing : es2015 as esm2015
Compiling @angular/router/testing : es2015 as esm2015

chunk {main} main.js, main.js.map (main) 60.6 kB [initial] [rendered]
chunk {polyfills} polyfills.js, polyfills.js.map (polyfills) 141 kB [initial] [rendered]
chunk {runtime} runtime.js, runtime.js.map (runtime) 6.15 kB [entry] [rendered]
chunk {styles} styles.js, styles.js.map (styles) 12.4 kB [initial] [rendered]
chunk {vendor} vendor.js, vendor.js.map (vendor) 3 MB [initial] [rendered]
Date: 2020-05-27T19:46:05.383Z - Hash: 656a232ab0f7aa7df32b - Time: 16913ms
** Angular Live Development Server is listening on localhost:4200, open your browser on http://localhost:4200/ **
: Compiled successfully.

```

Figura 5-21.: Autor - Levantar servidor local en Angular (Terminal del computador)



```

usta-tesis — bash — 114x49
[WKMC02007647:usta-tesis gersanch$ ng generate component components/dashboard
CREATE src/app/components/dashboard/dashboard.component.css (0 bytes)
CREATE src/app/components/dashboard/dashboard.component.html (24 bytes)
CREATE src/app/components/dashboard/dashboard.component.spec.ts (649 bytes)
CREATE src/app/components/dashboard/dashboard.component.ts (287 bytes)
UPDATE src/app/app.module.ts (498 bytes)
[WKMC02007647:usta-tesis gersanch$ ng generate component components/home
CREATE src/app/components/home/home.component.css (0 bytes)
CREATE src/app/components/home/home.component.html (19 bytes)
CREATE src/app/components/home/home.component.spec.ts (614 bytes)
CREATE src/app/components/home/home.component.ts (267 bytes)
UPDATE src/app/app.module.ts (583 bytes)
[WKMC02007647:usta-tesis gersanch$ ng generate component components/graphic
CREATE src/app/components/graphic/graphic.component.css (0 bytes)
CREATE src/app/components/graphic/graphic.component.html (22 bytes)
CREATE src/app/components/graphic/graphic.component.spec.ts (635 bytes)
CREATE src/app/components/graphic/graphic.component.ts (279 bytes)
UPDATE src/app/app.module.ts (680 bytes)
[WKMC02007647:usta-tesis gersanch$ ng generate component components/shared/navbar
CREATE src/app/components/shared/navbar/navbar.component.css (0 bytes)
CREATE src/app/components/shared/navbar/navbar.component.html (21 bytes)
CREATE src/app/components/shared/navbar/navbar.component.spec.ts (628 bytes)
CREATE src/app/components/shared/navbar/navbar.component.ts (275 bytes)
UPDATE src/app/app.module.ts (780 bytes)
WKMCO2007647:usta-tesis gersanch$ 

```

Figura 5-22.: Creación de componentes en Angular (Terminal del computador)

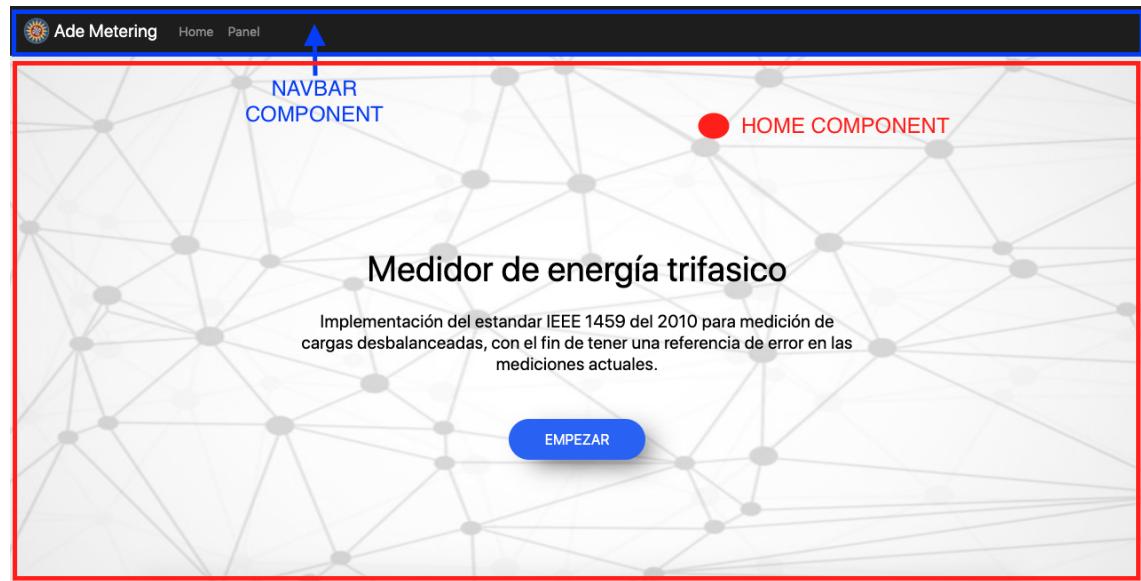


Figura 5-23.: Componentes home y navbar
[33]

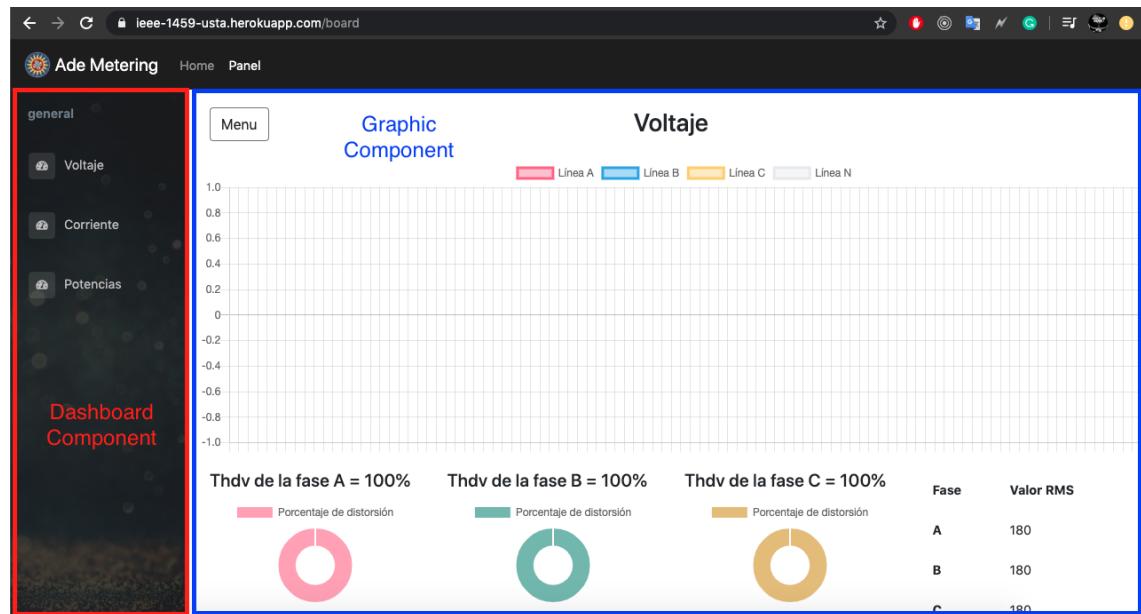


Figura 5-24.: Componentes graphic y dashboard
[33]

6. Resultados del proyecto

6.1. Primer Prueba

Se procedió a realizar la primer prueba con nuestro medidor y debido que en ese momento el mundo se encontrabá en la pandemia del COVID-19, tocó realizar pruebas con cargas domésticas las cuales fueron las siguientes:

- Bombillo de 9 W.
- Portatil dell.
- Osciloscopio.
- Raspberry.
- TV de 111 W.
- Play Station 3,
- Parlantes.
- Licuadora.
- Licuadora Nutribullet.
- Plancha de 1000 W.

**El valor de referencia es el osciloscopio o multímetro y el experimental es el valor de la tarjeta

En esta prueba, solo se comparó los registros de corriente y voltaje que entrega el software con un amperímetro y un osciloscopio midiendo voltaje. De igual manera, se calculó un error absoluto y relativo para después ajustar los datos.

En la figura 6-1, la corriente de la tarjeta, tiene presición en su medición más hace falta ajustar su exactitud tomando como referencia otro instrumento de medición que se encuentre calibrado.

Según la tabla 6-1, el promedio de error de voltaje es de un 2 %. El error de corriente es de 177 %, sin embargo ese valor tan alto es debido a que la medición de una carga que consume baja energía como lo es el bombillo, no está dentro de la tolerancia de energía que admite la tarjeta. En la medición del bombillo hay un error relativo del 990 % con respecto a la corriente del amperímetro; por lo tanto, se procede a realizar pruebas con cargas que consuman más energía.

Tabla 6-1.: Autor - Resultados de la prueba N° 1

CARGA	MULTÍMETRO		TARJETA
	Corriente	Voltaje	Corriente
Bombillo led de 9WT	0,0772	122	0,84175682
