



**Sistema para el balanceo dinámico de cargas para el servicio de
ayudas visuales de los aeropuertos ASA**

Modalidad:
Proyecto Tecnológico.
Trimestre: 21-I

Presentado por:

José David Maya Marcial
2153001204
jd_maya17@hotmail.com

Asesor:

Fernando Toledo Toledo
Profesor-investigador
Ciencias Básicas e Ingeniería
ftoledo2@azc.uam.mx

Asesor:

Roberto Alfonso Alcántara Ramírez
Profesor-investigador
Ciencias Básicas e Ingeniería
raar@azc.uam.mx

Coordinador de Ingeniería Eléctrica:

Dr. Eusebio Guzmán Serrano
Profesor Titular T. C.
gse@azc.uam.mx
Departamento de Energía

Fecha: 23/07/2021

DECLARATORIA

Yo, Fernando Toledo Toledo, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco:

Firma_____

Dr. Fernando Toledo Toledo.

Yo, Roberto Alfonso Alcántara Ramírez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco:

Firma_____

M. en C. Roberto Alfonso Alcántara Ramírez.

Yo, José David Maya Marcial, doy mi autorización a la coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Firma_____

José David Maya Marcial.

RESUMEN:

El siguiente Proyecto de Integración recaba información teórica y práctica para idear una metodología que resuelva el bajo factor de potencia (atrasado) y el desbalance entre fases que tienen los servicios auxiliares de los aeropuertos ASA.

Se determinó las causas que originan el bajo de factor de potencia(atrasado) y el desbalance entre fases que existe en los tableros de distribución de los servicios auxiliares de los aeropuertos ASA. Además de las consecuencias económicas que estos problemas atraen y él porque es importante darles una solución.

Mediante el estudio de calidad de energía realizado por la empresa “SmartPQ” que el ingeniero Sergio Martínez amablemente proporciono; se analizó el aeropuerto de la ciudad de Ixtepec, Oaxaca, obteniendo información relevante como la corriente eficaz por fase, voltaje entre fases, potencia activa y reactiva promediada. También el promedio del factor de potencia.

Con la información recabada del aeropuerto, se separó en escenarios de cinco minutos y se calculó la potencia activa, reactiva, aparente por fase. Gracias a esto se programó en la plataforma fortran un modelo matemático que corrija el factor de potencia atrasado a un valor cercano a la unidad por medio de capacitores en paralelo en la línea y una vez teniendo el factor de potencia modificado, balancear las fases por medio de resistores en paralelo.

Con una breve introducción se explicó el prototipo hecho por resistencias de baja potencia, toroides, relevadores, sensor de corriente, sensor de voltaje e interruptores que en conjunto recrea dos escenarios de factores de potencia en atraso de 0.88 y 0.93. Por medio de capacitores disminuyendo el consumo de potencia reactiva a un valor cercano al cero que sería el mejor de los casos.

Para finalizar, con ayuda de un microcontrolador de lenguaje abierto llamado Arduino monitoreamos la onda de corriente y voltaje para obtener el tiempo de desfaseamiento entre ellas obteniendo el factor de potencia que genera el circuito de baja potencia propuesto. Con cargas capacitivas conectadas en paralelo mediante relevadores logramos aumentar el factor de potencia a un valor de uno

ÍNDICE:

INTRODUCCIÓN.....	6
ANTECEDENTES	7
JUSTIFICACIÓN	10
OBJETIVOS.....	15
<i>Objetivo general.....</i>	<i>15</i>
<i>Objetivos particulares:</i>	<i>15</i>
MARCO TEÓRICO.....	16
<i>Potencia instantánea.</i>	<i>16</i>
<i>Potencia debida a la excitación senoidal.....</i>	<i>16</i>
<i>Valor eficaz de una forma de onda periódica.</i>	<i>17</i>
<i>Valor eficaz (RMS) de una forma de onda senoidal.....</i>	<i>18</i>
<i>Potencia Activa</i>	<i>19</i>
<i>Potencia Aparente.....</i>	<i>20</i>
<i>Factor de Potencia.....</i>	<i>21</i>
<i>Potencia Reactiva.....</i>	<i>21</i>
<i>Potencia Compleja</i>	<i>22</i>
<i>Corrección de factor de potencia</i>	<i>24</i>
<i>Balance de fases.....</i>	<i>27</i>
<i>Elementos pasivos y tipos de cargas de un sistema eléctrico</i>	<i>28</i>
<i>Resistores.....</i>	<i>28</i>
<i>Carga Resistiva.....</i>	<i>29</i>
<i>Capacitores:</i>	<i>29</i>
<i>Carga Capacitiva</i>	<i>31</i>
<i>Inductores.....</i>	<i>31</i>
<i>Carga Inductiva.....</i>	<i>33</i>
MONITOREO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS PARA UN AEROPUERTO.....	34
<i>Corrección del factor de Potencia y cálculo de capacitores.....</i>	<i>39</i>
<i>Balance de cargas.....</i>	<i>42</i>
PROTOTIPO:.....	47
<i>Arduino:.....</i>	<i>47</i>
<i>Entradas y salidas digitales</i>	<i>48</i>

Entradas analógicas:.....	48
Memorias de la placa Arduino:	48
<i>Software de Arduino:</i>	48
<i>Diseño del prototipo:</i>	50
Material y Equipo.....	50
Transformador:	51
<i>Protoboard:</i>	51
<i>Relevador:</i>	52
<i>Switch o interruptor:</i>	53
<i>Sensor de corriente:</i>	53
<i>Pantalla oled:</i>	54
<i>Construcción del amperímetro.</i>	54
<i>Construcción del voltímetro.</i>	62
<i>Obtención del factor de potencia.</i>	67
<i>Corrección del factor de potencia.</i>	72
CONCLUSIONES.	75
REFERENCIAS DOCUMENTALES	76
APÉNDICE 1.	77
APÉNDICE 2:	81
APÉNDICE 3:	85
APÉNDICE 4:	87

INTRODUCCIÓN.

Una de las problemáticas que tiene el servicio de ayudas visuales de los aeropuertos ASA es un desbalance significativo entre las fases de los tableros de distribución del alumbrado de la zona pista puesto que la iluminación depende de múltiples factores como la hora del día, día de la semana, clima y estación del año pues al ser un aeropuerto las luces de señalización deben ser visibles para los pilotos. Esto conlleva a que el sector de la zona de las pistas demande más corriente por periodos que en otros lugares como los superpostes, oficinas u otras partes donde la demanda de corriente es constante.

Para lograr un balance correcto es necesario cumplir con ciertos parámetros. Uno de ellos es tener un factor de potencia cercano a la unidad porque el balance sería de una manera más eficaz sin tener demasiado consumo de potencia reactiva pues esto atrae problemas como pérdidas en los conductores y mayor consumo de corriente.

Identificando las problemáticas que tienen estos aeropuertos se desarrolló un algoritmo que corrija el factor de potencia atrasado de una carga por medio de capacitores variables y corregir el desbalance que sufre entre la fase de la más grande con alguna de las otras fases de menor consumo de corriente esto deberá ser exclusivamente si se cumple el primer parámetro. El desbalance se arreglará conectándole módulos de resistencias en paralelo compensando la demanda de corriente eléctrica en las cargas.

Para demostrar que el algoritmo es funcional se diseñó un prototipo simulando una carga mayoritariamente inductiva con dos escenarios con diferentes factores de potencia y con ayuda de un microcontrolador que utiliza una plataforma de lenguaje abierto se corregirá el bajo factor de potencia inyectándole reactivos por medio de capacitores electrolíticos.

Para hacer la simulación del prototipo a escala fue necesario realizar algunos cálculos que se implementaron en la práctica. Para lograrlo fue necesario conocer la teoría que arroja este tipo de estudios y como saber aplicar las fórmulas de cálculo de potencia activa, aparente y reactiva. Los diferentes tipos de métodos de obtención del factor de potencia que se describirá más a detalle en el apartado de desarrollo teórico de este reporte.

ANTECEDENTES

En la fecha de 8 de abril de 2016, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) emite la reglamentación Código de Red (CR), con la finalidad de establecer un proceso donde los criterios técnicos permitan y promuevan que el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) sea desarrollado, mantenido, operado y modernizado de una forma eficiente, coordinada y de forma económica.

En el capítulo 2 de la resolución 151 de 2016, se describe la finalidad de estas disposiciones, los cuales son definir los criterios técnicos de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad conforme a la normativa vigente. Esto con la finalidad de asegurar la integridad del SEN, maximizar el tiempo en los que se encuentra en el Estado Operativo Normal y minimizando los riesgos en daño a los equipos que conforman cuando el SEN salga de esta condición, considerando la seguridad del personal operativo de los integrantes del sector industrial.

Dentro de los criterios de operación en disposiciones generales, se encuentra la Calidad de la Energía, en el cual se expresa el punto de Centros de Carga donde se presenta dos criterios de operación:

- El funcionamiento y operación de los equipos de los centros de carga no deben causar disturbios en la red de distribución, que rebasen los límites establecidos en el manual regulatorio de requerimientos técnicos para la conexión de Centros de Carga respecto a los niveles armónicos, variaciones periódicas de amplitud de la tensión (parpadeo), variaciones de tensión y desbalanceo de corrientes.
- Todos los centros de carga a conectarse en media y alta tensión deben de cumplir con los límites especificados de distorsión armónica en corrientes, variaciones periódicas de amplitud de la tensión y desbalanceo de corriente de conformidad con el apartado de calidad de energía del manual de regulatorio de requerimientos técnicos para la conexión de centros de carga.

La correcta distribución de las cargas (monofásicas y bifásicas) influye en el valor de algunos parámetros determinados en el diseño de las instalaciones eléctricas. En un desbalanceo, se provoca el desequilibrio en las intensidades de fase, lo que influye en la potencia transferida del transformador instalado o a instalar y de la sección de los conductores necesarios.

El error común al calcular una instalación desequilibrada utilizando expresiones para cargas equilibradas depende del grado de inestabilidad de la misma instalación. Por lo que es importante determinar conjuntamente, el comportamiento de la instalación cuando opera desequilibradamente y los factores que influyen en la operación en dicho estado.

El código de red define los criterios técnicos requeridos por los Centros de Carga conectados en Media y Alta Tensión para lograr la Conexión con el SEN, y que permitan asegurar la eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad, y sustentabilidad del Suministro Eléctrico en el SEN.

El código de red establece lineamientos para el caso de desbalance de fases que se deben cumplir. Un resumen se muestra en la tabla número 1.

Tabla 1: Niveles de tensión en estado operativo y su tolerancia.

Estado operativo normal			
Tensión nominal(KV)	Tipo de sistema	Tensión máxima de operación (KV)	Tensión mínima de operación(KV)
400	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
230	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
161	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
138	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
115	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
85	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
69	3 fases 3 hilos	+5%	-5%
34.4	3 fases 3 o 4 hilos	+5%	-7%
23	3 fases 3 o 4 hilos	+5%	-7%
13.8	3 fases 3 o 4 hilos	+5%	-7%

Potencia por fase

La potencia compleja que absorbe una carga conectada a un sistema trifásico a cuatro hilos, figura 1, se puede determinar sumando las potencias complejas de cada fase.

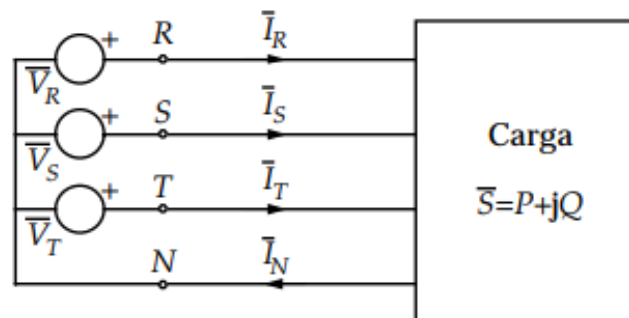


Figura 1: Sistema trifásico a 4 hilos.

$$\begin{aligned}\bar{S} &= \bar{S}_R + \bar{S}_S + \bar{S}_T = (\bar{P}_R + j\bar{Q}_R) + (\bar{P}_S + j\bar{Q}_S) + (\bar{P}_T + j\bar{Q}_T) = \\ &(\bar{P}_R + \bar{P}_S + \bar{P}_T) + j(\bar{Q}_R + \bar{Q}_S + \bar{Q}_T) = P + jQ\end{aligned}$$

Donde:

S, P y Q Son la potencia compleja, activa y reactiva absorbida por la carga.

$S_{R,S,T}, P_{R,S,T}, Q_{R,S,T}$ Son la potencia por fase.

Las potencias activas y reactivas por fase se obtienen por la realización de la suma de las potencias monofásicas conectadas entre cada fase y neutro. También se pueden medir, mediante un analizador de redes conectado como se muestra en la figura 2.

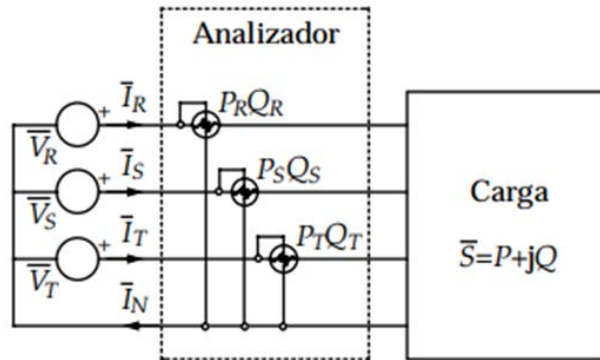


Figura 2: Medida de las potencias por fase mediante un analizador.

Las potencias aparentes por fase se calculan a partir de las potencias activas y reactivas por fase de la siguiente forma:

$$S_R = \sqrt{P_R^2 + Q_R^2}, \quad S_S = \sqrt{P_S^2 + Q_S^2}, \quad S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

Con las potencias activas y reactivas, es inmediato el cálculo de las corrientes de fase:

$$\bar{I}_R = \frac{P_R - j Q_R}{V}, \quad \bar{I}_S = \frac{P_S - j Q_S}{V / -120^\circ}, \quad \bar{I}_T = \frac{P_T - j Q_T}{V / -120^\circ}$$

La corriente a través del neutro es:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T$$

Por lo tanto, los valores eficaces de las corrientes son:

$$I_R = \frac{S_R}{V}, \quad I_S = \frac{S_S}{V}, \quad I_T = \frac{S_T}{V}, \quad I_N = |\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T|$$

Con carga equilibrada, la potencia aparente del transformador necesario coincide con la potencia aparente de la carga. No sucede lo mismo con la carga desequilibrada, pues se debe de tener en cuenta que el límite del transformador se alcanza cuando la potencia requerida por una de las fases es igual a la tercera parte de la potencia nominal del mismo.