Portatil, osciloscopio, Raspberry, TV, PS3, Parlantes	1,4	122	2,48453856
Licuadora	2,11	122	3,10783076
Licuadora pequeña	1,46	122	2,32913756
Licuadora + licuadora pequeña	3,87	121	5,06727028
Plancha de 1000W	9,2	118	10,7248316
Licuadora + licuadora pequeña + plancha	12,55	116	14,6785336

OSCILOSCOPIO	Diferencias de corriente (A)		Diferencia de voltaje(V)		
	Voltaje	Error Absoluto	Error relativo	Error Absoluto	Error relativo
119,93	0,764556821	990 %	2,07	2 %	
119,53	1,084538555	77 %	2,47	2 %	
119,63	0,997830763	47 %	2,37	2 %	
119,87	0,869137564	60 %	2,13	2 %	
118,56	1,197270279	31 %	2,44	2 %	
120	1,524831581	17 %	-2	2 %	
114,5	2,128533554	17 %	1,5	1 %	
**Promedio de diferencia =	1,22381416	177 %	1,568571429	2 %	

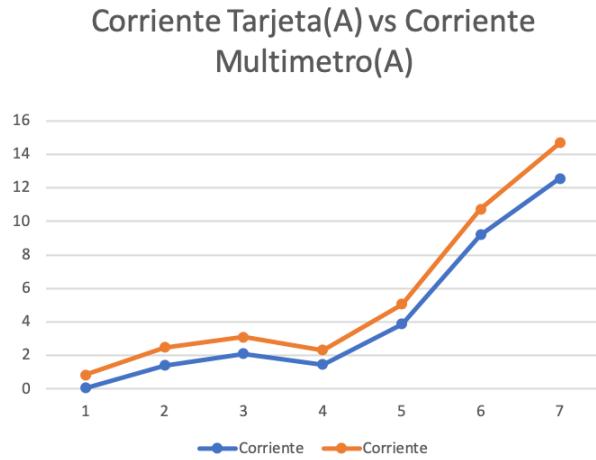


Figura 6-1.: Autor - Corriente Tarjeta vs Corriente Multímetro



Figura 6-2.: Autor - Cargas utilizadas en la primera prueba

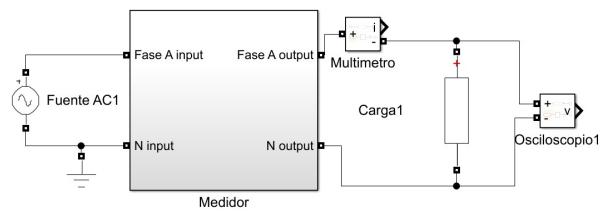


Figura 6-3.: Autor - Esquema de conexión utilizado en la primera prueba (Esquema realizado en MATLAB)

6.2. Segunda Prueba

En esta prueba se decidió medir todo el ciclo de lavado de una lavadora, con el fin de obtener datos en distintos escenarios los cuales seria llenado, lavado y centrifugado y tener una medición más estable.

Carga:

- Lavadora whirlpool de 9.8 A.

Ciclos de lavado:

- Heavy
- Regular
- Super wash
- Centrifugado
- Rinse
- Llenado



Figura 6-4.: Autor - Carga utilizada en la segunda prueba

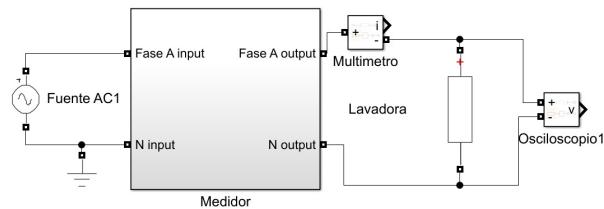


Figura 6-5.: Esquema de conexión utilizado en la segunda prueba (Esquema realizado en MATLAB)

El análisis se realizó con respecto a las fases de lavado de la lavadora y en todos los ciclos los siguientes datos fueron comunes:

- Volatje RMS total con un valor promedio de 121 V en todos los ciclos.
- Volatje RMS Fundamental con un valor promedio de 120,97 V en todos los ciclos.

6.2.1. Resultados en el ciclo heavy

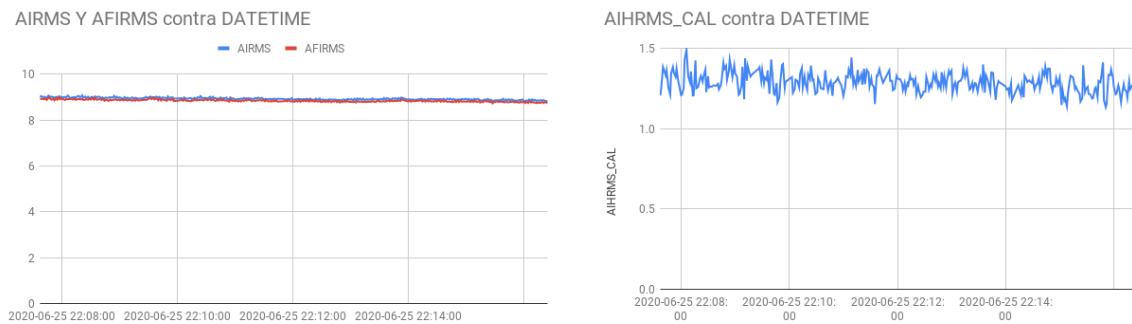


Figura 6-6.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

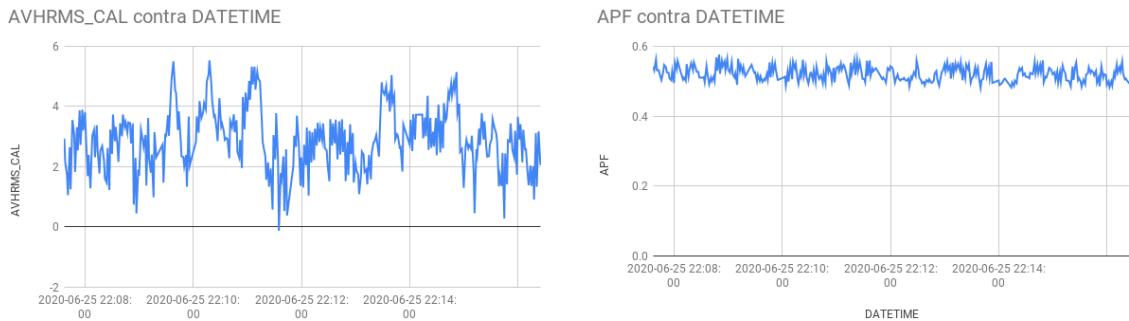


Figura 6-7.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

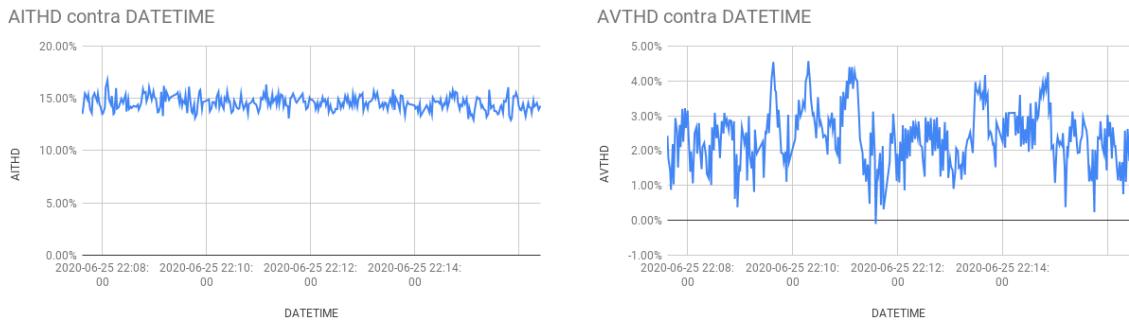


Figura 6-8.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

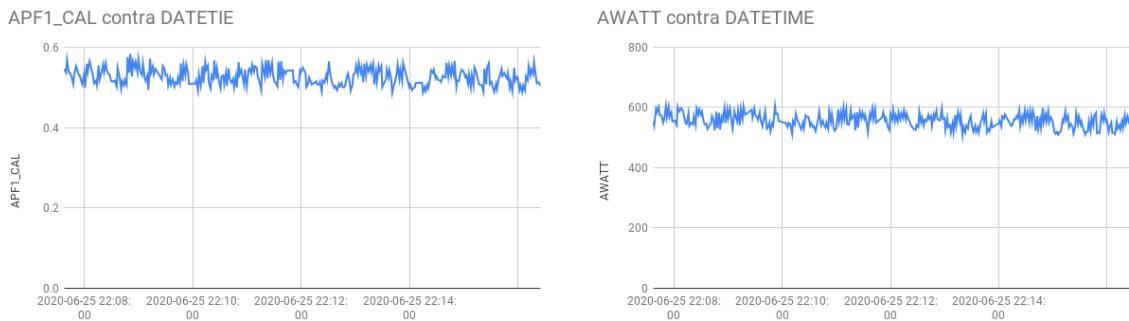


Figura 6-9.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

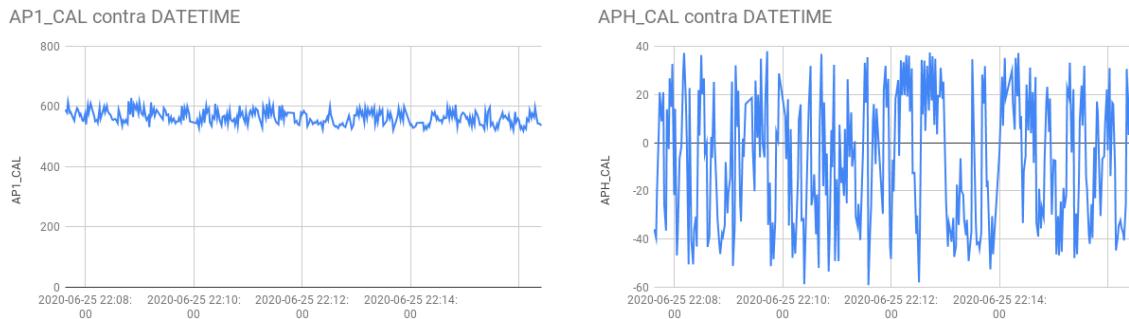


Figura 6-10.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

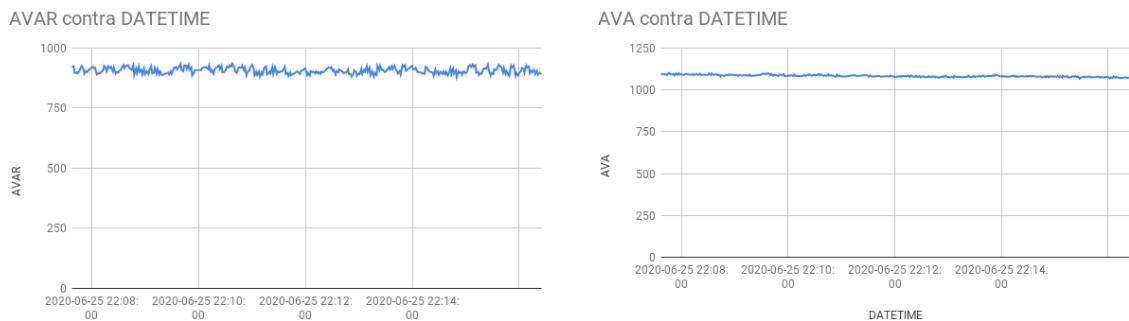


Figura 6-11.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

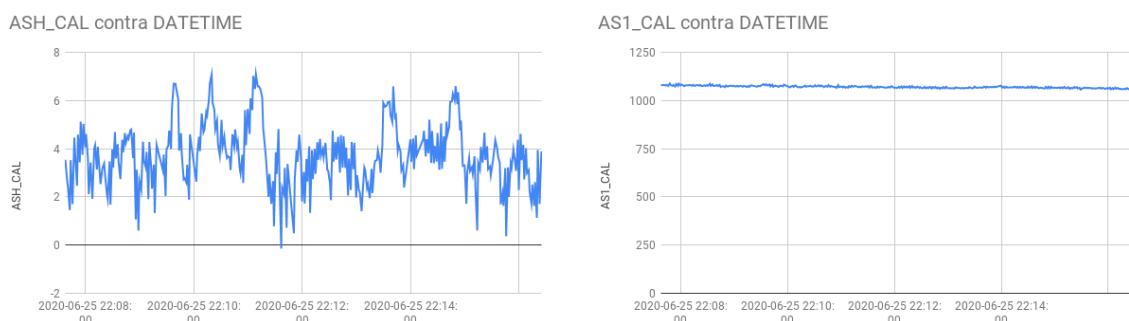


Figura 6-12.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

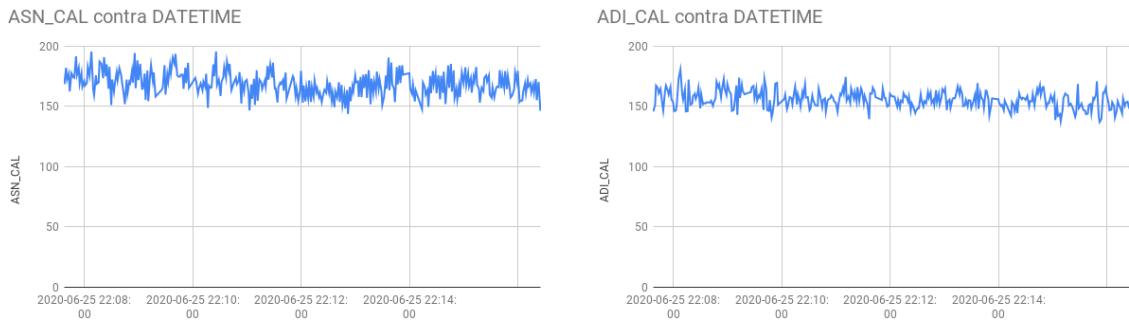


Figura 6-13.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

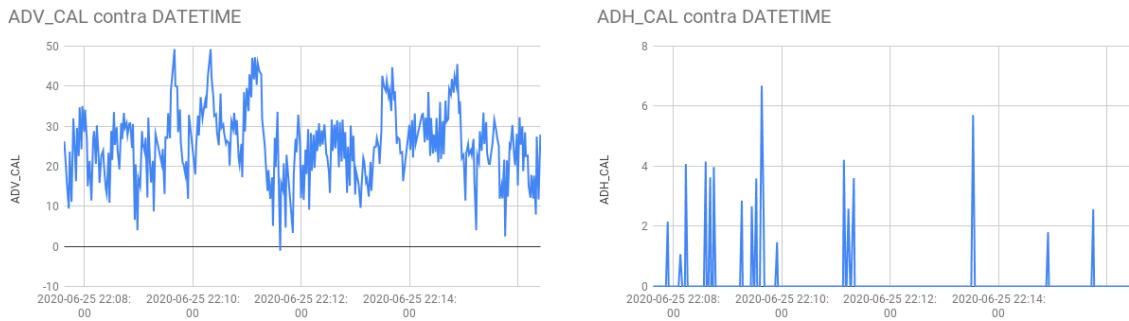


Figura 6-14.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

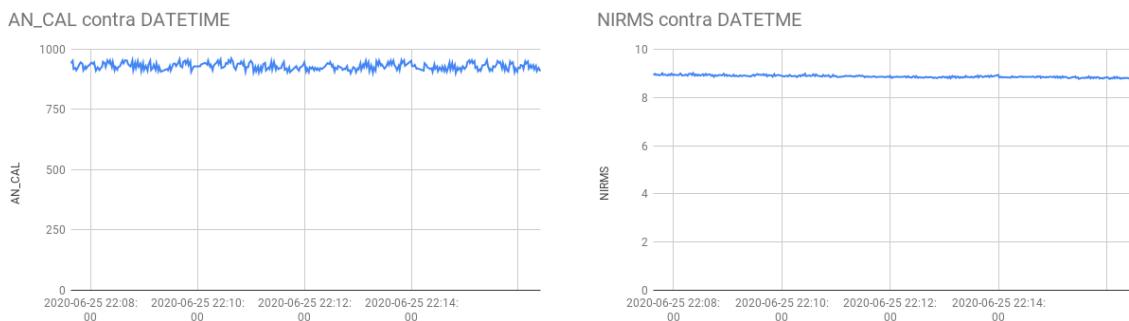


Figura 6-15.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

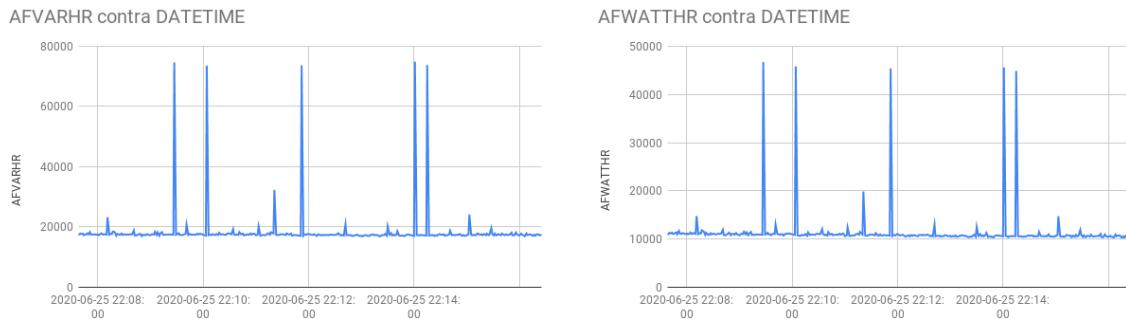


Figura 6-16.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

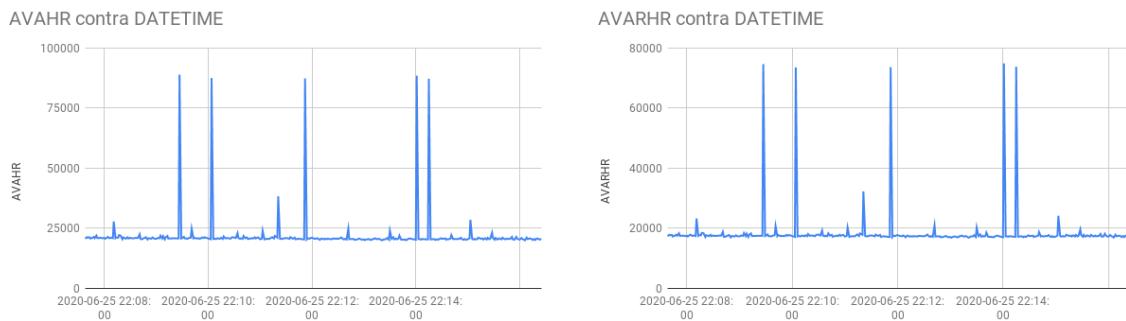


Figura 6-17.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

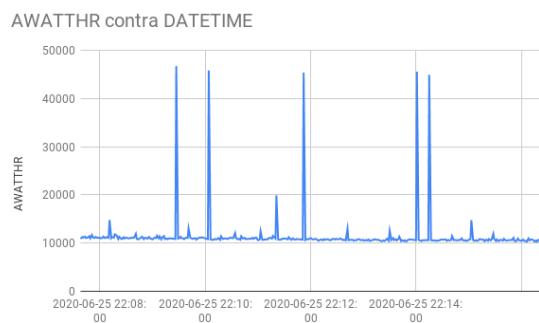


Figura 6-18.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO HEAVY

Análisis del ciclo heavy

Se ve una diferencia entre la corriente total y la fundamental debido a que existe un componente armónico como se muestra en la figura 6-6. El voltaje fundamental y total es el mismo, pero existe una componente armónica que no altera significativamente el resultado total. El factor de potencia indica que tiene componentes inductivos y demuestra que este equipo no está muy bien diseñado para tener un buen consumo energético como se muestra en la figura 6-7. Los porcentajes de armónicos demuestran que existe más cantidad de armónicos en corriente que en voltaje debido a que el dispositivo introduce esta cantidad de armónicos como se muestra en la figura 6-8. El factor de potencia total y el factor de potencia fundamental tienen el mismo comportamiento y demuestra que no es un dispositivo con buena calidad energética. La potencia activa total tiene el mismo comportamiento que la potencia activa fundamental, pero en algunas muestras la potencia activa fundamental es mayor debido a los valores negativos de la potencia armónica; de igual manera ocurre en la potencia aparente, cuando las velocidades del motor cambian. Las distorsiones armónicas tienen picos altos. Cuando el motor hace más fuerza, los consumos de energía son mayores; al igual que el consumo de energía total.