Por lo tanto, la potencia nominal del transformador será, al menos, el triple de la potencia aparente absorbida por las fases, es decir, se debe de garantizar que la intensidad de corriente en cualquier devanado del transformador no supere su límite establecido por el fabricante.

Los aeropuertos bajo la administración de ASA, tienen sistemas eléctricos que tienen áreas definidas de prestación de servicios. En particular, existe un área común denominada Apoyos Visuales. Esta área se caracteriza por contar exclusivamente con cargas bifásicas, por lo que presentan problemas significativos de desbalanceo entre fases y no cuentan con metodologías eficientes para la corrección de este problema.

Las ayudas visuales sirven para la señalización en campos de vuelo son uno de los medios técnicos que forman parte del sistema de navegación aérea. Dentro de las ayudas se pueden distinguir tres tipos principales:

- Las señales
- Las luces
- Los letreros.

Las ayudas visuales se utilizan para dar apoyo a las operaciones aeroportuarias durante los procesos de las aeronaves y ayudan a garantizar que las operaciones se puedan efectuar con las máximas garantías de seguridad y eficacia. Deben ser señales fácilmente visibles para el ojo del piloto de la aeronave ya que sirven para orientarlos en las maniobras de aterrizaje, despegue y además de dirigir a los pilotos durante el rodaje hasta los puertos de los hangares.

En el área de movimiento se pueden distinguir tres tipos conjuntos principales de señalización en los campos de vuelos: las señales de pista, las señales de rodadura y las señales de plataforma.

- Señales de pista: Las señales de pista delimitan el terreno dedicado a la zona de aterrizaje y despegue e informan a los pilotos de donde empieza o termina además de la orientación
- Señales de rodadura: Indican el borde y el eje de las calles de rodaje desde la pista hasta la plataforma.
- Señales de plataforma: Delimitan los puestos de estacionamiento de las aeronaves además de las zonas prohibidas para los vehículos y las zonas de servicios de los vehículos de auxilio.

JUSTIFICACIÓN

Como bien se sabe el desbalance es un indicador de cuan diferentes son las tensiones de un sistema de dos o más fases entre sí. El desbalance se expresa en porcentajes. Un caso ideal sería que el desbalance sea nulo (0%) pero es muy difícil de lograr con cargas inestables sin embargo un desbalance de 3%(dependiendo del caso) es aceptable de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana Nom-001-SEDE-2012.

Estos desbalances se producen normalmente porque se incorporan cargas nuevas al sistema eléctrico o se realizan remodelaciones sin consulta ni planificación técnica lo cual provoca que las fases posean niveles completamente distintos.

Se requiere realizar el constante monitoreo de los tableros eléctricos para así proponer soluciones para los distintos casos que presenten. Con base en el análisis que los medidores de parámetros nos arrojen se pretende hacer un modelo a escala que simule el balance dinámico de las fases y después implementarlo en un controlador lógico programable en algunos de los aeropuertos operados por la empresa ASA.

La empresa ASA proporcionó las tablas de distribución de cargas con sus respectivos diagramas unifilares esto con el fin de darnos una idea de lo que pasa en cada una de las fases de los aeropuertos. Podemos ver que la distribución es diferente en cada caso pues esto depende del tamaño del aeropuerto y de los accesorios con los que cuenta cada uno. En algunos cuentan con más ayudas visuales y toma corrientes que en otros.

Aeropuerto: Puebla

Tabla 2: Distribución de cargas de ayudas audiovisuales del aeropuerto de Puebla

Descripción	Capacidad de interruptor termo magnético (A)	No de conductores por fase	Calibre de cable (AWG/KCMIL)	Corriente Max por calibre de conductor (A)	Punto de conexión(A)		
					Fase A	Fase B	Fase C
Rcc 10kW Rodajes	3x70	1	1/0	150	15	15	20
Iluminación Plataforma	3x100	1	2/0	175	20	20	30
Toma Corriente plataforma	3x100	1	2	115	30	30	20
Aduana	3x50	1	2	115	15	10	30
Toma Corriente Plataforma	3x100	1	1/0	150	30	30	20
Iluminación plataforma	3x70	1	1/0	150	20	20	35
Oficina DGAC	3x30	1	2	115	35	18	
RCC 4kW PAPI	3x80	1	1/0	150	12	12	
RCC 20kW reserva	3x100	1	1/0	150	0	0	
RCC 20kW pista	150	1	2/0	175	22	22	
Total:					199	177	155

$$\text{Desbalance máximo \%} = \frac{199 - 155}{199} * 100 = 22.11\%$$

Aeropuerto: Puerto escondido

Tabla 3: Distribución de cargas de las ayudas audiovisuales del aeropuerto de Puerto Escondido

Descripción	Capacidad de interruptor termo magnético (A)	No de conductores por fase	Calibre de cable (AWG/KCMIL)	Corriente Max por calibre de conductor (A)	Punto de conexión(A)		
					Fase A	Fase B	Fase C
PLC consola torre	3x15	1	10	35	5		
Oficinas SENEAM	3x50	1	8	50	18		15
RCC 10kW aproximación	3x70	1	6	65	19		19
RCC 4kW PAPI	3x100	1	6	65	12	12	
RCC 15kW Reserva	3x100	1	6	65	0		0
Faro	3x30	1	12	25	5		
Luz obstrucción	3x50	1	12	25	5		
Tablero Superpostes	3x70	1	4	85	23	23	23
RCC 10kW Rodaje	3x150	1	2	115	11	11	
RCC 20kW Pista	3x150	1	1/0	150	22		22
Equipos VOR	3x100	1	4	85	15	15	
Filtro de capacitores 12.5 kVAR	3x63	1	8	50	29	23	25
Capacitor ABB 12 kVAR	3x30	1	8	50	30	30	29
TOTAL:					194	114	133

$$\text{Desbalance máximo \%} = \frac{194 - 114}{194} * 100 = 41.23\%$$

Aeropuerto: Nuevo Laredo

Tabla 4: Distribución de cargas de la parte de ayudas visuales del aeropuerto de Nuevo Laredo

Descripción	Capacidad de interruptor termo magnético (A)	No de conductores por fase	Calibre de cable (AWG/KCMIL)	Corriente Max por calibre de conductor (A)	Punto de conexión (A)		
					Fase A	Fase B	Fase C
Superposte 3	3x50	1	6	65	15	15	15
RCC 4 KW reserva	3x70	1	8	50		0	0
RCC 4 kW PAPIS	3x50	1	6	65	12	12	
Consola	3x30	1	12	25	5	5	
Superposte 2	3x50	1	6	65	15	15	15
RCC 30 kW Rodaje	3x70	1	2	115		30	30
Superposte 1	3x40	1	6	65	15	15	15
Contacto trifásico pista	3x40	1	6	65	30	30	30
RCC 20 kW pista	3x100	1	1/0	150	22	22	
Total					114	144	105

Tabla 5: Distribución de cargas de la parte de ayudas visuales del aeropuerto de Nuevo Laredo.

$$\text{Desbalance máximo} = \frac{144 - 105}{144} * 100 = 27.08\%$$

Aeropuerto: Ciudad del Carmen

Tabla 6: Distribución de cargas de la parte de ayudas visuales del aeropuerto de Ciudad del Carmen.

Descripción	Capacidad de interruptor termo magnético (A)	No de conductores por fase	Calibre de cable (AWG/K CMIL)	Corriente Max. Por calibre de conductor (A)	Punto de conexión(A)		
					Fase A	Fase B	Fase C
RCC 20 kW pista	3x125	1	1/0	150		22	22
Filtro de capacitores 12.5 KVAR	3x30	1	6	65	32	31	32
RCC 20 kW reserva	3x150	1	1/0	150	0	0	
RCC 4 kW PAPI	3x50	1	6	65	12	12	
Tablero selector PAPI	3x15	1	10	35		5	
Postes Plataforma 8000W	3x70	1	2/0	175	23	23	
RCC 4 kW Reserva	3x50	1	6	65	0		0
RCC 15 kW Rodajes	3x30	1	6	65	11		11
Total					78	93	65

$$\text{Desbalance máximo} = \frac{93 - 65}{93} * 100 = 30.11\%$$

Aeropuerto: Colima

Tabla 7: Distribución de cargas de la parte de ayudas visuales del aeropuerto de Colima.

Descripción	Capacidad de interruptor termo magnético (A)	No de conductores por fase	Calibre de cable (AWG/K CMIL)	Corriente Max. Por calibre de conductor	Punto de conexión A		
					Fase A	Fase B	Fase C
Tablero A de alumbrado	3x30	1	6	65	7	7	
Superpostes 2400 W	3x70	1	1/0	150	10	10	10
Tablero Alumbrado SEI	3x125	1	1/0	150	19	25	19
RCC 20 kW pista	3x225	1	1/0	150		20	20
Rack de control (consola)	3x30	1	10	35		5	5
RCC 4 kW papis	3x100	1	4	85		10.62	10.62
RCC 4 kW Rodajes	3x100	1	8	50	11.5	11.5	
Tablero planta de tratamiento	3x100	1	1/0	150	20	20	20
Total					67.5	109.12	84.62

$$\text{Desbalance máximo \%} = \frac{109.12 - 67.5}{109.12} * 100 = 38.14\%$$

Como se puede observar el desbalance máximo corresponde al de Puerto Escondido. De acuerdo a la tabla número 7, el desbalance para un equipo que es conmutado hasta dos veces por día debe de ser máximo del 7% y durante un periodo no más de 10 segundos. Entonces, como se explicó las variaciones entre fases se deben al cambio climático, altura del avión, estación del año o inclusive en que parte del día se encuentra. Es por eso que es necesario corregir este desbalance debido a que la Comisión Federal de Electricidad se rige de acuerdo a la ley de la industria eléctrica y sus tarifas consideran un sobre precio si la diferencia entre la fase más grande a la más pequeña supera ciertos límites.

Tabla 8: Límites de las variaciones de tensión.

Indicador	Límite
Pst	≤ 1
Plt	≤ 0.65
dt	$\leq 3.3\%$ Durante el cambio de tensión para mas de 500 ms
dc	$\leq 3.3\%$
dmax	$\leq 4\%$ sin condiciones adicionales $\leq 6\%$ Para equipo que es conmutado manualmente con una frecuencia mayor a dos veces por día y también con arranque retardado de mas de 10 s, o arranque manual después de una interrupción en el suministro de energía. $\leq 7\%$ Para equipo que es conmutado hasta dos veces por día.

Nota:

- Pst y plt no aplican para cambios de tensión por conmutación manual que ocurre una vez cada día y los límites de dt, dc y dmax deben aplicarse con las tensiones previas multiplicadas por el factor 1.33
- Los límites no aplican para conmutaciones por interrupciones de emergencia.

Siendo:

- Pst: Indicador de variaciones de tensión de corto plazo
- Plt: Indicador de variaciones de tensión de largo plazo
- dt: Característica de cambio de tensión.
- dc: Cambio de tensión en estado estacionario.
- dmax: Característica de cambio de tensión máxima.

OBJETIVOS

Objetivo general

Implementar un sistema de balanceo dinámico de cargas bifásicas para el servicio de ayudas visuales de los aeropuertos ASA.

Objetivos particulares:

- Realizar el análisis dinámico de cargas de los tableros eléctricos asociados a los servicios de ayudas visuales.
- Analizar y establecer patrones de escenarios operativos de las cargas bifásicas.
- Desarrollar un prototipo a escala del sistema de balanceo dinámico.
- Diseñar y especificar los componentes de un circuito para el balanceo dinámico de cargas conforme a los patrones definidos del comportamiento de los tableros de ayudas visuales.
- Implementar y realizar las pruebas operativas del circuito diseñado.

MARCO TEÓRICO.

Conocer el análisis de potencia en corriente alterna es de gran importancia hoy en día puesto que la mayor parte de la vida estamos rodeados por dispositivos o herramientas de trabajo que están interconectados en nuestra red nacional. La mayor parte de los equipos que utilizamos tiene una potencia nominal con la que indica cuanta potencia requiere el dispositivo y en caso de excederla puede sufrir daños irreversibles, estos equipos en nuestro País trabajan a 60 hz \pm 1% de tolerancia.

Potencia instantánea.

La potencia instantánea que se suministra a cualquier dispositivo está dada por el producto de la tensión en ese momento a través de circuito y la corriente instantánea que circula por el mismo como lo indica la siguiente ecuación.

$$p(t) = i(t)v(t) \quad (1)$$

Si el circuito eléctrico consiste en una sola resistencia “R”, entonces la potencia se exprese solo en términos de su corriente o nada más mediante la corriente o la tensión:

$$p(t) = i(t)v(t) = i^2(t)R = \frac{v^2(t)}{R} \quad (2)$$

Si la tensión y la corriente se conectan con un dispositivo que es completamente inductivo, entonces:

$$p(t) = i(t)v(t) = Li(t) \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} v(t) \int_{-\infty}^t v(t') dt' \quad (3)$$

Y en el caso de un capacitor la tensión es cero en $t=-\infty$ y la ecuación queda de la siguiente forma:

$$p(t) = v(t)i(t) = Cv(t) \frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{C} v(t) \int_{-\infty}^t i(t') dt' \quad (4)$$

Potencia debida a la excitación senoidal.



La respuesta común en el dominio del tiempo está dada por

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi) \quad (5)$$

Donde

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (6)$$

y

$$\phi = -\arctan\left(\frac{-\omega L}{R}\right) \quad (7)$$

Por lo tanto, la potencia instantánea que suministra al circuito en el estado cosenoidal permanente es

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \phi) \cos(\omega t) \quad (8)$$

Valor eficaz de una forma de onda periódica.

El valor eficaz de cualquier corriente periódica resulta igual valor de la corriente directa que al fluir a través de una resistencia de $R\text{-ohm}$ entrega la misma potencia promedio a la resistencia que la corriente periódica.

Si la resistencia recibe la misma potencia promedio en la figura 1 y 2, entonces el valor eficaz de $i(t)$ es igual a I_{ef} y el valor eficaz de $v(t)$ es igual V_{ef}

La expresión matemática general del valor eficaz de $i(t)$ se obtiene después con facilidad. La potencia promedio (activa) que entrega la corriente periódica $i(t)$ a la resistencia se obtiene mediante.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 dt \quad (9)$$

Donde el periodo de $i(t)$ es T . La potencia que entrega a corriente directa corresponde a

$$P = I_{ef}^2 R \quad (10)$$

Igualando las expresiones de potencia y despejando I_{ef} , se obtiene

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (11)$$

Valor eficaz (RMS) de una forma de onda senoidal.