6.2.2. Resultados en el ciclo regular

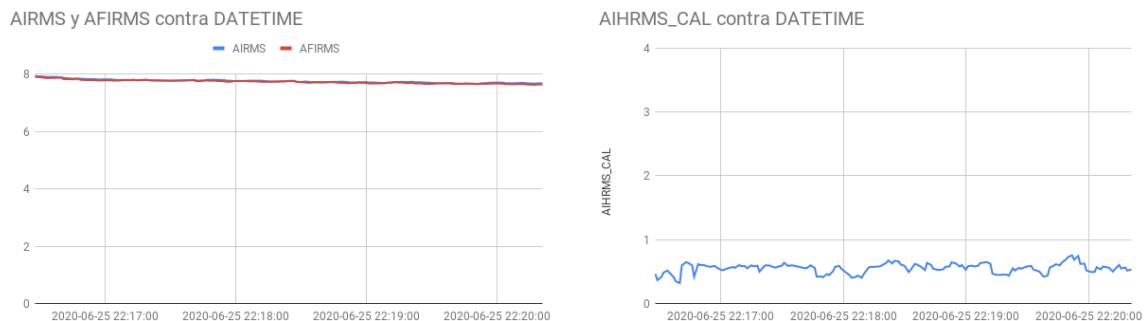


Figura 6-19.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

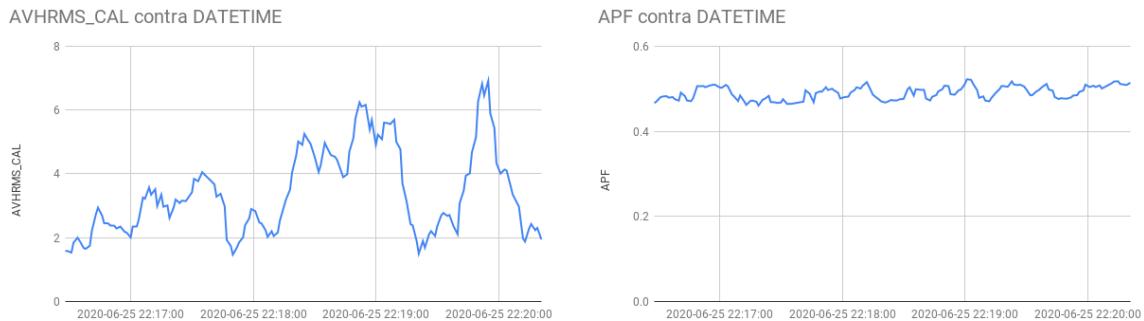


Figura 6-20.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

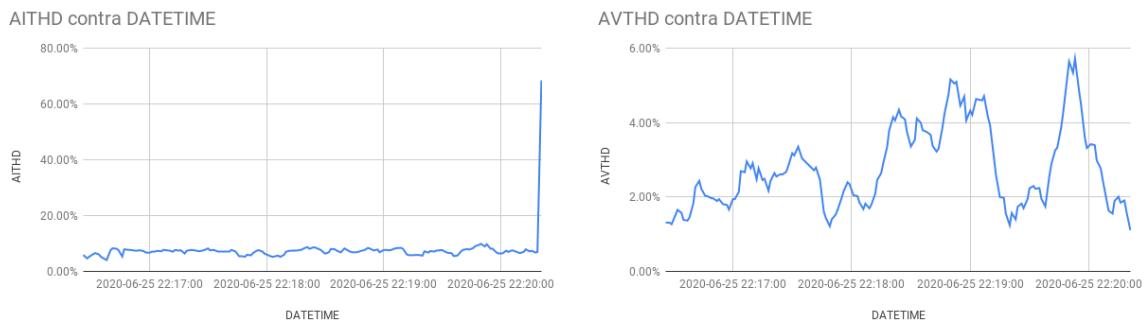


Figura 6-21.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

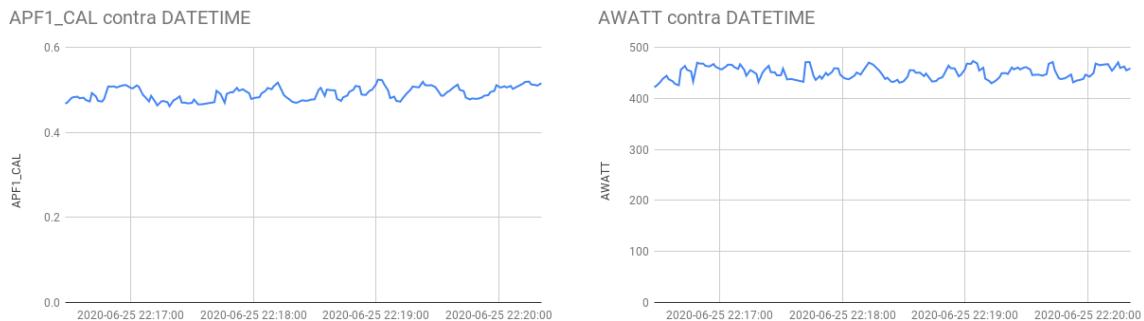


Figura 6-22.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

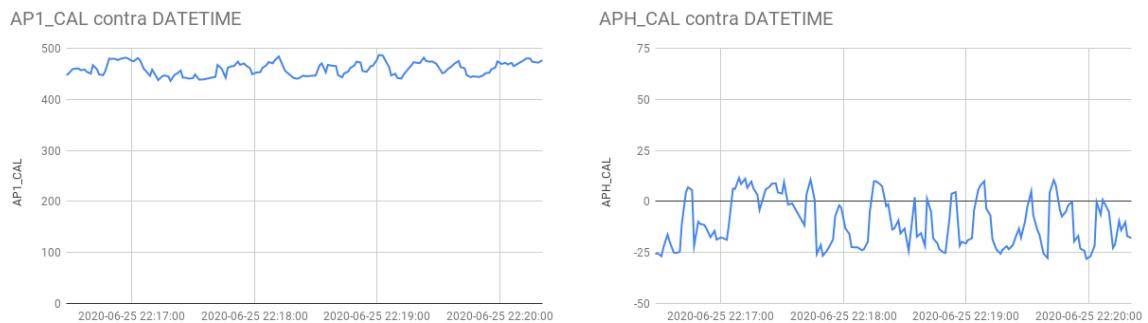


Figura 6-23.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

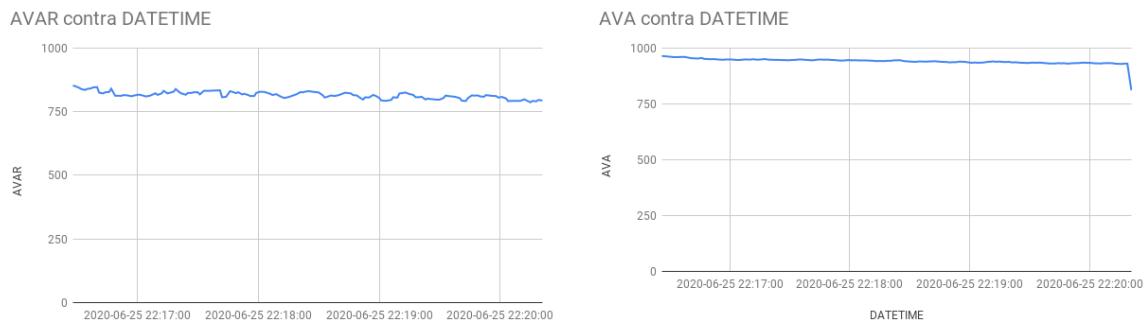


Figura 6-24.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

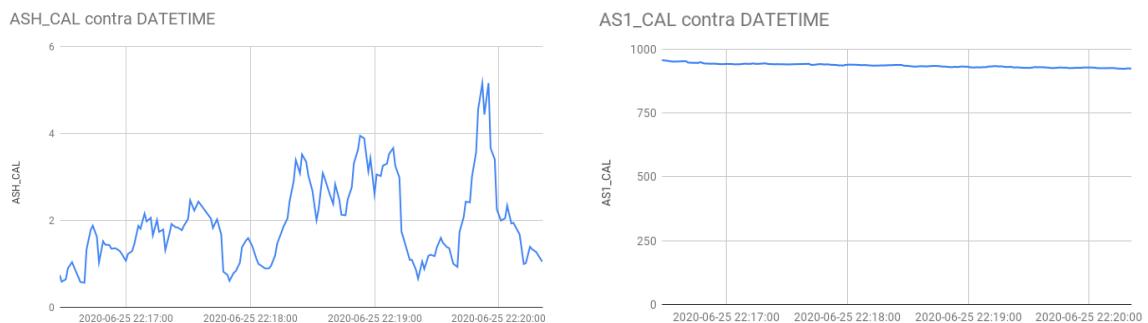


Figura 6-25.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

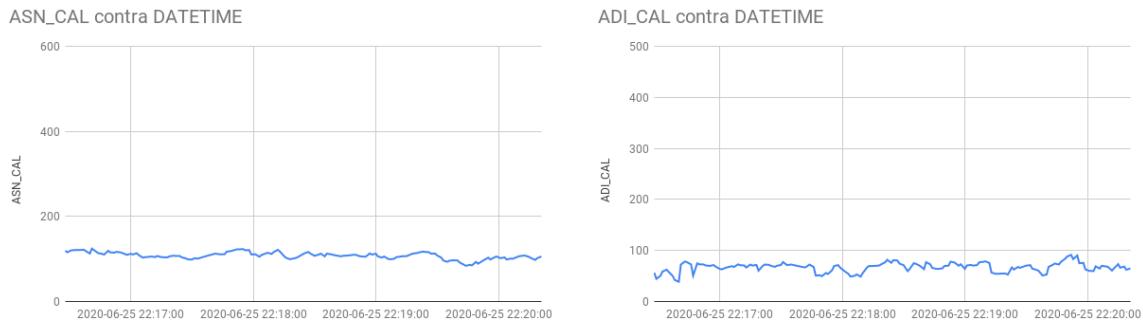


Figura 6-26.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

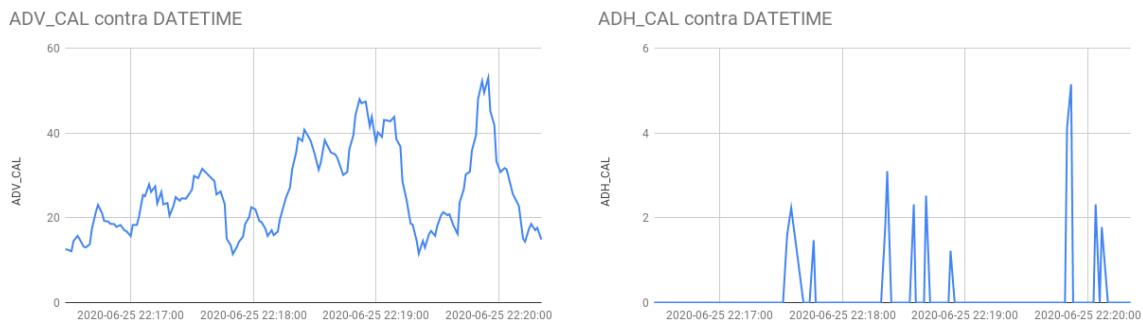


Figura 6-27.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

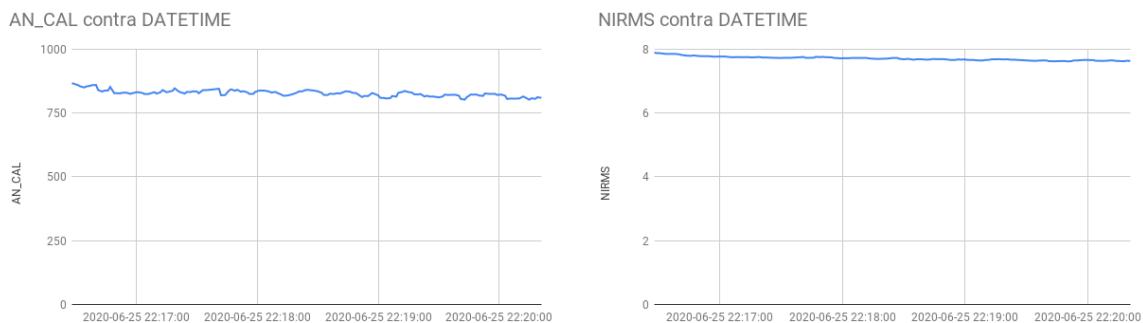


Figura 6-28.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

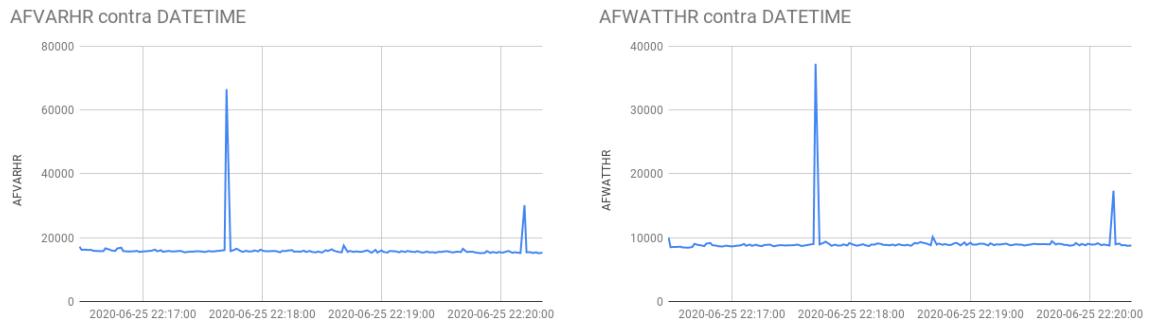


Figura 6-29.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

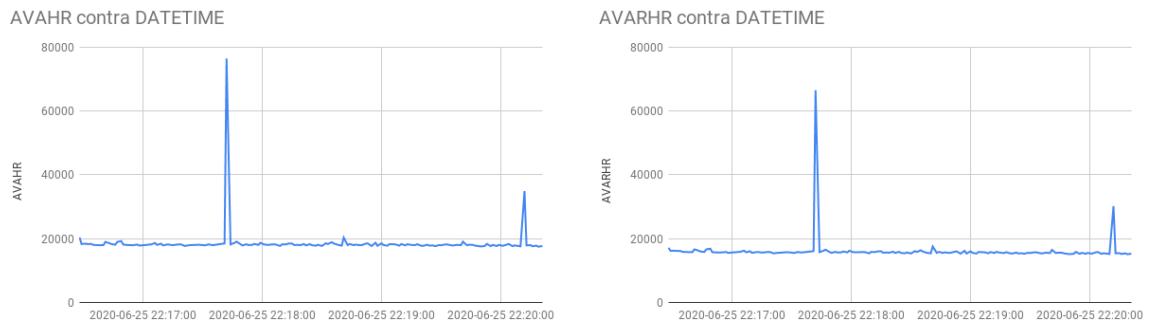


Figura 6-30.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

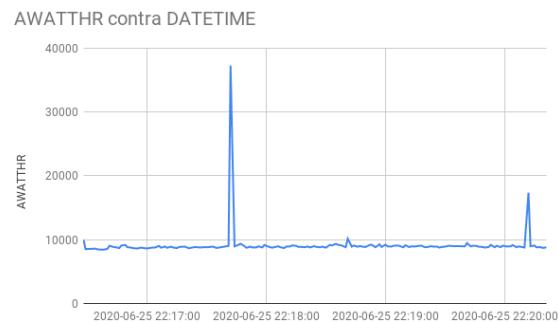


Figura 6-31.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO REGULAR

Análisis del ciclo regular

Este ciclo tiene una tendencia muy parecida al ciclo heavy. Se refleja que al final del ciclo, los porcentajes de armónicos cambia drásticamente, aunque solo en corriente, esto puede ser debido al cambio de frecuencia en el motor. Este ciclo al igual que el heavy, evidencia que el factor de potencia no es el ideal y no tiene una buena eficiencia energética. De igual manera, se observa que este ciclo consume menos corriente por ende el consumo energético es menor pero igual existen picos de energía en las gráficas de WATTHR.

6.2.3. Resultados en el ciclo super wash

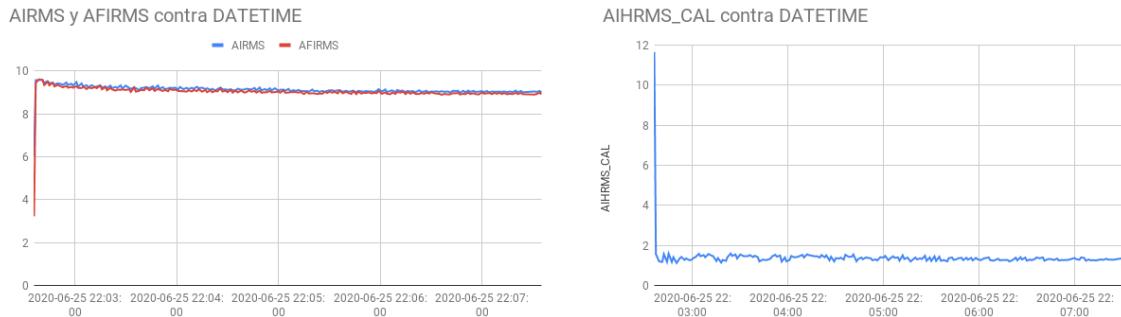


Figura 6-32.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

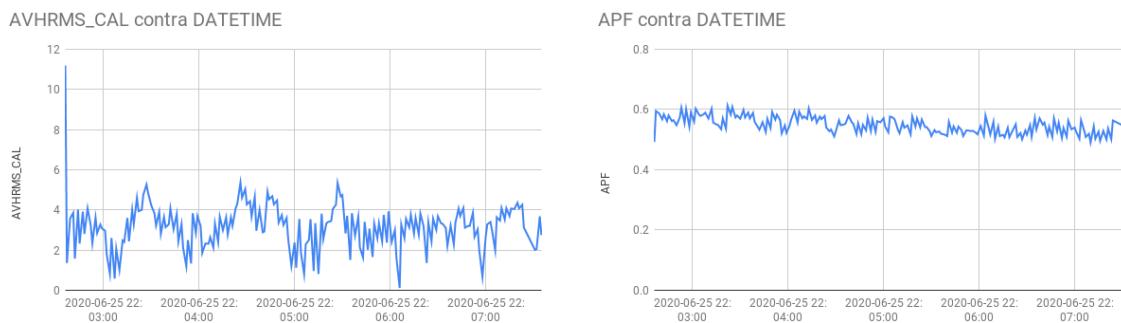


Figura 6-33.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

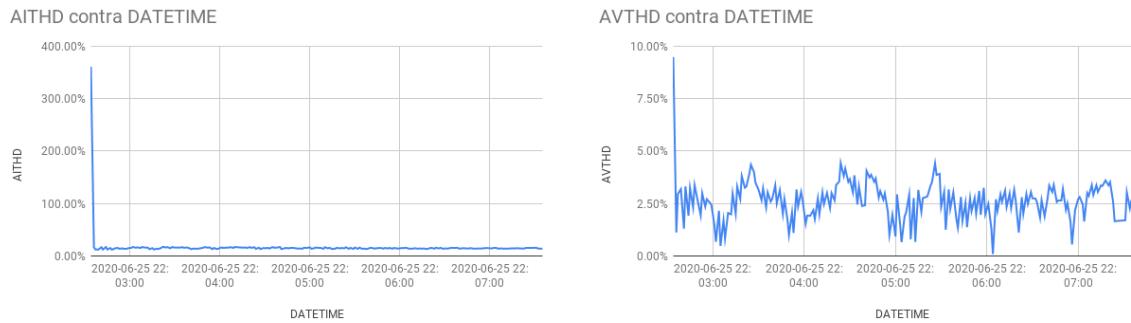


Figura 6-34.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

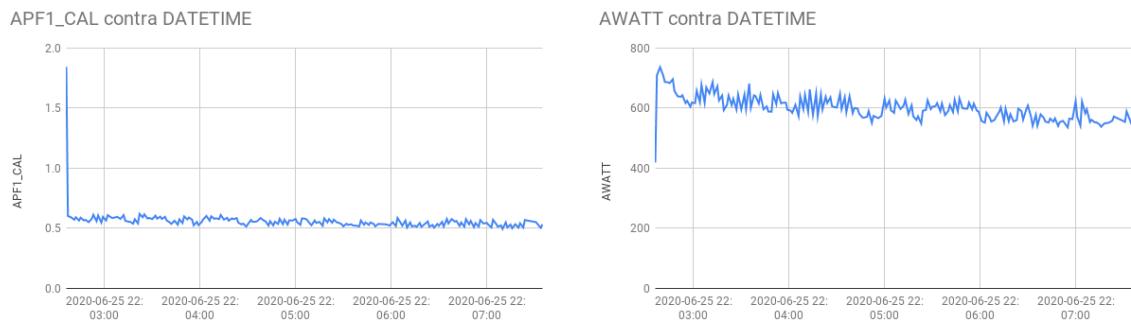


Figura 6-35.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

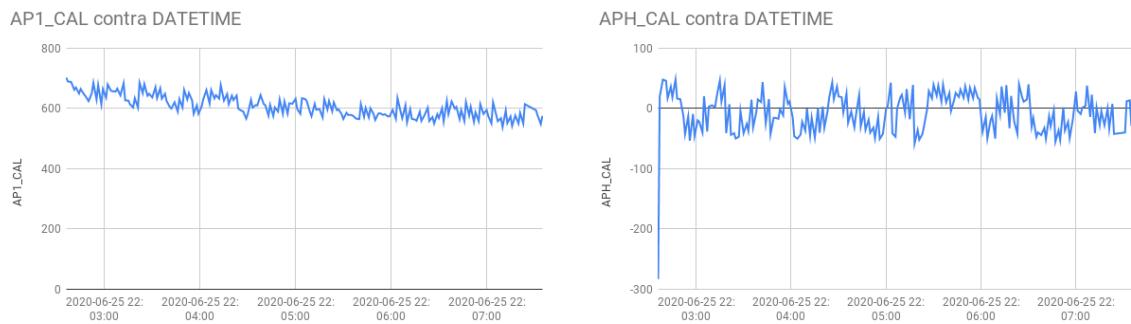


Figura 6-36.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

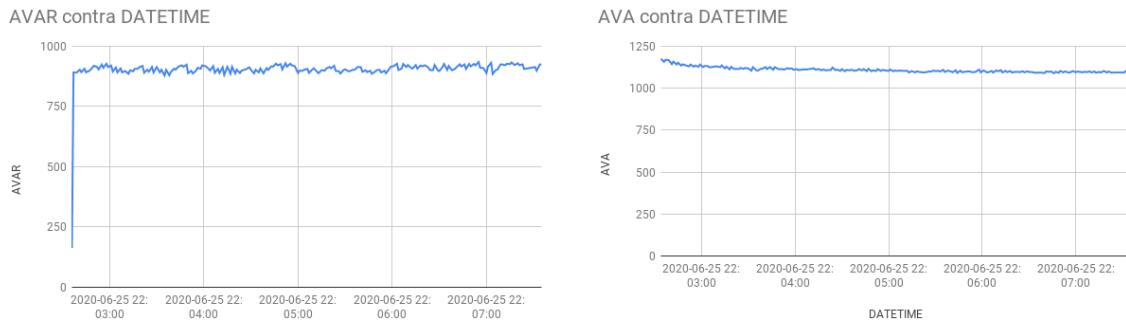


Figura 6-37.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

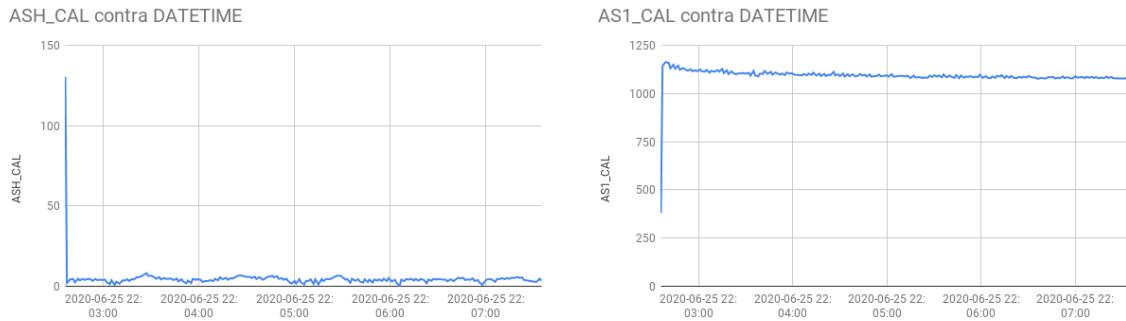


Figura 6-38.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

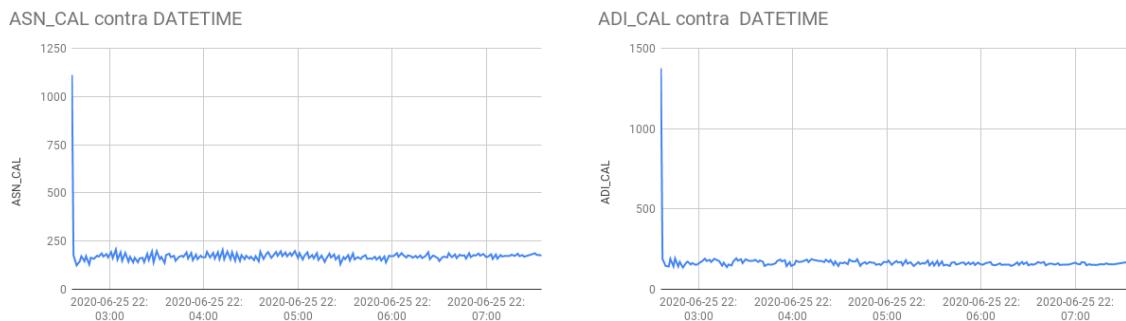


Figura 6-39.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

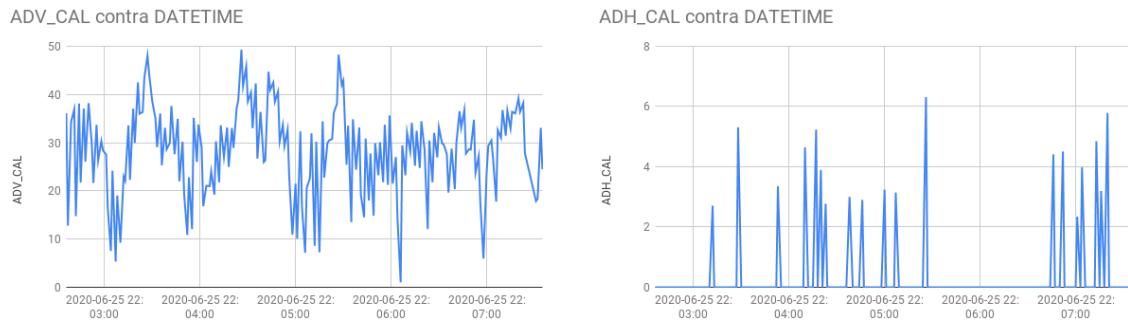


Figura 6-40.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

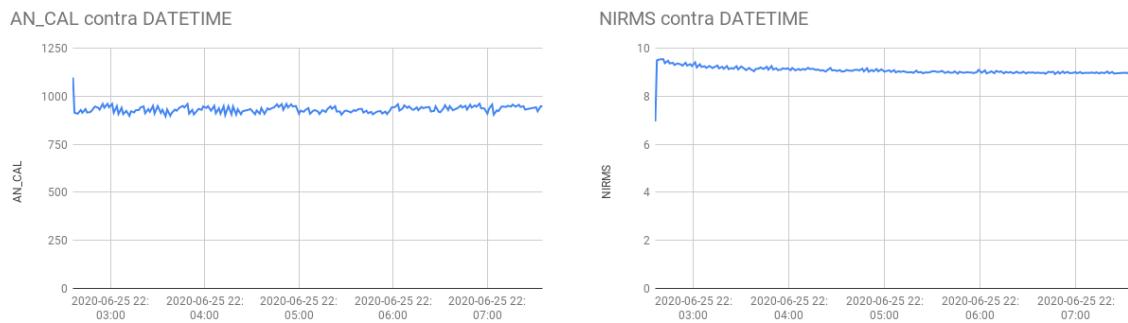


Figura 6-41.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

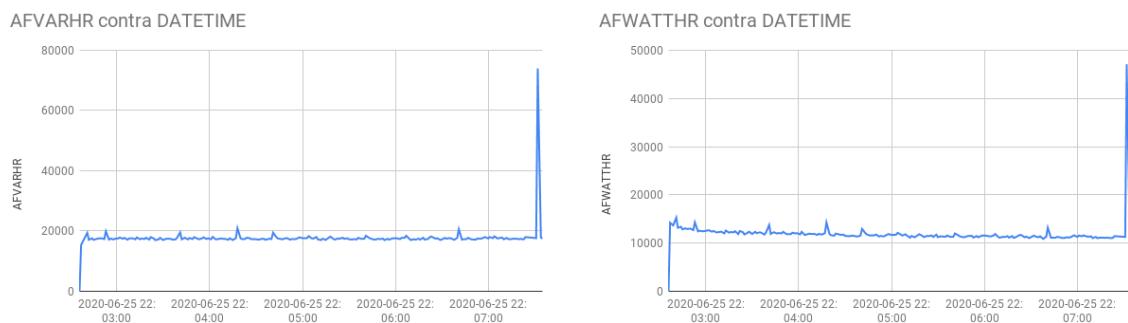


Figura 6-42.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

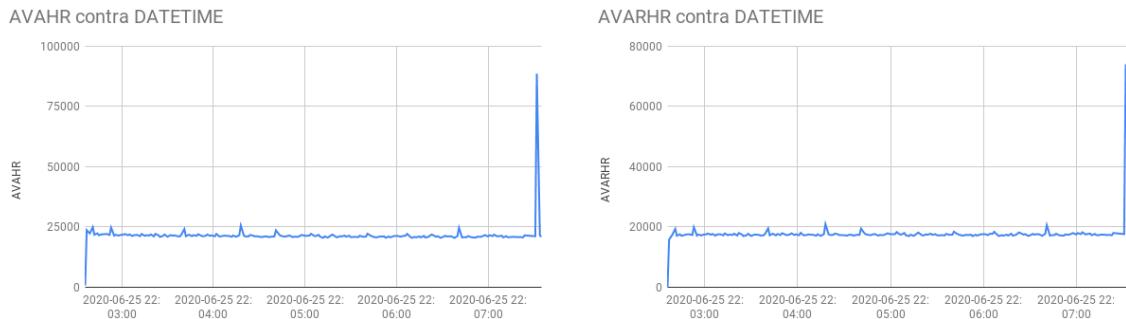


Figura 6-43.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

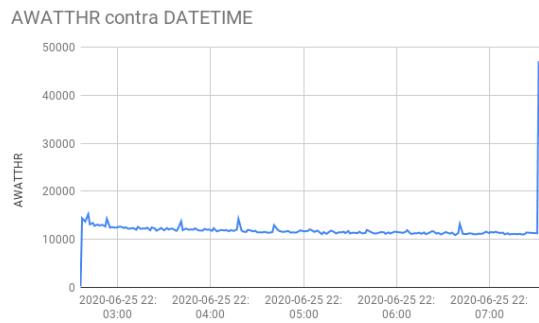


Figura 6-44.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO SUPER WASH

Análisis del ciclo super wash

En la grafica 6-32, se muestra un valor alto de corriente que conlleva a concluir que este ciclo es el que más energía consume. También se observa presencia de su componente armónico aproximadamente en 2 A y 5V. El factor de potencia es muy parecido a las dos primeras fases. El comportamiento de las potencias también es el mismo que en las primeras fases. El consumo energético tiene picos en los cambios de estado del motor.