Se tiene una corriente de una forma senoidal:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi) \quad (12)$$

Que tiene un periodo

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (13)$$

Se sustituye en la ecuación y haciendo la aritmética correspondiente se haya el valor eficaz

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cos^2(\omega t + \phi) dt} \quad (14)$$

$$= I_m \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\phi) \right] dt} \quad (15)$$

$$= I_m \sqrt{\frac{\omega}{4\pi} [t]_0^{2\pi/\omega}} \quad (16)$$

$$= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

De esta forma, el valor eficaz de una corriente senoidal es una cantidad real independiente del ángulo de fase y numéricamente igual a $1/\sqrt{2} = 0.707$ veces la amplitud de la corriente.

De igual forma en el caso de $v(t) = V_m \cos \omega t$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

La utilización del valor eficaz simplifica también la expresión de la potencia promedio que entrega la corriente o la tensión senoidal, al evitar el uso del factor 1/2. Se calcula como:

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 R \quad (19)$$

Diciendo que $I_{ef} = I_m/\sqrt{2}$, la potencia promedio se calcula como

$$P = I_{ef}^2 R \quad (20)$$

Potencia Activa **Potencia real, media, verdadera, promedio**

La potencia activa es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica aprovecha como trabajo y que en verdad se utiliza. Esta potencia es la que realmente es consumida por los circuitos o cargas que estén conectadas.

Se obtendrá el resultado general del estado cosenoidal permanentemente. Se supondrá la tensión cosenoidal general

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (21)$$

Y la corriente

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi) \quad (22)$$

Asociados en el circuito en cuestión. La potencia instantánea se calcula mediante

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta) \cos(\omega t + \phi) \quad (23)$$

Si se expresa el producto de dos funciones coseno como la semisuma del coseno del ángulo diferencia y el coseno del ángulo suma,

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \phi) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \theta + \phi) \quad (24)$$

El primer término es una constante, independiente de t . El otro es una función coseno; $p(t)$ es en consecuencia periódica y su periodo es igual a $\frac{1}{2} T$. observar que el periodo T se asociaron la corriente y la tensión dadas, y no con la potencia; la función potencia tiene un periodo $\frac{1}{2} T$. No obstante, la familiaridad que se tiene con las ondas coseno y seno indica que el valor promedio de cualquiera sobre un periodo es cero. Por ello no hay necesidad de integrar de manera formal la ecuación anterior; por inspección, el valor promedio del segundo término es cero sobre un periodo T (o $\frac{1}{2} T$) y el valor promedio de primer término, una constante, debe ser también la propia constante. Por lo tanto,

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta - \phi) \quad (25)$$

Potencia Aparente

Esta se genera luego de un proceso entre varios elementos para el funcionamiento de artefactos y dispositivos. Aplicada a un circuito alimentado por corriente alterna es la suma de la energía que transforma dicho circuito en forma de calor y la energía utilizada para formar campos eléctricos y magnéticos a través de los componentes. Por otra parte, esta no es la potencia que se consume realmente porque además de compensar la parte que lleva la energía consumida por los elementos resistivos, también debe satisfacer la porción de energía que almacenan los capacitores y las bobinas.

La potencia aparente (en VA) es el producto de los valores rms del voltaje por la corriente [S]. Se llama así porque aparentemente la potencia debería ser el producto voltaje-corriente, por analogía con los circuitos resistivos de CD. Esta potencia se mide en volt-amperes o VA para distinguirla de la potencia promedio o rea, la cual se mide en Watts.

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (26)$$

Factor de Potencia.

El factor de potencia mide la eficiencia del consumo eléctrico, a la hora de convertirlo en potencia útil como movimiento mecánico, calor, electricidad. Indica que porcentaje de la potencia total es utilizada para realizar el trabajo. Constituye cualitativa y cuantitativamente el aprovechamiento de la energía.

Se expresa como el coseno de la diferencia de fase entre la tensión (voltaje) y la corriente. También, es igual al coseno del ángulo de la impedancia de la carga. El factor de potencia es adimensional, ya que es la proporción entre la potencia promedio y la potencia aparente.

$$fp = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (27)$$

Esta resta dentro del coseno se llama ángulo del factor de potencia, dado que es el ángulo cuyo coseno es igual al factor de potencia. El ángulo del factor de potencia es igual al ángulo de la impedancia de carga si “V” es la tensión entre las terminales de la carga e “I” la corriente que fluye por ella. Se tiene que:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_{rms}/\angle\theta_v}{I_{rms}/\angle\theta_i} \quad (28)$$

El factor de potencia es el coseno de la diferencia de fase entre la tensión (voltaje) y la corriente. También es igual al coseno del ángulo de la impedancia de la carga.

Tener un bajo factor de potencia atrae consecuencias tanto económicas como de aprovechamiento de energía

Potencia Reactiva

Esta potencia no es una que consuma realmente energía porque no produce un trabajo útil. Posee un valor nulo debido a su falta de producción energética. Es asociada y necesaria en los campos eléctricos que poseen los motores y transformadores que este conformados por bobinas y capacitores que pertenezcan a alguna instalación eléctrica.

La potencia reactiva expresa el flujo de energía que, en forma alternada, va hacia la carga y regresa de ella. El valor máximo de esta potencia pulsante, denominada “Q”, se llama potencia reactiva o voltamperes reactivos. Q es muy utilizada en la descripción de la operación de los sistemas de potencia y se calcula de la siguiente manera.

$$Q = \frac{V_{max} I_{ma}}{2} \text{sen}(\theta) \quad (29)$$

Ó

$$Q = |V||I| \text{sen}(\theta) \quad (30)$$

Las unidades más prácticas para. “Q” son los kVAR’s o los MVAR’s.

Potencia Compleja

La potencia compleja “S” está dada por la carga de ca es el producto de la tensión por el conjugado de la corriente compleja, o

$$S = \frac{1}{2} V I^* \quad (31)$$

En términos de los valores rms

$$S = V_{rms} I_{rms}^* \quad (32)$$

Con estas variables la ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$S = V_{rms} I_{rms} / \theta_v - \theta_i \quad (33)$$

$$= V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_v - \theta_i) + j V_{rms} I_{rms} \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (34)$$

Cabe indicar que la magnitud de la potencia compleja se mide en Volt-Amperes (VA). Asimismo, que el ángulo de la potencia compleja es el ángulo que se utiliza para calcular el factor de potencia.



La potencia compleja puede expresarse en términos de la impedancia de carga Z. la impedancia de carga se escribe como:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \angle \theta_v - \theta_i \quad (35)$$

Así, $V_{rms} = Z I_{rms}$, sustituyendo la ecuación.

$$S = I_{rms}^2 Z = \frac{V_{rms}^2}{Z^*} = V_{rms} I_{rms}^* \quad (36)$$

Puesto que también $Z = R + jX$, la ecuación se convierte.

$$S = I_{rms}^2 (R + jX) = P + jQ \quad (37)$$

La potencia real “P” es la potencia promedio en watts suministrada a una carga; es la única potencia útil. La potencia reactiva “Q” es una medida del intercambio de energía entre la fuente y la parte reactiva de la carga. Representa un intercambio sin pérdidas entre la carga y la fuente.

1. $Q = 0$ en cargas resistivas (fp unitario).
2. $Q < 0$ en cargas capacitivas (fp adelantado).
3. $Q > 0$ en cargas inductivas (fp atrasado).

Así se puede concluir que la potencia compleja (en VA) es el producto del fasor del voltaje rms y el conjugado del fasor complejo de la corriente rms. Como variable compleja, su parte real representa P y su parte imaginaria la potencia reactiva Q .

En resumen:

$$\text{Potencia compleja} = \check{S} = P + jQ = \frac{1}{2} V I^* \quad (38)$$

$$= V_{RMS} I_{RMS} \angle \theta_v - \theta_i \quad (39)$$

$$\text{Potencia aparente} = S = |S| = V_{RMS} I_{RMS} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (40)$$

$$\text{Potencia real} = P = \text{Re}(\check{S}) = S \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (41)$$

$$\text{Potencia reactiva} = Q = \text{Im}(\check{S}) = S \text{ sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (42)$$

$$\text{Factor de potencia} = \frac{P}{S} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (43)$$

Corrección de factor de potencia

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento los elementos del sistema eléctrico. Cuando la cantidad de estos equipos son demasiados se requiere potencia reactiva significativamente, lo cual produce una disminución del factor de potencia. El operar con un bajo factor de potencia además del impacto económico que genera tiene otras implicaciones como en la transformación y distribución de la energía eléctrica entre ellos.

- Mayor consumo de corriente
- Aumento de pérdidas en los conductores
- Incrementos de las caídas de voltajes

La energía reactiva se cobra cuando sobrepasa de manera considerada el límite que establece la Comisión Federal de Electricidad. La CFE exige al consumidor contar con un factor de potencia igual o mayor al 0.90 para no tener ninguna penalización en su facturación. Pero si se cumple con lo establecido puedes recibir una bonificación. Tal y como se muestra en la tabla 1 que ayudará a calcular las penalizaciones o bonificaciones que se aplican a los recibos de CFE.

Tabla 9: Penalizaciones y bonificaciones

Concepto	Fórmula	%Máximo aplicable
Bonificación	$\frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{95}{FP} \right) \right] * 100$	2.5
Penalización	$\frac{3}{5} \left[\left(\frac{95}{FP} \right) - 1 \right] * 100$	120

La mayoría de las cargas industriales (como motores de inducción) son inductivas y operan con un factor de potencia bajo y atrasado. Aunque en un caso real la carga inductiva no puede modificarse, pero si es posible incrementar su factor de potencia.

El proceso de incrementar el factor de potencia sin alterar el voltaje o corriente de la carga original es posible con la adición de un elemento reactivo (usualmente un capacitor) en paralelo con la carga para que el factor de potencia se acerque más a la unidad.

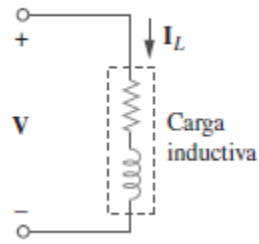


Figura 3: Modelo de una carga inductiva real.

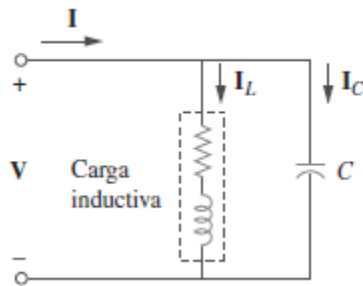


Figura 4: Modelo de una carga inductiva real con una compensación de una carga capacitiva

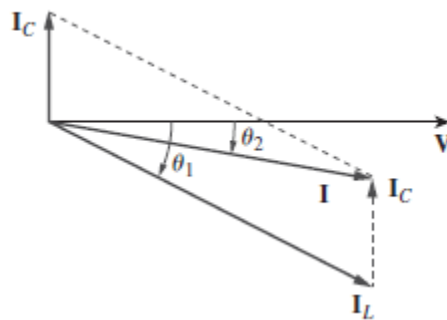


Figura 5: Diagrama fasorial que muestra como el ángulo de desfase disminuye gracias a la carga capacitiva.

La corrección del factor de potencia puede examinarse desde otro punto por ejemplo si la carga inductiva tiene una potencia aparente S_1 , entonces:

$$P = S_1 \cos \theta_1, \quad Q_1 = S_1 \sin \theta_1 = P \tan \theta_1 \quad (44)$$

Si se desea aumentar el factor de potencia de la carga original a un $\cos \theta_2$ sin alterar la potencia real (muy importante), se necesita calcular una potencia reactiva nueva como:

$$Q_2 = P \tan \theta_2 \quad (45)$$

El decremento de la potencia reactiva es causado por el capacitor conectado en derivación;

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (46)$$

Pero se sabe que $Q_c = \frac{V_{rms}^2}{X_c} = \omega C V_{rms}^2$. Entonces el valor de la capacitancia se calcula con la siguiente manera.

$$C = \frac{Q_c}{\omega V_{rms}^2} = \frac{P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)}{\omega V_{rms}^2} \quad (47)$$

La situación que se encuentra más en ocasiones es la de una carga inductiva pero también hay posibilidades que se encuentran cargas capacitivas; es decir que el factor de potencia se encuentre adelantado. En este caso con una inductancia en paralelo "L" requerida se puede calcular de la siguiente manera

$$Q_L = \frac{V_{rms}^2}{X_L} = \frac{V_{rms}^2}{\omega L} \rightarrow \quad (48)$$

$$L = \frac{V_{rms}^2}{\omega Q_L} \quad (49)$$

Donde $Q_L = Q_1 - Q_2$ o sea la diferencia entre la potencia reactiva nueva y la antigua.

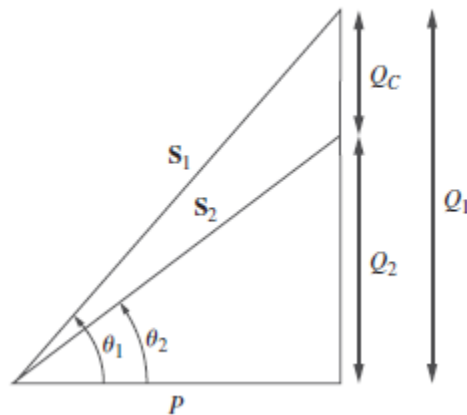


Figura 6: Triangulo de potencia que muestra la corrección del factor de potencia.

Tener un factor de potencia cercano a la unidad tiene beneficios importantes como

- Reducción del costo de su facturación de energía eléctrica (se evitan penalizaciones).
- Disminución de pérdidas eléctricas en los conductores por el efecto Joule.
- Reducción de pérdidas por caída de tensión.
- Aumento de la disponibilidad de potencia en transformadores y líneas de transmisión.

Balance de fases.

El desbalance de fases se refiere cuando los fasores son desiguales en relación a la magnitud o cuando la separación angular entre ellos se aparta de los 120° entre sí. El desbalance se produce en los sistemas eléctricos trifásicos y este depende de las cargas que se tienen alimentadas (si son cargas monofásicas o cargas no lineales).

Los problemas que atraen este tipo de situaciones en las redes eléctricas son:

- Sobrecalentamientos de las terminales o en los puntos de conexión de los conductores de las distintas cargas que se tienen.
- Las protecciones de los circuitos pueden operar de manera incorrecta
- Provoca pérdidas adicionales por calentamiento.
- Multas por incumplimiento de desbalance máximo de corriente.

En la mayoría de los casos, el desbalance de corriente se debe a una mala instalación eléctrica como distribución de cargas eléctricas y sobrecargas de circuitos diseñadas para potencias controladas dejando como consecuencias mal balanceo de cargas monofásicas que suelen ser circuitos de iluminación que van desde los 480V a los 127V o circuitos donde las cargas suelen ser computadoras, aires acondicionados o equipos electrónicos que utiliza cualquier empresa.