6.2.4. Resultados en el ciclo centrífugado

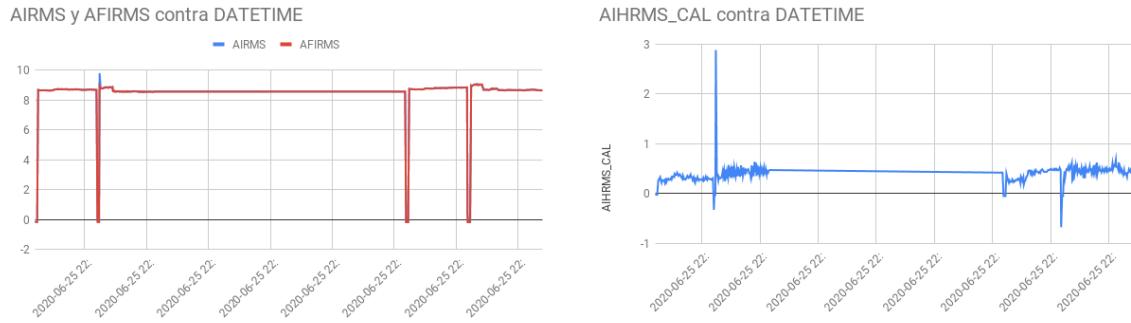


Figura 6-45.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

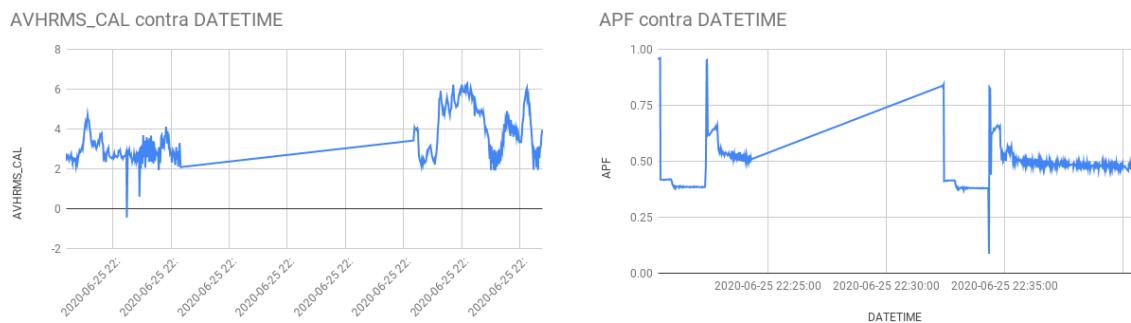


Figura 6-46.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

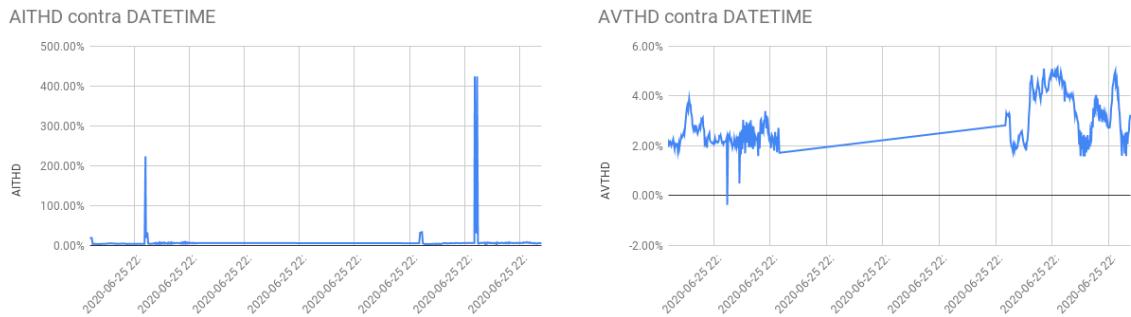


Figura 6-47.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

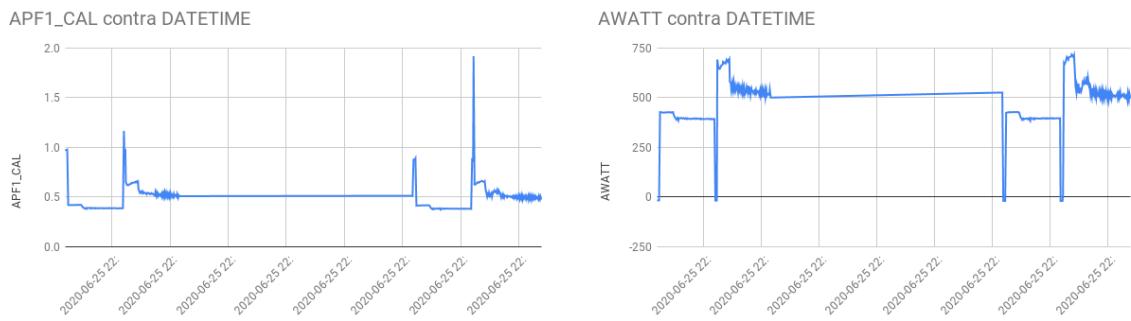


Figura 6-48.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

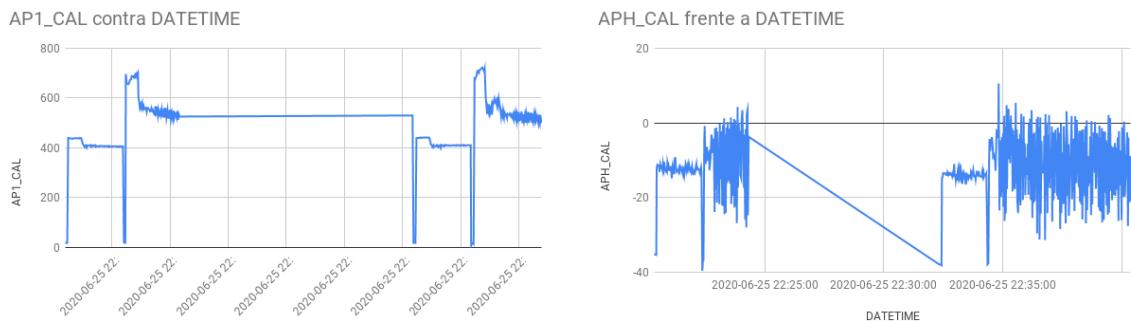


Figura 6-49.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

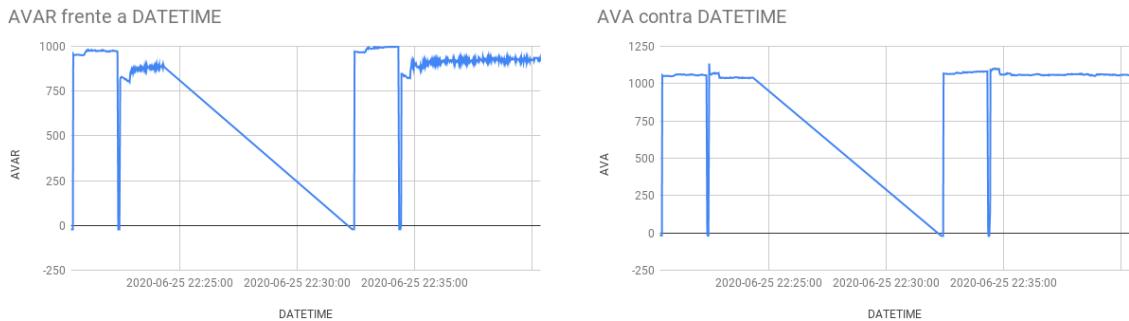


Figura 6-50.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

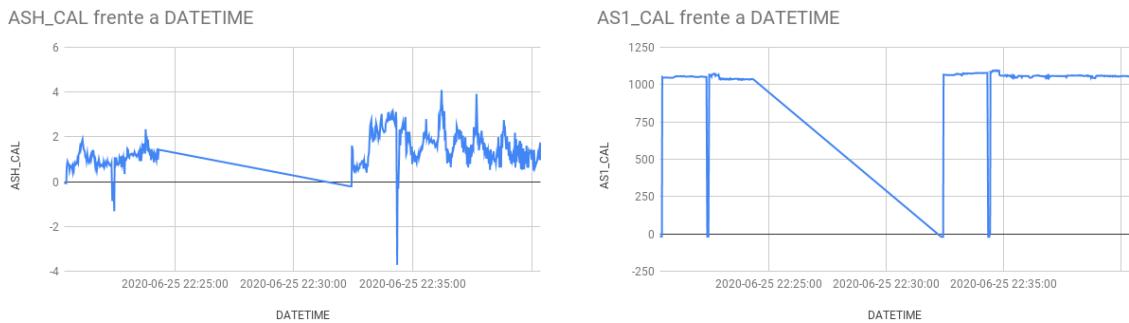


Figura 6-51.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

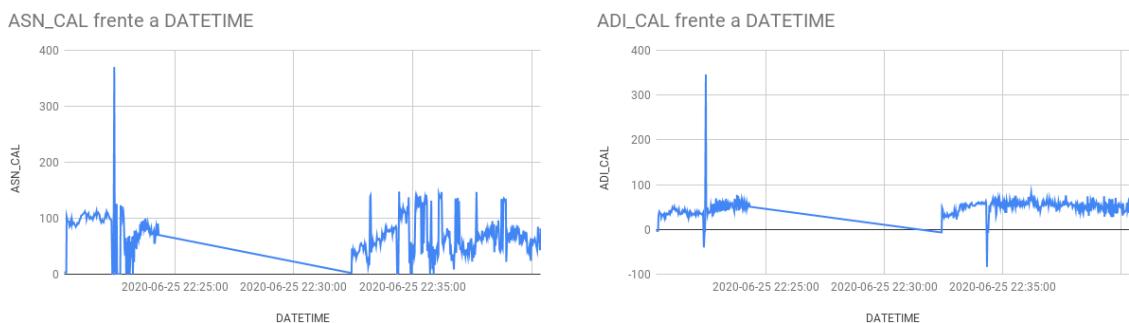


Figura 6-52.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

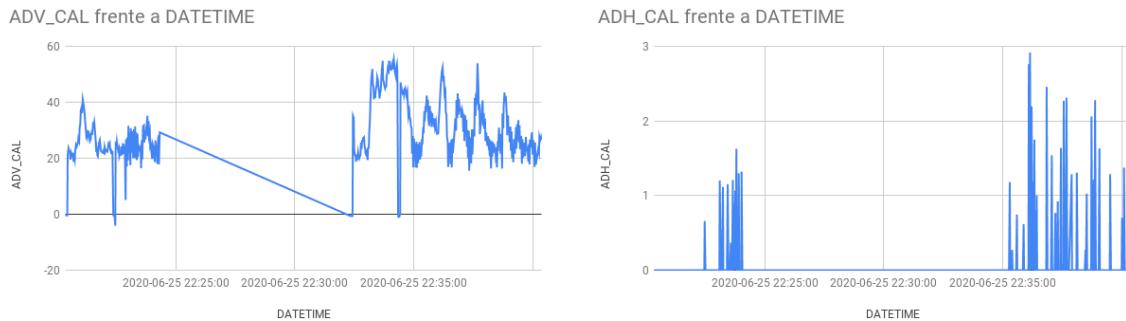


Figura 6-53.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

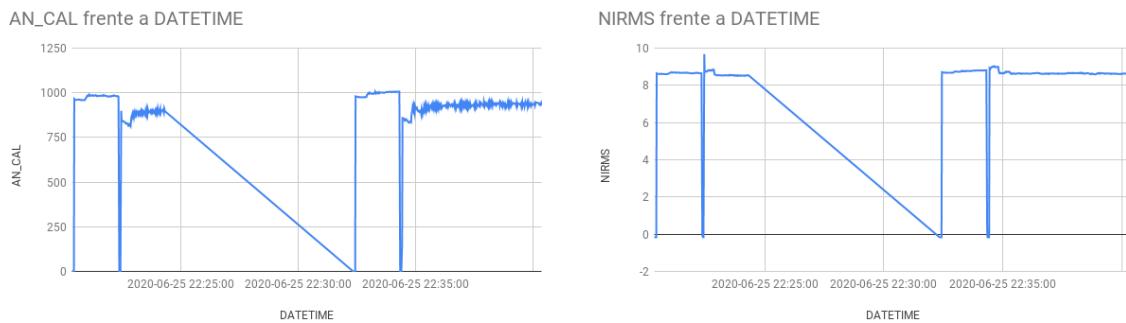


Figura 6-54.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

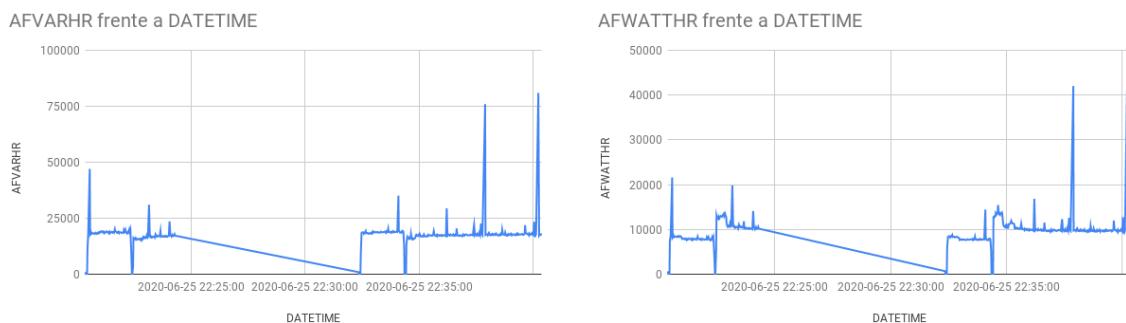


Figura 6-55.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

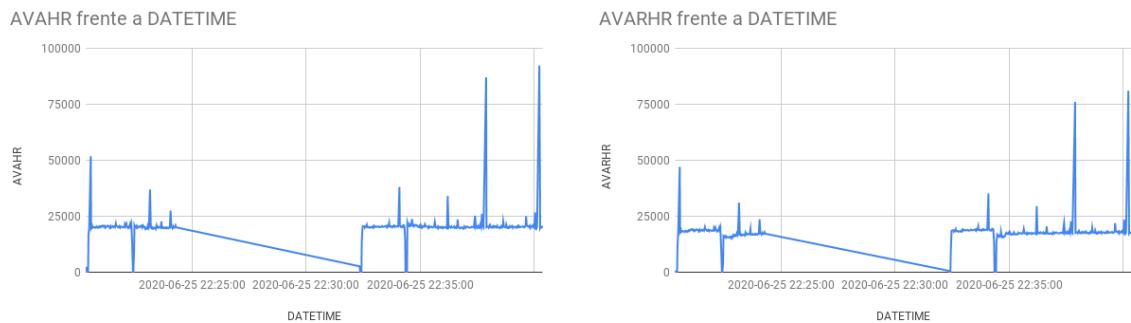


Figura 6-56.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

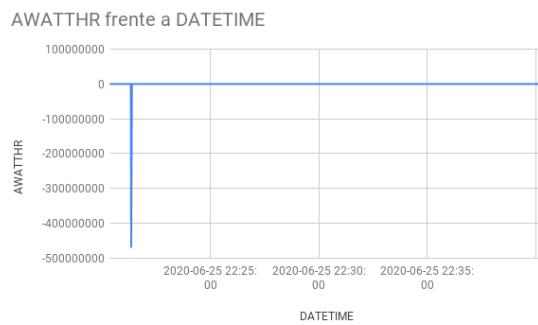


Figura 6-57.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO CENTRIFUGADO

Análisis del ciclo centrífugado

En este ciclo se aprecia bien cuando el motor hace pausas, también se ve que en esos instantes la cantidad de armónicos en corriente se incrementan drásticamente, generando picos muy elevados. La distorsión en voltaje cambia, no es tan constante como en los anteriores ciclos. Además, se ve un incremento en los armónicos a medida que el ciclo termina. El factor de potencia en este ciclo varía demasiado; hay picos muy altos en el porcentaje de armónicos, algunos llegando a sobrepasar el 400% en corriente y llegando a casi 6% en voltaje. Las potencias varían mucho dependiendo del momento del ciclo. De igual forma las distorsiones están presentes y la energía consumida en este ciclo fluctúa mucho dependiendo el momento en que el motor está funcionando. También es uno de los ciclos que más armónicos genera.