Existen diferentes metodologías para resolver el problema del desbalance una de ellas son conectar bancos de resistencias que son ampliamente utilizados. Dichos productos están hechos por materiales que produce una carga eléctrica y convierte la salida de energía resultante de la fuente o generador. El calor se dispersará a través del banco de resistores disminuyendo la caída de tensión en la línea que se implanta. El objetivo principal del banco es balanceando las fases sin modificar el factor de potencia.

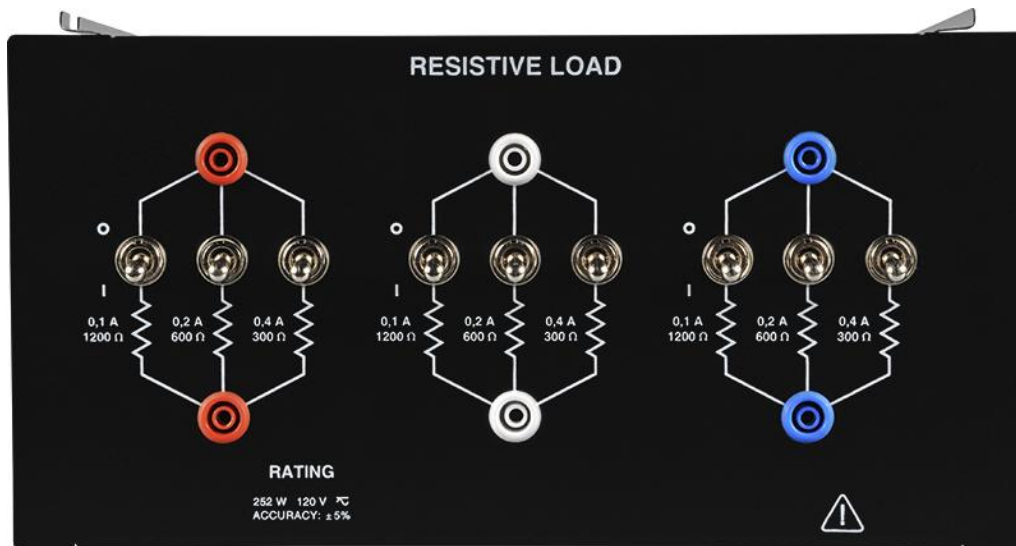


Figura 7: Módulo de resistores*

Elementos pasivos y tipos de cargas de un sistema eléctrico

Es importante conocer los elementos con los que ciertos dispositivos de los sistemas eléctricos están compuestos. En este apartado se mencionan algunos y como este tipo de cargas afectan en el desbalance de reactivos en nuestras líneas de distribución.

Resistores.

Un resistor es un componente electrónico diseñado para introducir una resistencia eléctrica entre dos puntos de un circuito. No posee polaridad, su principal función es la disipación de calor y limitar el flujo de corriente eléctrica. Un resistor funciona según el principio de la ley de ohm y la ley establece que el voltaje a través de los terminales de una resistencia es directamente proporcional a la corriente que fluye a través de ella.

$$V = I R \quad (50)$$

*Figura tomada de la página lapvolt.festo.com



Figura 8: Símbolo de la resistencia.

La unidad de la resistencia es el ohm (Ω) y los valores del resistor se pueden ver en términos de Ohms, kilohms(Ω).

Existen tipos de resistores que se utilizan para diferentes aplicaciones. Se clasifican en fijos y variables.

- Resistores Fijos: se utilizan en circuitos electrónicos para establecer las condiciones deseadas en un circuito.
- Resistores Variables: Consisten en un elemento resistor fijo y un control deslizante que se conecta al elemento resistor principal.

Carga Resistiva

Toda la energía se transforma en energía calorífica, no en movimiento. La intensidad de corriente, en su paso por la resistencia, está en fase con la onda de voltaje; esto quiere decir que ambas ondas tienen el mismo ciclo. El ángulo de desfaseamiento entre tensión y corriente es cero.

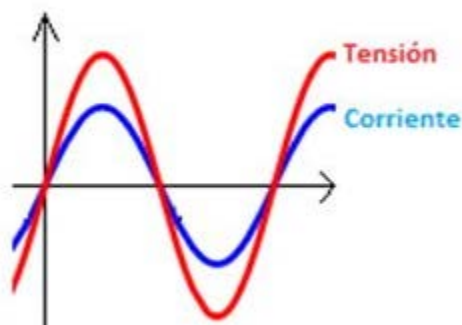


Figura 9: Diagrama fasorial de una carga resistiva

Capacitores:

Los capacitores son elementos pasivos que almacenan energía en su campo eléctrico. Son muy usados en la electrónica, comunicaciones y sistemas de

potencia. El capacitor está compuesto por dos placas conductoras separadas por un aislante (o dieléctrico).

Cuando una fuente de tensión v se conecta al capacitor deposita una carga positiva q en una placa y una carga negativa $-q$ en la otra. Se dice así que el capacitor almacena carga eléctrica. Se representa con la letra q , es directamente proporcional a la tensión aplicada:

$$q = Cv \quad (51)$$

Donde C es la capacitancia del capacitor y su unidad es el farad(F) o 1 coulomb/volt.

Existen tres factores en general que determinan el valor de la capacitancia.

- 1.- El área superficial de las placas: más grande el área, mayor capacitancia.
- 2.- El espaciamiento entre las placas: menor espaciamiento, mayor capacitancia.
- 3.- La permitividad del material: a mayor permitividad, más grande la capacitancia.

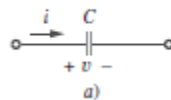


Figura 10: Símbolo del capacitor fijo.

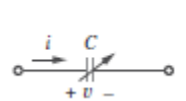


Figura 11: Símbolo del capacitor variable.

Los capacitores sirven para bloquear cd, pasar ca, cambiar fase, almacenar energía, encender motores y suprimir ruidos.

Para obtener la relación de corriente-tensión del capacitor, se toma la derivada de la siguiente ecuación:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (52)$$

La derivación de ambos miembros da como resultado.

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (53)$$

La relación de voltaje del capacitor puede obtenerse integrando la ecuación

$$v = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i \, dt \quad (54)$$

$$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i \, dt + v(t_0) \quad (55)$$

Donde $v(t_0) = q(t_0)/C$ es el voltaje en el capacitor en el tiempo t_0

Carga Capacitiva

En un circuito eléctrico, los condensadores se comportan como un elemento capaz de almacenar la energía eléctrica que se puede captar y luego la descarga de vuelta al sistema. En este caso, la onda de la corriente está adelantada respecto a la onda de la tensión 90° .

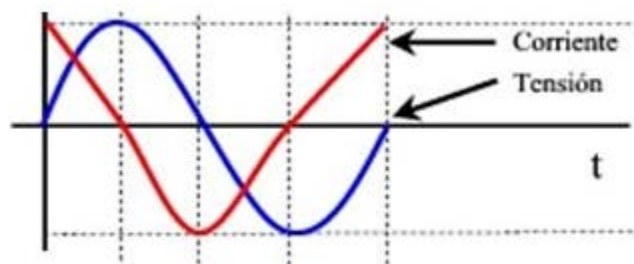


Figura 12: Diagrama fasorial de una carga capacitiva.