6.2.5. Resultados en el ciclo rinse

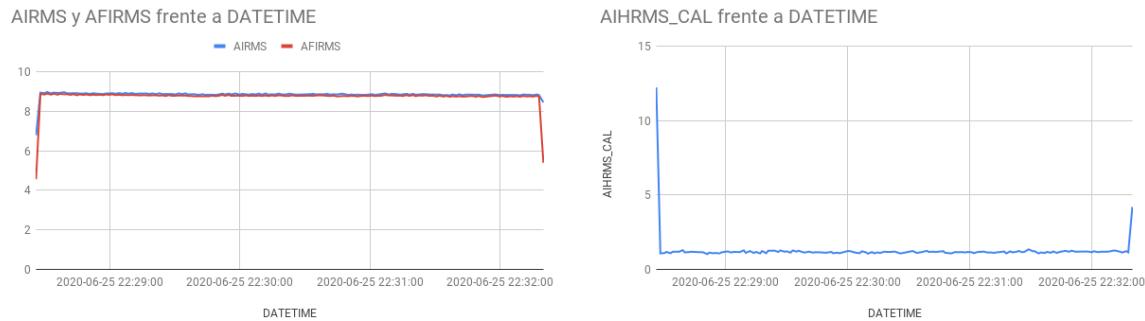


Figura 6-58.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

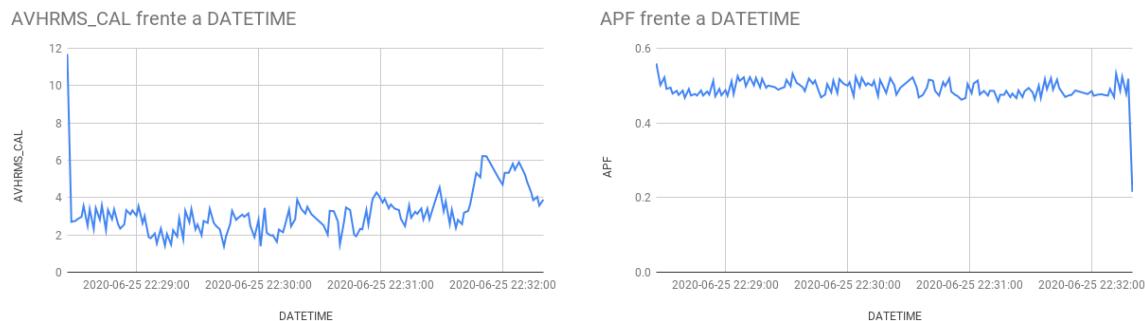


Figura 6-59.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

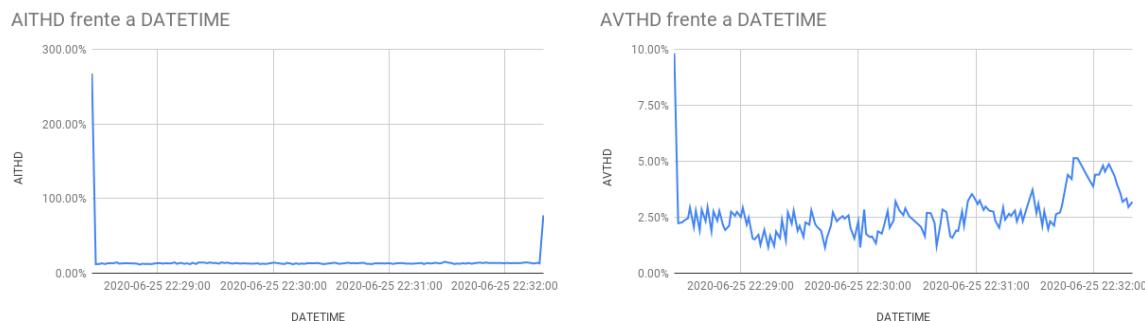


Figura 6-60.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

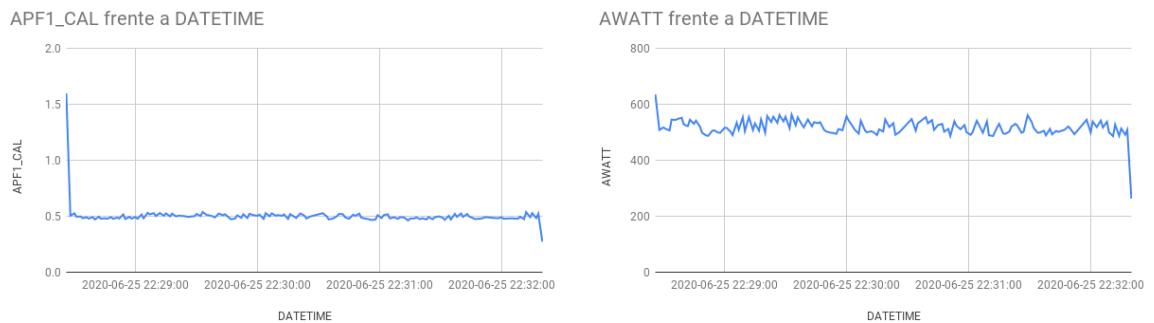


Figura 6-61.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

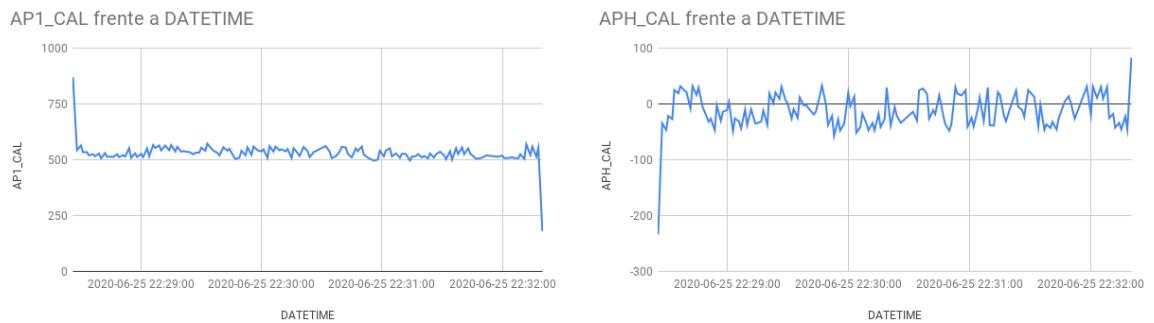


Figura 6-62.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

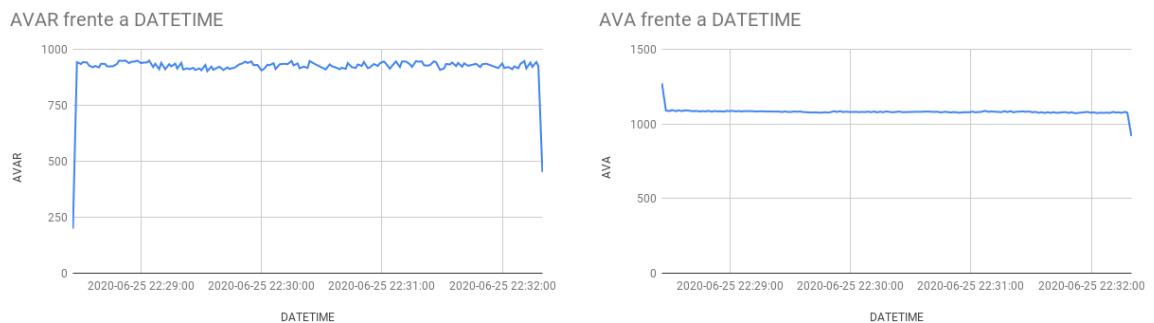


Figura 6-63.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

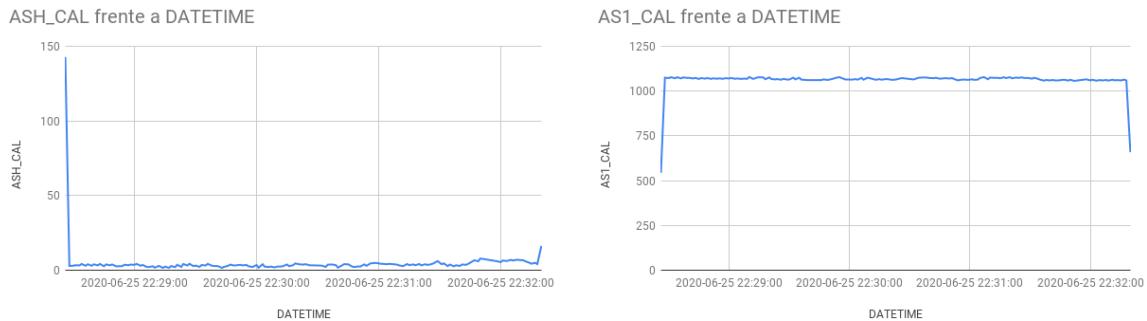


Figura 6-64.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

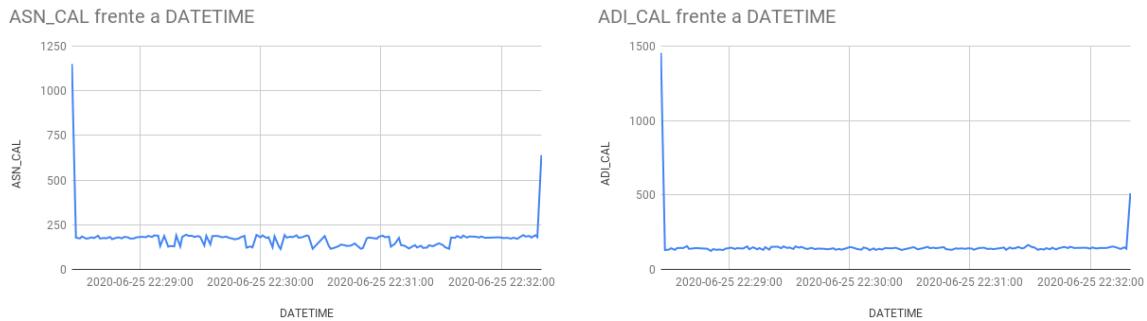


Figura 6-65.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

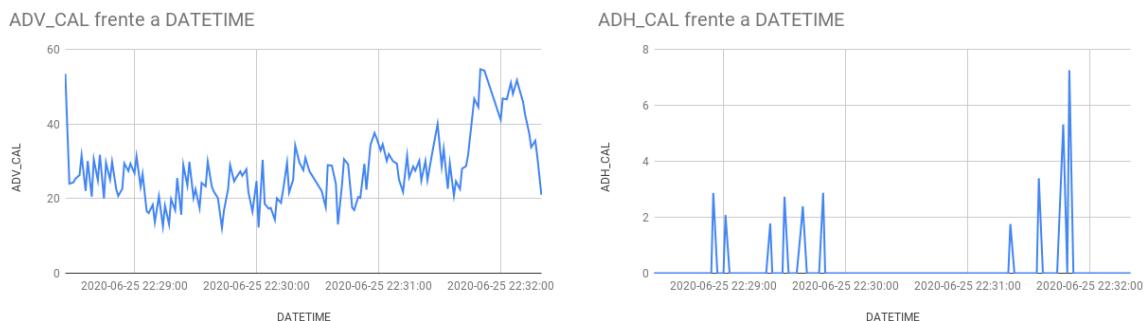


Figura 6-66.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

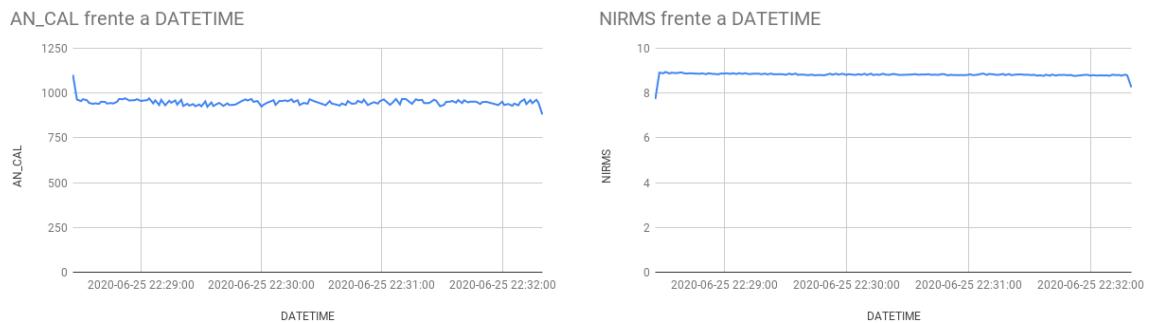


Figura 6-67.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

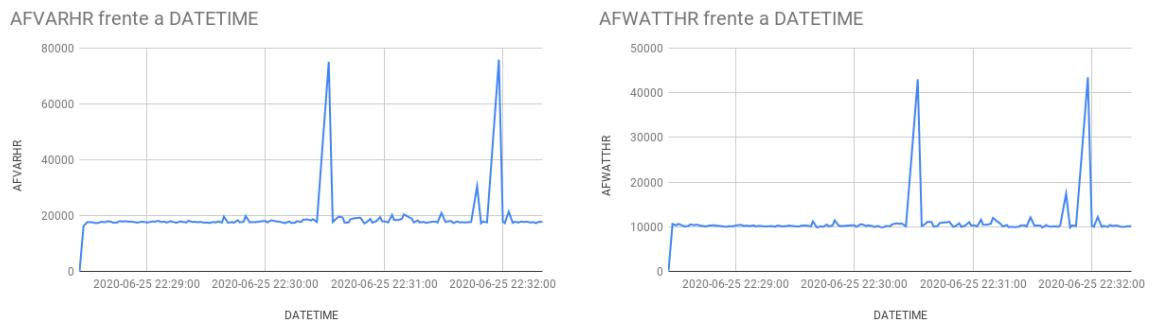


Figura 6-68.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

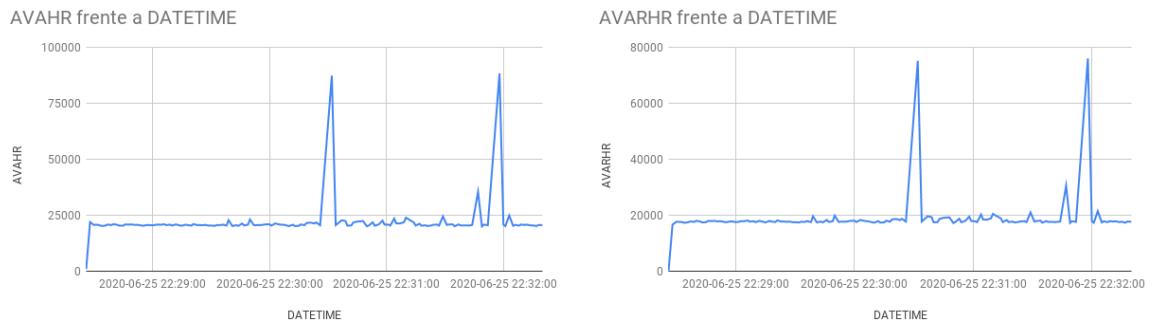


Figura 6-69.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

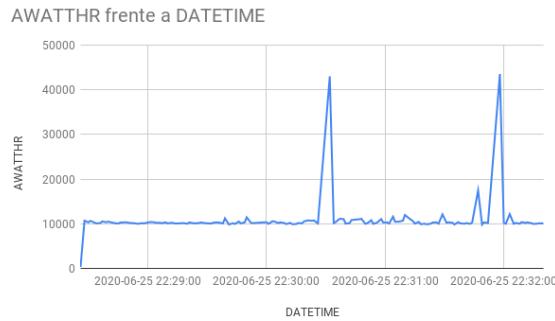


Figura 6-70.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO RINSE

Análisis del ciclo rinse

Este ciclo se comporta muy parecido a los tres primeros, todos sus valores de corriente, voltaje y armónicos están en un rango similar. Como se ha evidenciado anteriormente, hay picos de energía indicando que se está consumiendo mucha energía en ese instante.

6.2.6. Resultados en el ciclo llenado

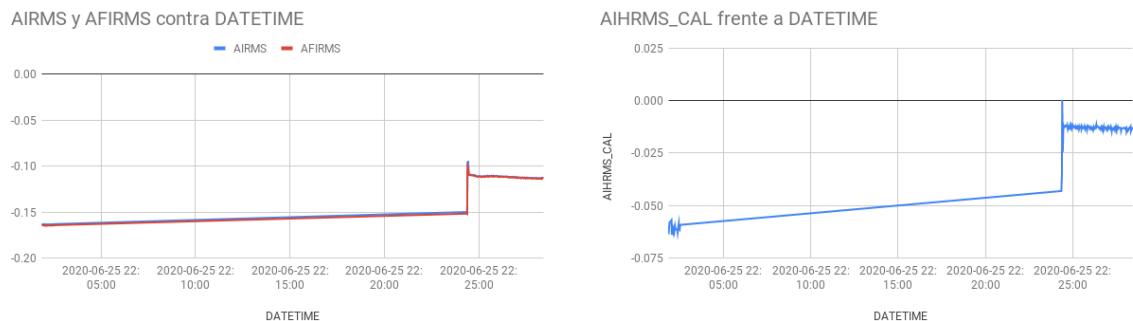


Figura 6-71.: Autor - AIRMS, AFIRMS Y AIHRMS-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

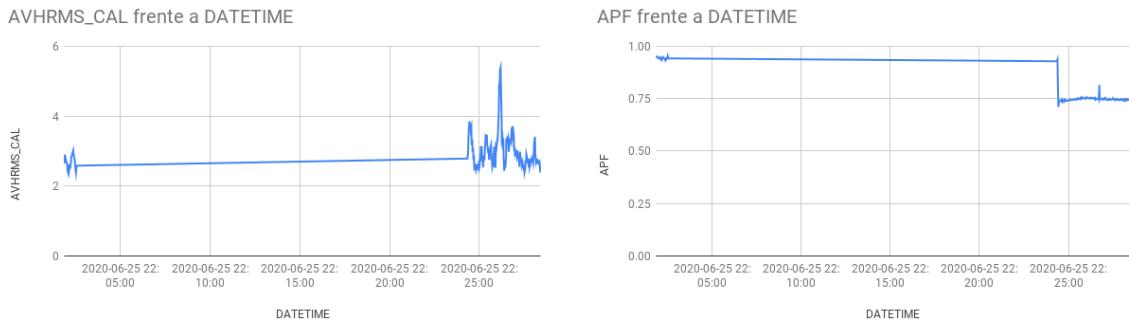


Figura 6-72.: Autor - AVHRMS Y APF VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

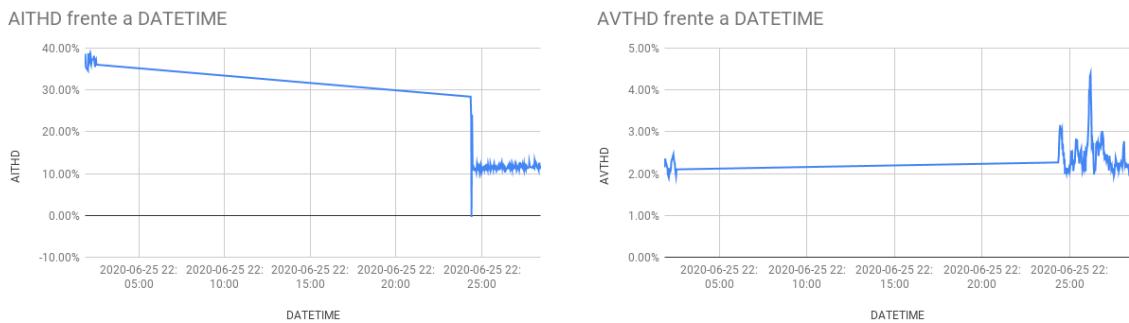


Figura 6-73.: Autor - AITHD Y AVTHD VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

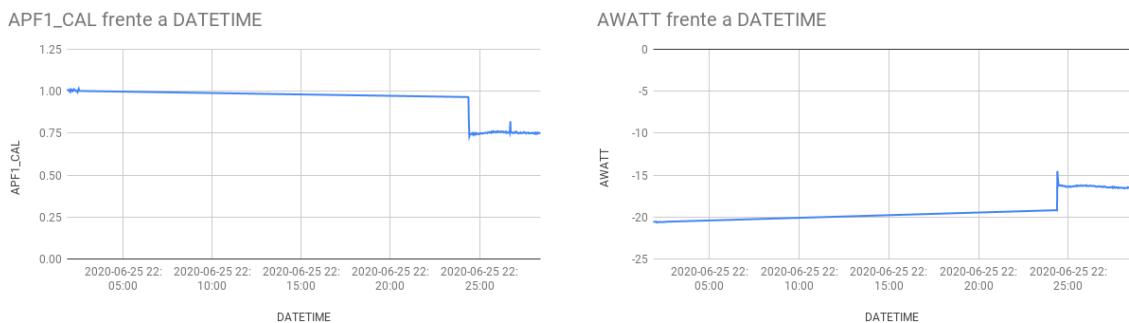


Figura 6-74.: Autor - APF1-CAL Y AWATT VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

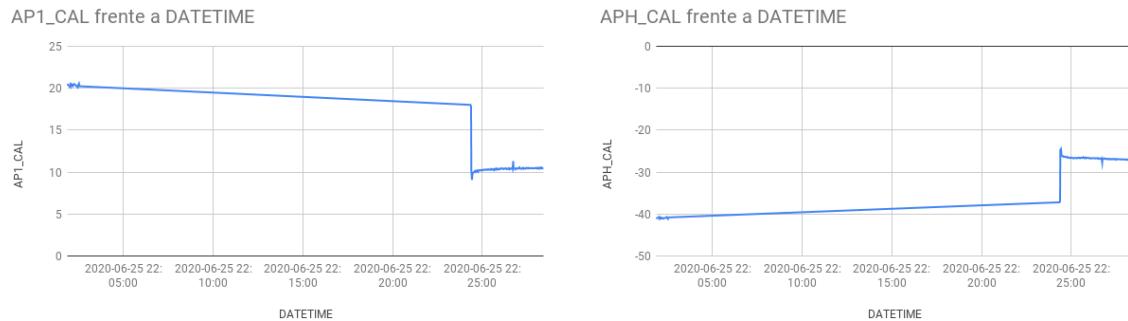


Figura 6-75.: Autor - AP1-CAL Y APH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

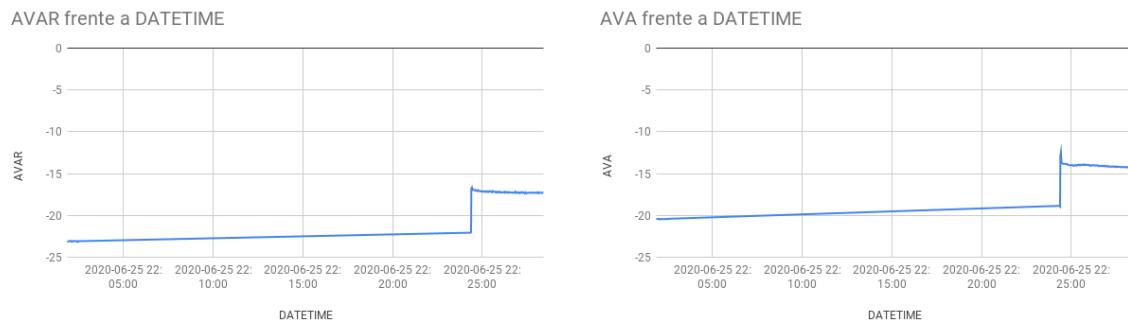


Figura 6-76.: Autor - AVAR Y AVA VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

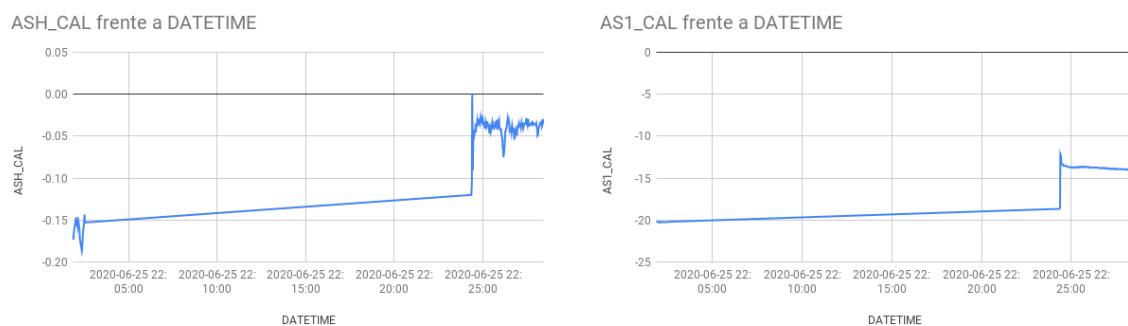


Figura 6-77.: Autor - ASH-CAL Y AS1-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

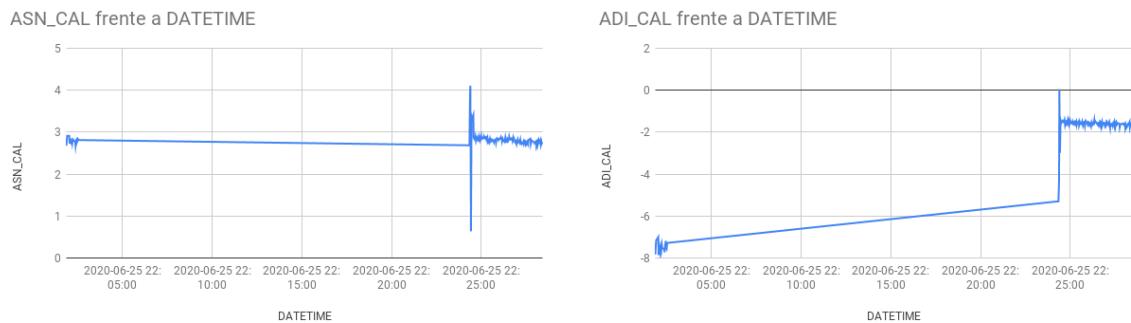


Figura 6-78.: Autor - ASN-CAL Y ADI-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

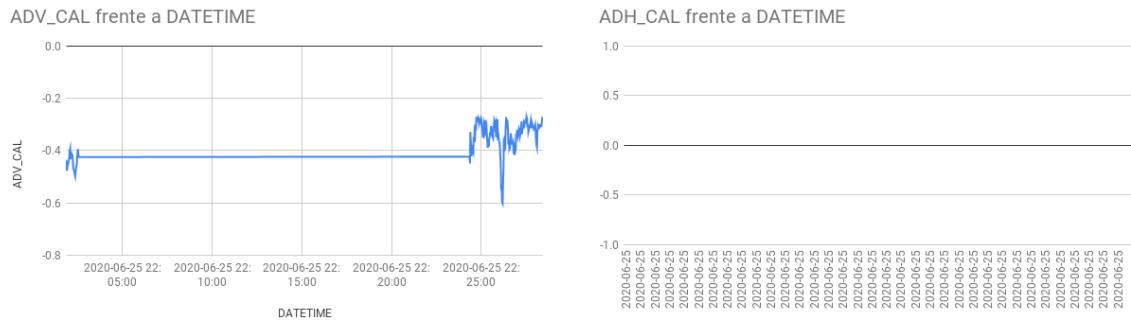


Figura 6-79.: Autor - ADV-CAL Y ADH-CAL VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

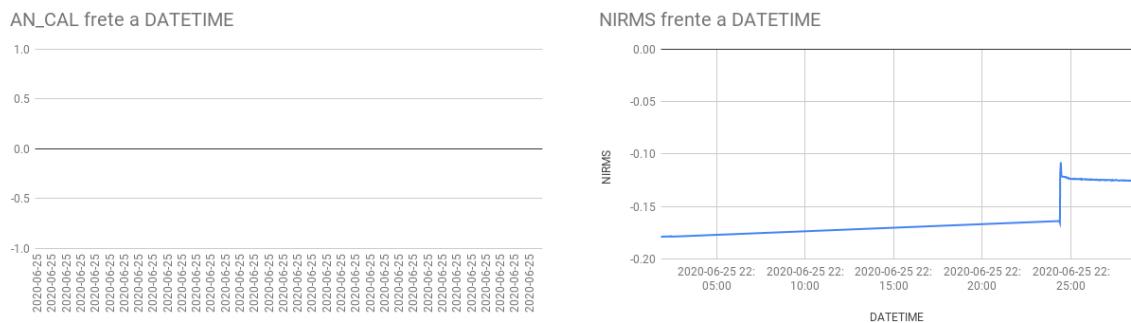


Figura 6-80.: Autor - AN-CAL Y NIRMS VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

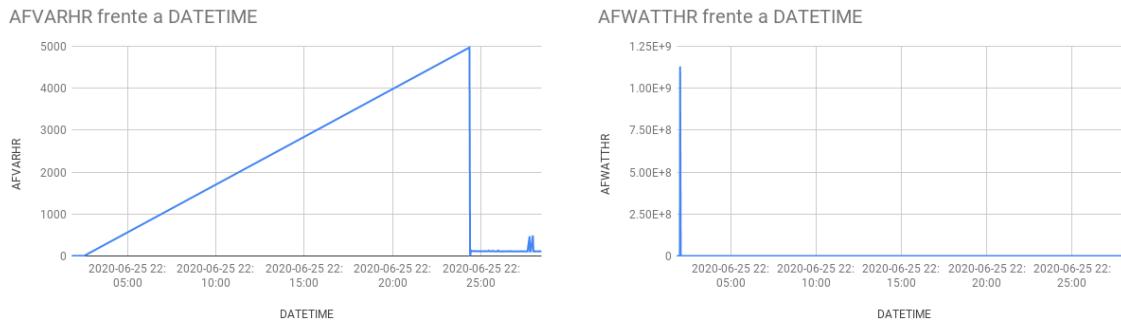


Figura 6-81.: Autor - AFVARHR Y AFWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

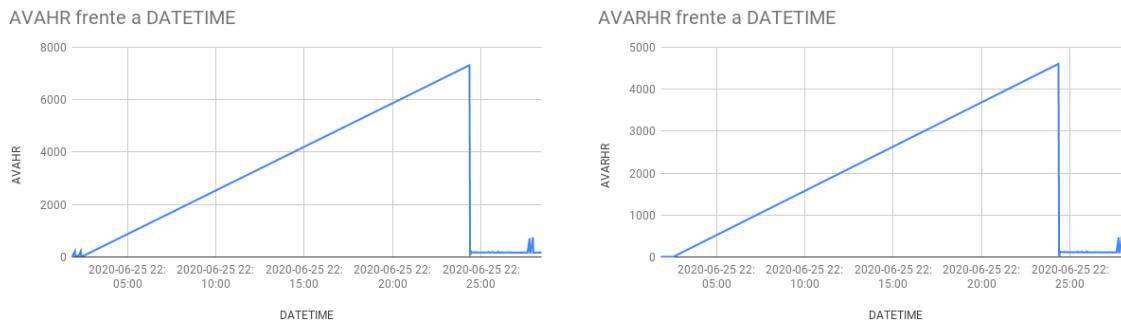


Figura 6-82.: Autor - AVAHR Y AVARHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

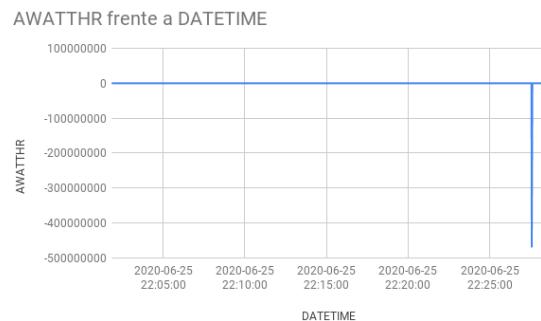


Figura 6-83.: Autor - AWATTHR VS DATETIME EN EL CICLO LLENADO

Análisis del ciclo de llenado

En este ciclo el consumo energético es mínimo, pero aun así se evidencia alto porcentaje de distorsión armónica presente en todo el ciclo. Asimismo, el factor de potencia se acerca mucho a 1, evidenciando un buen consumo energético en el ciclo. Los valores de energía también son más pequeños que los otros ciclos, igual siguen presentes los valores de distorsiones, aunque N y DH están en 0 en todo el ciclo.

En todos los ciclos se evidencia que existen armónicos en la señal, tanto de voltaje como de corriente. Estos armónicos tienen una presencia mayor en señales de voltaje, como lo demuestran los gráficos de THD. Las distorsiones en cada ciclo cambian dependiendo de la carga que tenga la lavadora. De igual forma, se evidencia que los cambios de velocidades en el motor generan muchos más armónicos en la señal, llegando a superar el 400 % en su valor. En el ciclo de llenado, a raíz que la corriente es muy pequeña, los datos que obtenemos no son tan precisos, ya que para obtener valores confiables con este medidor, el circuito debe consumir más de 1 A.

Con esta prueba, se obtuvo una caracterización más del medidor, la cual para un funcionamiento estable y preciso de la tarjeta, es necesario que las cargas consuman como mínimo 1 Amperio, sin embargo, debido a la alta frecuencia con la que el ADE7978 hace la medición, hay ocasiones en que los datos presentan un valor fuera del rango.

Completada la prueba monofásica, se procedió a realizar la prueba trifásica desbalanceada con el fin de tener cubierto todos los casos de medición que se planteó en este proyecto.

6.3. Tercer Prueba

Para esta prueba se utilizó una red trifásica doméstica y a cada fase se conectó a una carga. las tres cargas son tienen un consumo distinto para así probar y medir el caso trifásico desbalanceado.

A continuación se describe las cargas que se usaron:

- FASE A - 2 pantallas, 1 cpu, 2 portátiles y una Raspberry.
- FASE B - Caminadora eléctrica.
- FASE C - Lavadora Samsung.



Figura 6-84.: Autor - Cargas utilizadas en la tercera prueba

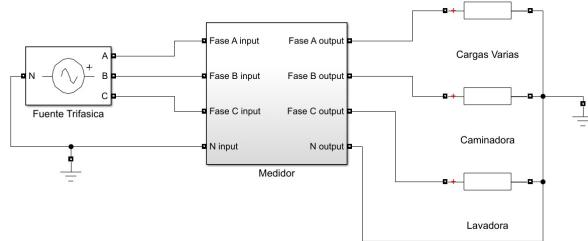


Figura 6-85.: Esquema de conexión utilizado en la tercera prueba (Esquema realizado en MATLAB)

6.3.1. Resultados de la prueba

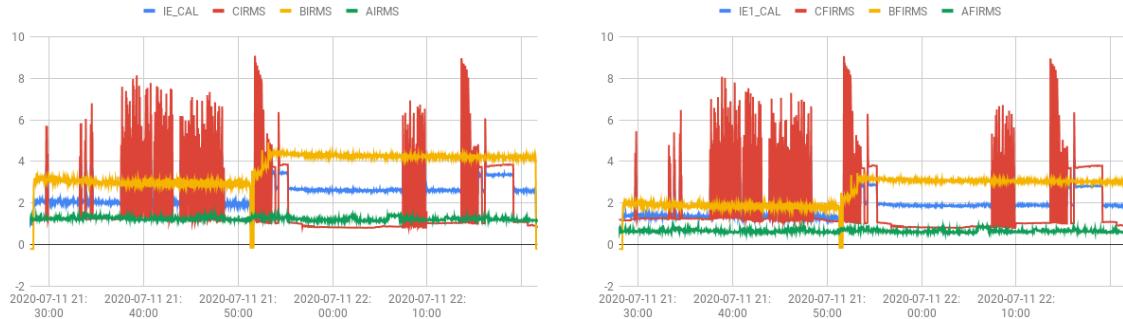


Figura 6-86.: Autor - CORRIENTE RMS Y CORRIENTE FUNDAMENTAL

Las variaciones que se ven en la señal CIRMS es debido a los distintos ciclos que tiene la lavadora mientras realizaba su ciclo de lavado.

La caminadora se le hizo una variación en la velocidad por lo cual se ve una subida en la gráfica de corriente BIRMS.

La carga en la fase A no tuvo ninguna variación durante la medición por lo cual la señal AIRMS es estable.

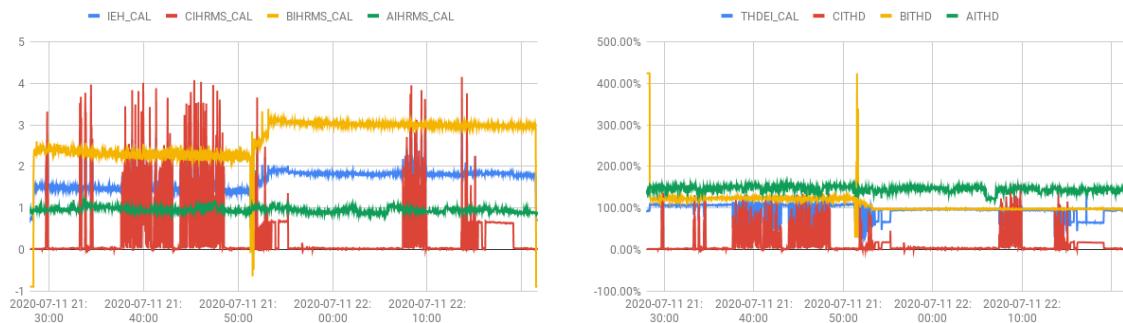


Figura 6-87.: Autor - CORRIENTE ARMÓNICA Y DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE

En la gráfica 6-89, se ve las distorsiones en corriente que presentan las cargas que en los medidores actuales no tienen en cuenta, sin embargo este medidor lo analiza al momento de medir.

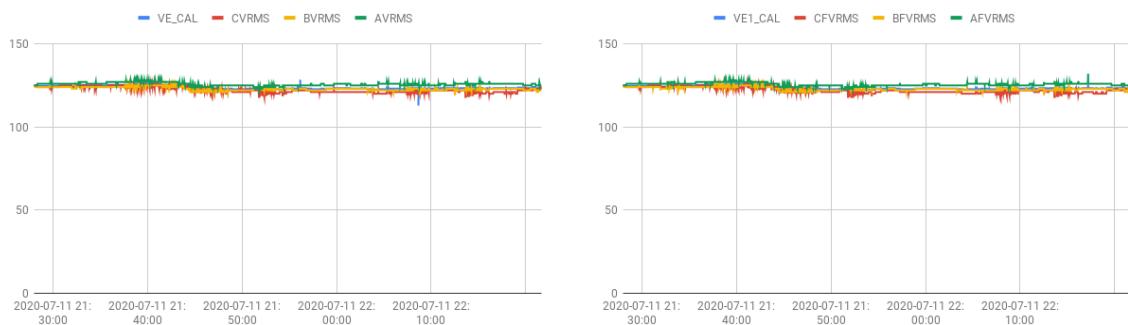


Figura 6-88.: Autor - VOLTAJE RMS Y VOLTAJE FUNDAMENTAL

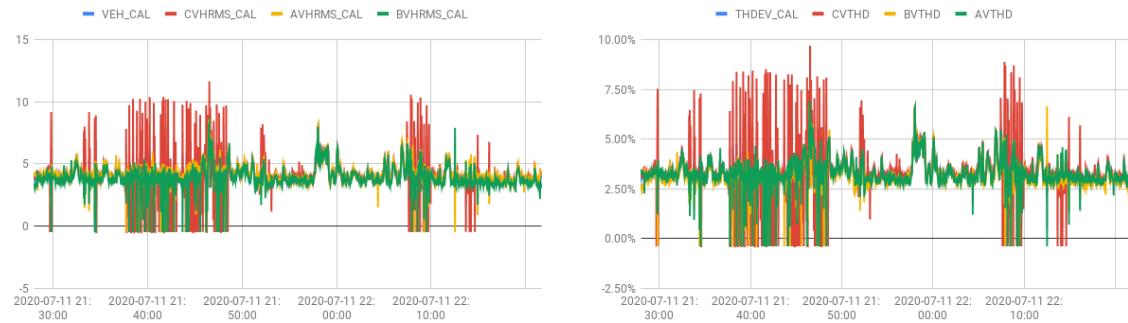


Figura 6-89.: Autor - VOLTAJE ARMÓNICA Y DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE

En la gráfica **6-89**, se ve las distorsiones en voltaje que presentan las cargas que en los medidores actuales no tienen en cuenta, sin embargo este medidor lo analiza al momento de medir.

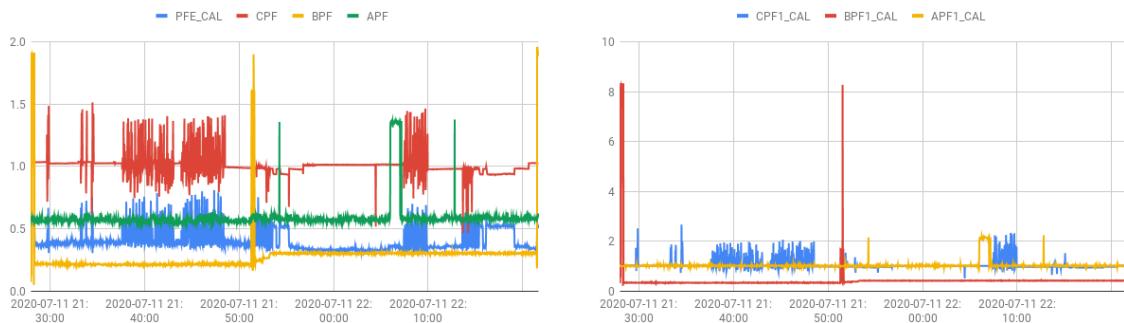


Figura 6-90.: Autor - FACTOR DE POTENCIA TOTAL Y FACTOR DE POTENCIA FUNDAMENTAL

En la gráfica **6-90**, se evidencia un error en la medición del factor de potencia ya que hay valores superiores a 1.

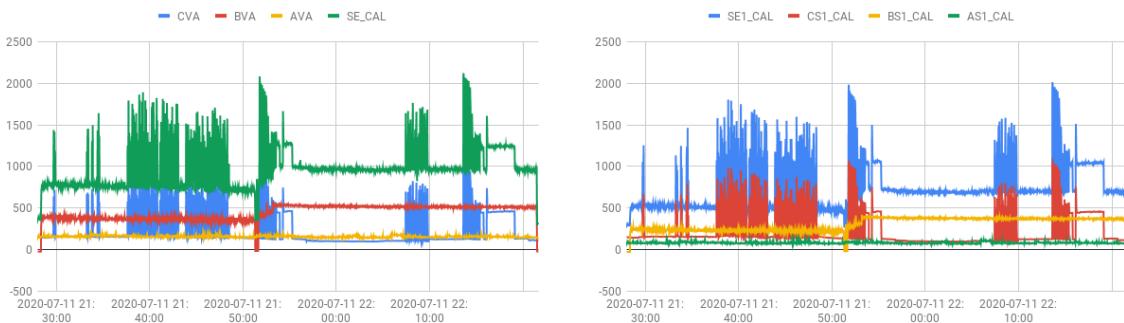


Figura 6-91.: Autor - POTENCIA APARENTE TOTAL Y POTENCIA APARENTE FUNDAMENTAL

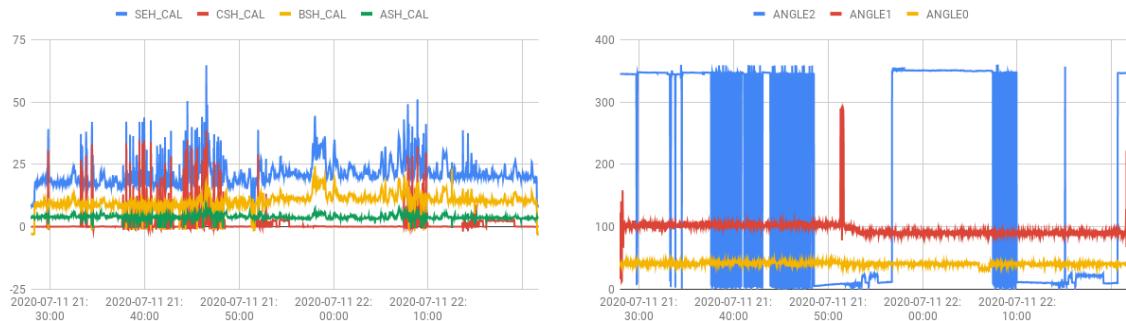


Figura 6-92.: Autor - POTENCIA APARENTE ARMÓNICA Y ÁNGULO DE DESFASE ENTRE FASES

En la gráfica de los ángulos de desfase, las etiquetas se interpretan de la siguiente manera:

- ANGLE 0 - ángulo de desfase entre la fase A y B.
- ANGLE 1 - ángulo de desfase entre la fase B y C.
- ANGLE 2 - ángulo de desfase entre la fase C y A.

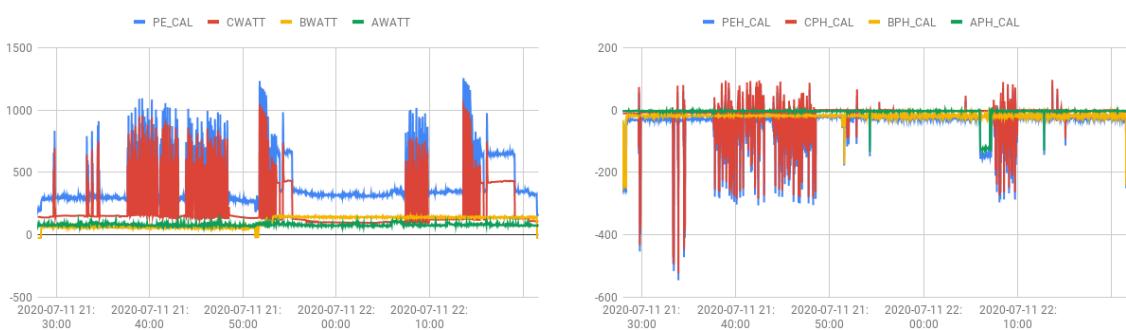


Figura 6-93.: Autor - POTENCIA ACTIVA TOTAL Y POTENCIA ACTIVA ARMÓNICA

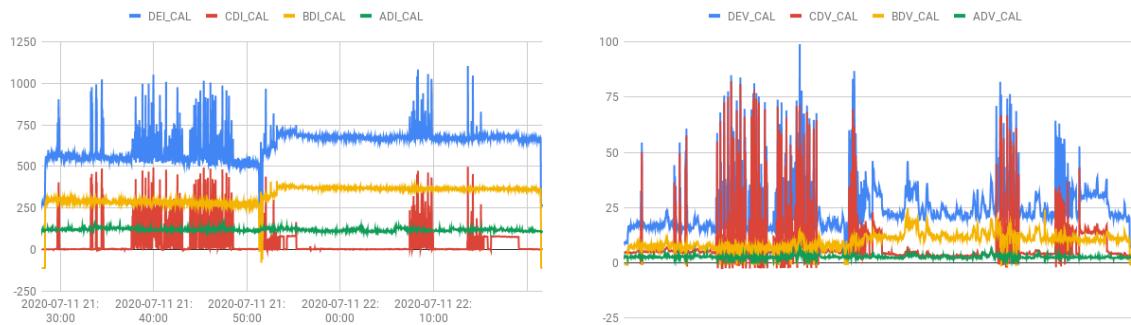


Figura 6-94.: Autor - DISTORSIÓN DE POTENCIA (VAR) EN CORRIENTE Y VOLTAJE

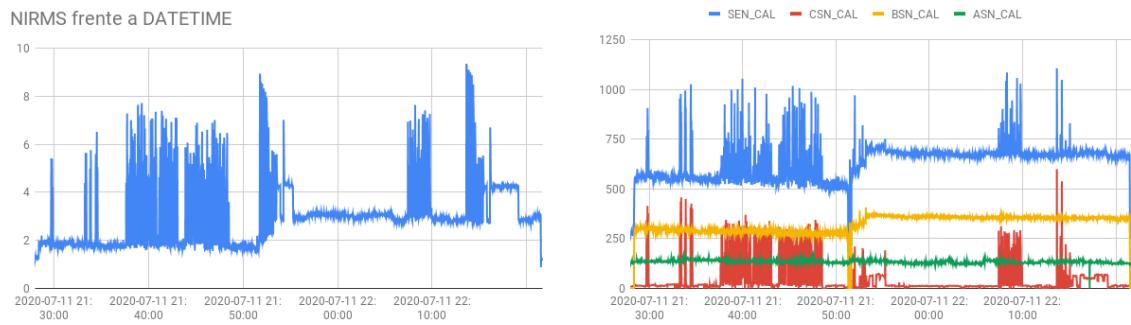


Figura 6-95.: Autor - CORRIENTE RMS EN NEUTRO Y POTENCIA (VAR) NO ACTIVA

En las gráficas de potencia, se analiza que el consumo de energía es acorde a la corriente que consume la carga.

7. Conclusiones

- El medidor de energía implementó la norma IEEE1459-2010 (1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions., n.d.), el cual permite medir cualquier tipo de carga monofásica y trifásica en cualquier condición.
- Se realizó un estudio de procesadores y se escogió uno que incluyera la funcionalidad de descomponer una señal en componentes de voltaje y corriente con el fin de ahorrar tiempo en la ejecución del proyecto. Sin embargo, el análisis de la señal se puede implementar con otro procesador y disminuir el costo del proyecto.
- Se creó un software que permita conectarse al procesador, generando un acceso a los valores de los componentes de la señal y con estos aplicar los procesos matemáticos de la norma IEEE1459-2010.
- Al implementar la norma IEEE1459-2010 en el medidor, se mejora la medición de energía. Además, por su conectividad con internet, abre una gran oportunidad para que sistemas de redes eléctricas inteligentes o fuentes de energía renovable y no renovables, puedan utilizar este sistema de medición.
- Al medir el bombillo en la primera prueba, el medidor presentó un alto porcentaje de error en su medición, por lo tanto se optó por realizar pruebas con cargas que consuman más de 1 A. De esta manera, el medidor funcionó de manera optima y se concluye que el rango de medición del medidor es de 1 A a 15 A.
- El medidor se diseñó con la shunt propuesta debido a que fue la mas adsequible en el momento, sin embargo, la ventaja de este medidor es que se puede adaptar a cualquier tamaño de medición tan solo cambiando la resistencia shunt y asegurando un voltaje de entrada en la dsp de +- 31.25mV haciendo el dispositivo muy versatil para implementar en cualquier sector.
- El ade-7978 no realiza el análisis de estandar IEEE14-59-2010 (1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions., n.d.), sin embargo, entrega los datos necesarios para realizar el tratamiento de datos a travez de un procesador de datos y así cumplir con el estandar.
- Se optó por usar el lenguaje de programación c++ ya que es un lenguaje de programación de nivel intermedio, permite acceder mejor a los registros y hacer un mejor uso de la memoria en el procesador. En el desarrollo de la página web, se usó angular ya que

este cuenta con el lenguaje Typescript y nos permite tipar los datos con el fin de tener un sistema robusto.

- La frecuencia con la que el ADE 7978 adquiere los datos es muy alta y no contamos con un analizador de datos que tenga la misma frecuencia de muestreo y a su vez tenga un chip con conectividad a internet; esto, más el hecho que el medidor soporta IoT (internet de las cosas), hizo más complejo la arquitectura del software y el sistema a veces presenta fallas en su medición.
- Debido a que se terminó el desarrollo del medidor en una época de pandemia mundial por el COVID-19, no fue posible realizar una comparación de mediciones con el AEMC 45b y el circutor, sin embargo se creó un banco de datos y pruebas, el cuál tiene todas las mediciones que se tomaron; posteriormente este banco permite a futuro realizar una comparación con los medidores de referencia propuestos.
- Durante el desarrollo del proyecto, se evidenció que la planeación que se hizo en el anteproyecto estuvo mal diseñada ya que se tuvieron inconvenientes como el de escoger el dispositivo correcto que cumpliera con la norma IEEE 1459, tiempo de compra y respuesta por parte del FODEIN para la financiación del proyecto, el lenguaje de programación, protocolo de comunicación y representación de los datos del dispositivo. Por lo tanto, los inconvenientes ya mencionados impactaron en el tiempo de entrega del proyecto y en su complejidad. El objetivo principal es emplear la norma IEEE 1459 en un medidor de energía, sin embargo, la arquitectura de hardware y software paso a ser más compleja debido a que los datos se mostraron por medio de una página web en donde se tuvieron que analizar factores como, velocidad de ejecución, tiempo de respuesta en envío y lectura de datos y comunicación de dispositivos entre otros. Acorde a todo lo que no se tuvo en cuenta en la planeación, se llegó a la conclusión que este proyecto de grado cumple con todos los requerimientos que una tesis de pregrado y postgrado a su vez requieren.

8. Trabajo Futuro

Como continuación de este proyecto de grado y como en cualquier otro proyecto de investigación, se extienden distintas líneas de investigación que quedan abiertas y en las que es posible continuar trabajando. Durante la ejecución de este proyecto, se han encontrado algunas mejoras futuras que se han dejado abiertas; alguna de ellas, están relacionadas con este trabajo de tesis y son las interrogantes que se han ido generando mediante la ejecución del proyecto. Otras son más globales, sin embargo no son objeto de este proyecto de grado; estas mejoras o líneas de investigación pueden servir para retomarlas posteriormente o como opción para otros investigadores de realizar un proyecto de grado a partir de este.

A continuación se listan algunos trabajos futuros que se pueden realizar apartir de los resultados de esta investigación o que, por enfocarnos en otros alcances distintos a los objetivos principales, no han podido ser aplicados con la suficiente profundidad. Igualmente, se recomienda algunos desarrollos específicos para apoyar y mejorar el medidor y la metodología propuestos.

Entre los posibles trabajos futuros se sobresalen los siguientes:

- Realizar una investigación y busqueda de un micro procesador que permita obtener los datos de la dsp a medida que esta va refrescando sus lecturas con el fin de tener la representación de la señal sinusoidal de voltaje y corriente.
- Crear una aplicación móvil en donde los usuarios puedan ver el consumo de energía de una manera más rápida en vez de ingresar a la página web.
- Mejorar la arquitectura actual a una donde muchos clientes puedan usar este sistema de medición y este pueda responder de manera optima.
- Implementar un respaldo de datos localmente en dado caso que el internet falle y este pueda ser sincronizado a la base de datos en la nube, una vez se restaure el internet.

Bibliografía

- [1] A. J. Berrisford. The harmonic impact project — ieee-1459 power definitions trialed in revenue meters. In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pages 1–5, 2018.
- [2] SMART ENERGY INTERNATIONAL. The history of the electricity meter. url <https://www.smart-energy.com/features-analysis/the-history-of-the-electricity-meter/>, 2016.
- [3] RYMETL. Monofásico bifilar -1f2h. url <http://www.rymel.com.co/index.php/medidores-de-energia-tipo-electronico/monofasico-bifilar-1f2h>.
- [4] RYMETL. Monofásico trifilar - 1f3h. url <http://www.rymel.com.co/index.php/medidores-de-energia-tipo-electronico/monofasico-trifilar-1f3h>.
- [5] RYMETL. Trifásico tetrafilar - 3f4h-lcd. url <http://www.rymel.com.co/index.php/medidores-de-energia-tipo-electronico/trifasico-tetrafilar-3f4h>.
- [6] RYMETL. Bifásico trifilar - 2f3h-lcd. url <http://www.rymel.com.co/index.php/medidores-de-energia-tipo-electronico/trifasico-tetrafilar-2f3h-lcd>.
- [7] Iskra MIS. Iskra mis - gama de productos. url <https://www.nalelectricos.com.co/archivos//ISKRA.pdf>.
- [8] ILC. Ilcfolletofinal. url <http://www.skaiteksamerica.com/eng/catalogue2016.pdf>, 2016.
- [9] CIDET Certificacion. Certificado de conformidad de producto. url https://electroservimos.co/Certificados/Retie/Medidores_energia_activa_Clase_1_Inelca.pdf.
- [10] SENSUS. Aclara i-210+c™ electricity meter. url <https://sensus.com/products/aclara-i-210c/>.
- [11] SMART METERS. Technical information. url <https://www.smartme.co.uk/technical.html>.
- [12] Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions - redline. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) - Redline*, pages 1–52, 2010.

- [13] Ned Mohan. *Electric drives*. MNPERE, 2003.
- [14] ICONTEC Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Electrotecnia. tensiones y frecuencias nominales en sistemas de energía elÉctrica en redes de servicio pÚblico. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 3:1–5, 2013.
- [15] Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pages 1–29, 2014.
- [16] IBM Research. Software development. url <https://www.ibm.com/topics/software-development>, 2019.
- [17] Margaret Rouse. object-oriented programming (oop). url <https://searchapparchitecture.techtarget.com/definition/object-oriented-programming-OOP>, 2020.
- [18] P. Christensson. Web development. url <https://techterms.com>, 2013.
- [19] Alex Rodriguez. Restful wev services: The basics. *IBM developeWorks*, 2008.
- [20] pjbevel@gmail.com. the fourier trabsform. <http://www.thefouriertransform.com>, 2010.
- [21] José García Fernández. El teorema de muestreo y sus aplicaciones. *UNIVERSIDAD DE SEVILLA*, 2010.
- [22] Ana Lucía Schmidt. Fft: Transformada rápida de fourier. *Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, Argentina*, 2013.
- [23] Gonzalo Salgueiro David Hanes. *IoT Fundamentals: NEtworking Technologies, Protocols, and Use Cases for he Internet of Things*. CISCO, 2017.
- [24] Raspberry Pi. Datasheet raspberry pi 4 model b. *Raspberry Pi*, 2019.
- [25] Texas Instruments. Evm430-f6779 - 3 phase electronic watt-hour evm for metering. url <https://www.ti.com/tool/EVM430-F6779>.
- [26] Analog Devices. Eval-ade7978. url <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ade7978.html>.
- [27] Teridian Smart Grid solutions. 78m6631 evaluation board user manual. url <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5263.pdf>.
- [28] Analog Devices. Eval-ade7978ebz user guide ug-572. *Analog Devices*, 1:1–20, 2013.

-
- [29] Analog Devices. Isolated energy metering chipset for polyphase shunt meters. *Analog Devices*, 1:1–125, 2013.
 - [30] Mike McCauley. C library for broadcom bcm 2835 as used in raspberry pi. <https://www.airspayce.com/mikem/bcm2835/>, 2020.
 - [31] German Sanchez Kevin Carrillo. Rasberry pi con ade 7978. <https://github.com/kevinfofcc26/C-ADE7978>, 2020.
 - [32] OpenJS Fundation. Node js. url <https://nodejs.org/es/>.
 - [33] German Sanchez Kevin Carrillo. Medidor de energía trifasico. url <https://ade7978.herokuapp.com/>.
 - [34] V Vera. Eolicat. url <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1875/4/03>, 2012.
 - [35] M. Youhannaei, M. E. Honarmand, S. Ouni, R. Mehri, H. Mokhtari, and J. Talebi. Performance evaluation of energy meters in nonsinusoidal environment based on ieee 1459 standard. In *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, pages 1–4, 2013.
 - [36] Diego Tibaduiza Edwin Forero, Carlos Torres. Energy efficiency analysis in static converters using ieee 1459. url <http://prec.pr/symposium/2014/pdfs/feb20-pm/Forero-Torres-Tibaduiza.pdf>, 2014.
 - [37] RED LATINOAMERICANA DE ENERGÍA SOSTENIBLE-ENERSOS UNIVERSIDAD SANTO TOMAS UNIVERSIDAD EL BOSQUE ACAIRE ICONTEC UNIVERSIDAD DEL VALLE CAPÍTULO ASHRAE COLOMBIA. Congreso de desarrollo sostenible. url <http://prec.pr/symposium/2014/pdfs/feb20-pm/Forero-Torres-Tibaduiza.pdf>, 2020.

A. Anexo: Certificación de software de la raspberry

CERTIFICACIÓN DE SOFTWARE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

NIT. 860012357-6

CERTIFICA:

Una vez verificados los requerimientos de existencia y calidad de la tipología "Software" del Modelo de Medición de Grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico o de Innovación y del reconocimiento de investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colciencias. El siguiente producto cumple con todos los requerimientos exigidos:

Datos Software	
Tipo	Entidad productora (X) Proyecto Colciencias ()
Título del producto o proceso:	Aplicación de escritorio para lectura de datos del ADE 7978 con protocolo de comunicación I2C
Fecha de registro	
Número del registro aprobado por la Dirección Nacional de los Derechos de Autor:	
Descripción del análisis:	El software fue diseñado para adquirir datos del ADE 7978, creando una solución hecha en C++ y únicamente puede ser ejecutada en sistemas Linux basados en Raspbian
Diseño:	Se plantea el diseño de un software que permita la lectura de registros entregados por el ADE 7978 con el protocolo de comunicación I2C. Se realiza el tratamiento de datos a los registros entregados por el ADE 7978 aplicando en el STD IEEE1459-2010 en dichos registros. Finalmente, esta información se guarda en una Base de datos en MySQL server. Este programa se ejecuta a través de un bash, llamando al archivo ejecutable i2c

A Anexo: Certificación de software de la raspberry

	Este programa se ejecuta y queda escuchando todos los cambios que ocurrán en la tarjeta hasta que se cancele el programa								
Implementación:	El software fue implementado utilizando el lenguaje de programación de bajo nivel C++, utilizando librerías externas y de código abierto mysql.h y bcm2835.h								
Validación	El sistema es validado con el funcionamiento completo del prototipo del medidor, el sistema es estable y continuo.								
Datos investigador (es)									
Proyecto de investigación)	Diseño e implementación de un medidor de energía trifásico								
Investigador principal o gestor	Kevin Fabian Carrillo Carrillo, German Andrés Sánchez Motta								
Investigador (es)	<table><thead><tr><th>Nombre</th><th>Identificación</th></tr></thead><tbody><tr><td>Kevin Fabian Carrillo Carrillo</td><td>1074134831</td></tr><tr><td>German Andrés Sánchez Motta</td><td>1026589195</td></tr><tr><td>Edwin Francisco Forero García</td><td>91490251</td></tr></tbody></table>	Nombre	Identificación	Kevin Fabian Carrillo Carrillo	1074134831	German Andrés Sánchez Motta	1026589195	Edwin Francisco Forero García	91490251
Nombre	Identificación								
Kevin Fabian Carrillo Carrillo	1074134831								
German Andrés Sánchez Motta	1026589195								
Edwin Francisco Forero García	91490251								
Grupo(s) de investigación	Grupo de investigación MEM (Modelado Electrónica y Monitoreo)								
Código GrupLAC									

□

Esta certificación se expide a solicitud del (los) interesado (s) el 5 de octubre del 2020 por el representante legal.

Atentamente,

Firma

Nombre

Cargo

Dirección

Teléfono

Figura A-1.: Certificación de software raspberry

B. Anexo: Certificación de software del servicio web(API)

CERTIFICACIÓN DE SOFTWARE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
NIT. 860012357-6

CERTIFICA:

Una vez verificados los requerimientos de existencia y calidad de la tipología "Software" del Modelo de Medición de Grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico o de Innovación y del reconocimiento de investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colciencias. El siguiente producto cumple con todos los requerimientos exigidos:

Datos Software	
Tipo	Entidad productora (X) Proyecto Colciencias ()
Título del producto o proceso:	API de consumo para obtener los valores del ADE 7978
Fecha de registro	
Número del registro aprobado por la Dirección Nacional de los Derechos de Autor:	
Descripción del análisis:	Se plantea el diseño de un servicio web que permita descargar la información de los registros del ADE 7978
Diseño:	El software fue diseñado para consultar la base de datos donde están almacenados los registros del ADE 7978 y exponerlos públicamente a través de un servicio
Implementación:	El servicio web fue implementado utilizando el lenguaje de programación JavaScript a través del framework node.js y utilizando la librería de npm MySql. Este servicio va a estar alojado en un servidor en la nube y se estará ejecutando a cada instante

B Anexo: Certificación de software del servicio web(API)

Validación	El sistema es validado con el funcionamiento completo del prototipo del medidor, el sistema es estable y continuo.	
Datos investigador (es)		
Proyecto de investigación)	Diseño e implementación de un medidor de energía trifásico	
Investigador principal o gestor	Kevin Fabian Carrillo Carrillo, German Andrés Sánchez Motta	
Investigador (es)	Nombre	Identificación
	Kevin Fabian Carrillo Carrillo	1074134831
	German Andrés Sánchez Motta	1026589195
	Edwin Francisco Forero García	91490251
Grupo(s) de investigación	Grupo de investigación MEM (Modelado Electrónica y Monitoreo)	
Código GrupLAC		

Esta certificación se expide a solicitud del (los) interesado (s) el 5 de octubre del 2020 por el representante legal.

Atentamente,

Firma

Nombre

Cargo

Dirección

Teléfono

Figura B-1.: Certificación de software del servicio web

C. Anexo: Certificación de software de la página web

CERTIFICACIÓN DE SOFTWARE

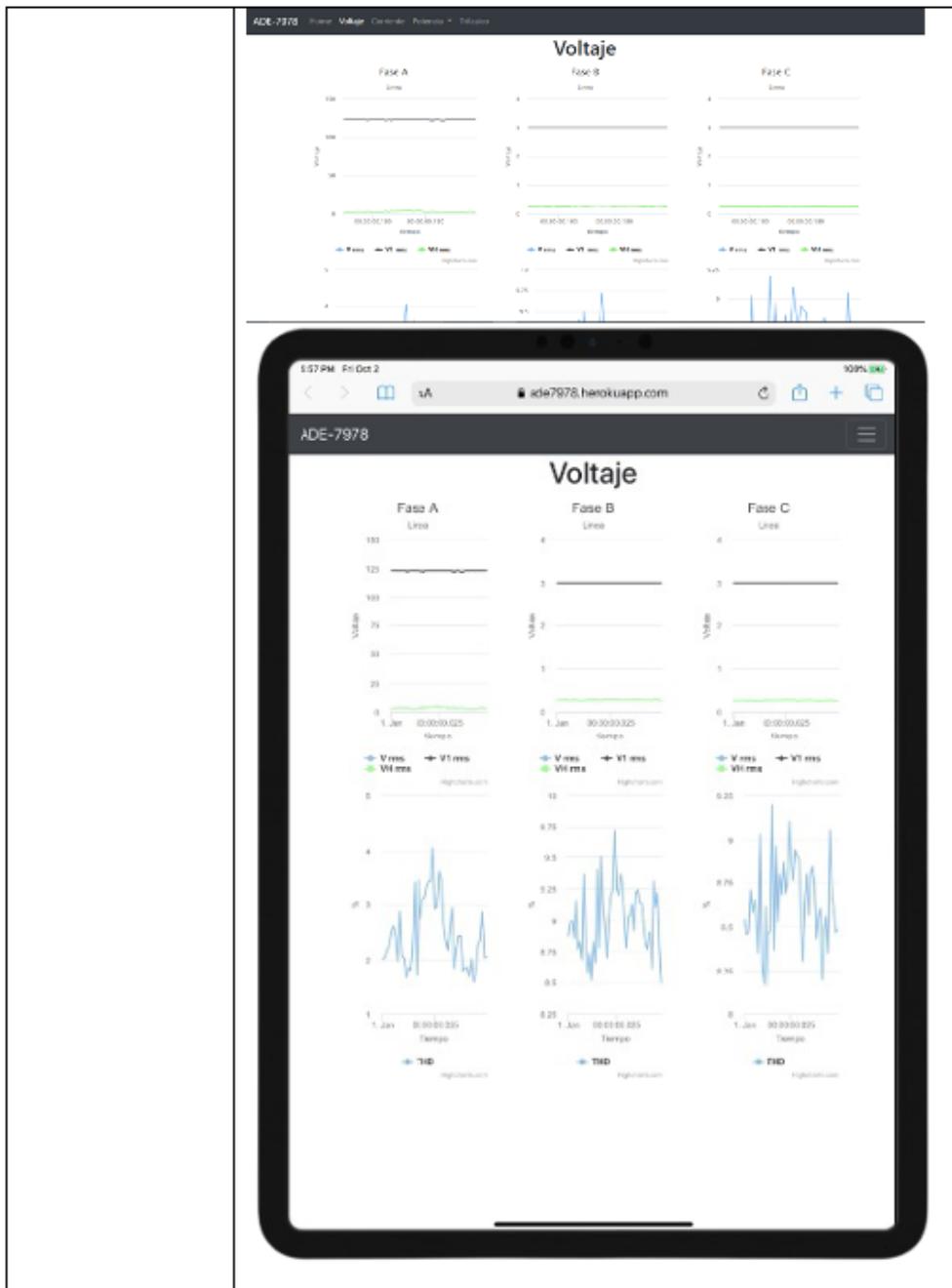
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
NIT. 860012357-6

CERTIFICA:

Una vez verificados los requerimientos de existencia y calidad de la tipología "Software" del Modelo de Medición de Grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico o de Innovación y del reconocimiento de investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colciencias. El siguiente producto cumple con todos los requerimientos exigidos:

Datos Software	
Tipo	Entidad productora (X) Proyecto Colciencias ()
Título del producto o proceso:	Página web de mediciones energéticas ADE 7978
Fecha de registro	
Número del registro aprobado por la Dirección Nacional de los Derechos de Autor:	
Descripción del análisis:	Se plantea el diseño de una página web responsive donde puedan ser visualizados los valores en tiempo real de un medidor de energía.
Diseño:	El software fue diseñado para mostrar los valores de voltaje, corriente y potencias que son consumidos a través de una API
Implementación:	La página web se implementa utilizando el framework JavaScript Angular (10.0.5) donde se consume la API de los datos a mostrar y estos datos se visualizan en gráficas que se van refrescando cada segundo con los valores nuevos

C Anexo: Certificación de software de la página web



									
Validación	El sistema es validado con el funcionamiento completo del prototipo del medidor, el sistema es estable y continuo.								
Datos investigador (es)									
Proyecto de investigación)	Diseño e implementación de un medidor de energía trifásico								
Investigador principal o gestor	Kevin Fabian Carrillo Carrillo, German Andrés Sánchez Motta								
Investigador (es)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Nombre</th><th style="text-align: center;">Identificación</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Kevin Fabian Carrillo Carrillo</td><td>1074134831</td></tr> <tr> <td>German Andrés Sánchez Motta</td><td>1026589195</td></tr> <tr> <td>Edwin Francisco Forero García</td><td>91490251</td></tr> </tbody> </table>	Nombre	Identificación	Kevin Fabian Carrillo Carrillo	1074134831	German Andrés Sánchez Motta	1026589195	Edwin Francisco Forero García	91490251
Nombre	Identificación								
Kevin Fabian Carrillo Carrillo	1074134831								
German Andrés Sánchez Motta	1026589195								
Edwin Francisco Forero García	91490251								
Grupo(s) de investigación	Grupo de investigación MEM (Modelado Electrónica y Monitoreo								
Código GrupLAC									

Esta certificación se expide a solicitud del (los) interesado (s) el 5 de octubre del 2020 por el representante legal.

Atentamente,

Firma

Nombre

Cargo

Dirección

Teléfono

Figura C-1.: Certificación de software de la página web