Inductores

Un inductor es un elemento pasivo diseñado para almacenar energía en su campo magnético. Usualmente se emplean en sistemas electrónicos de potencia. Se usan en alimentaciones de potencia, transformadores, radios, televisores, radares y motores eléctricos. Un inductor consta de una bobina de alambre conductor.

La ecuación para obtener la tensión es la siguiente.

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (56)$$

Donde “L” es la constante llamada inductancia del inductor y su unidad es el Henry(H).

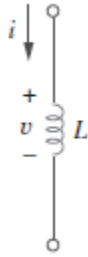


Figura 13: Símbolo del inductor de núcleo de aire

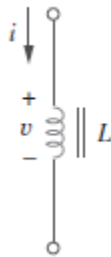


Figura 14: Símbolo del inductor de núcleo de hierro.

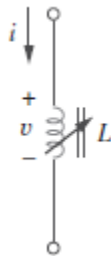


Figura 15: Símbolo del inductor variable de núcleo de hierro.

La relación de corriente-voltaje se obtiene de la siguiente ecuación:

$$di = \frac{1}{L} v dt \quad (57)$$

Integrando ambos lados de la ecuación:

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(t) dt + i(t_0) \quad (58)$$

El inductor está construido para almacenar la energía en su campo magnético que produce. La potencia suministrada por el inductor es:

$$p = vi = \left(L \frac{di}{dt} \right) i \quad (59)$$

La energía almacenada es

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t \left(L \frac{di}{dt} \right) i dt \quad (60)$$

Resolviendo y aplicando los limites correspondientes nos queda que la energía almacenada se calcula como:

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (61)$$

Carga Inductiva

Al circular una corriente eléctrica por algunos dispositivos que contengan bobinas, se va a generar un campo magnético que convierte la energía eléctrica en energía magnética necesaria para funcionar. En los primeros instantes el inductor o bobina se opone al funcionamiento, de tal forma que en el siguiente ciclo parte de la potencia regresará a la fuente. En los siguientes ciclos, será la inercia que regulará la diferencia de potencia. En este caso particular, la onda de la corriente eléctrica estará atrasada respecto a la tensión 90°.

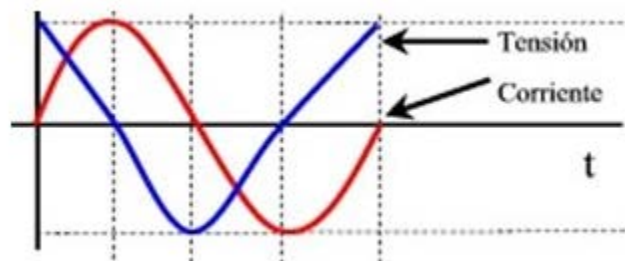


Figura 16: Diagrama fasorial de una carga inductiva.

MONITOREO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS PARA UN AEROPUERTO.

Se muestran las mediciones tomadas del estudio de calidad de energía realizado por la empresa “SmartPQ” y que el Ingeniero Sergio Martínez fue el encargado de proporcionarlas del aeropuerto de la ciudad Ixtepec del día 13 de marzo del año 2019 desde las 12:47:29 hasta las 14:17:00 del mismo día.

En este archivo se pudo obtener valores de la corriente (Irms) por fase, Voltaje (Vrms) entre líneas.

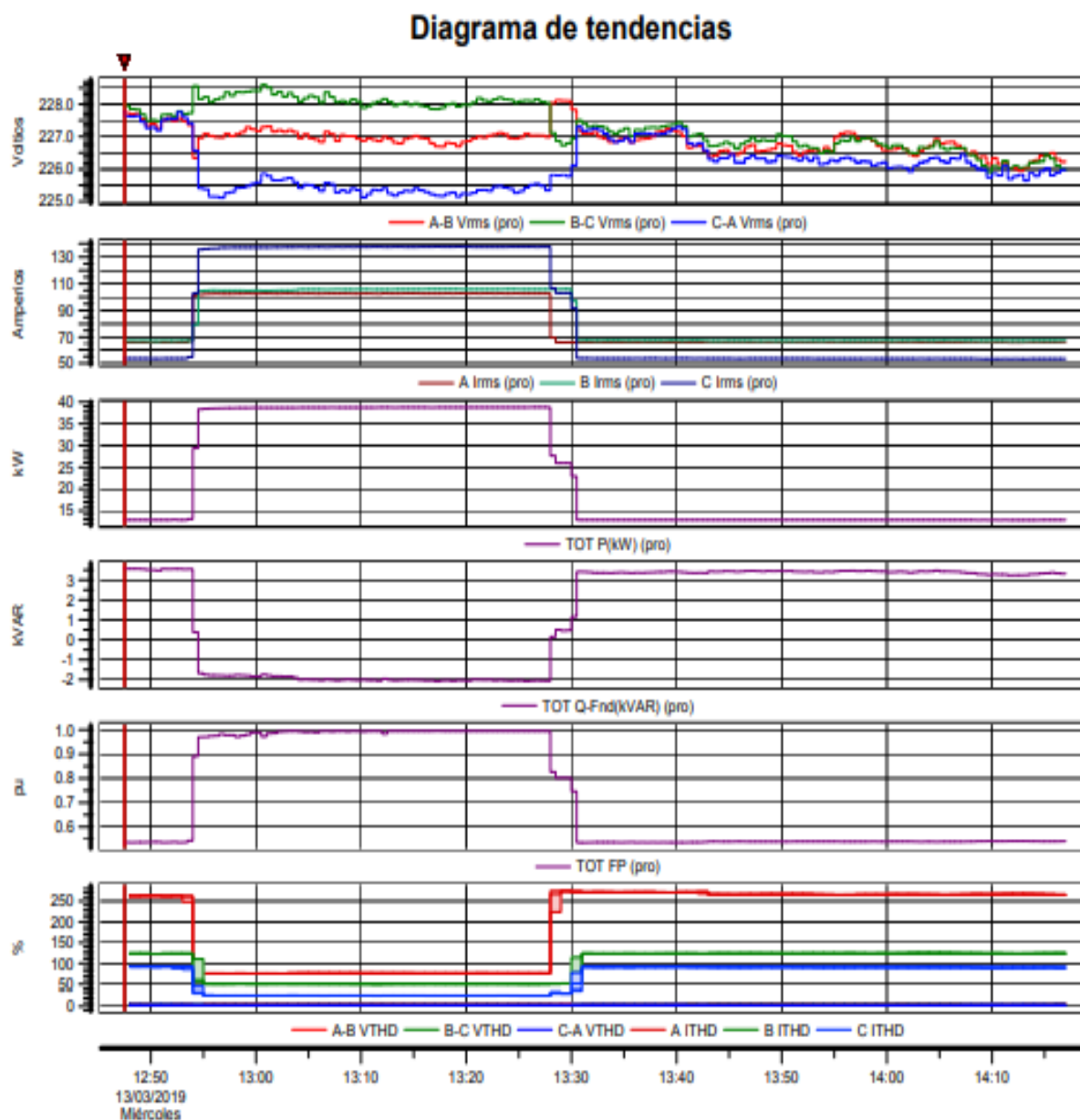


Figura 17: Diagrama de tendencias del servicio de ayudas visuales del aeropuerto de la ciudad Ixtepec.

Si se observa detenidamente la potencia activa, reactiva y el factor de potencia son promediadas.

Se procedió a calcular la potencia activa, la potencia aparente y la potencia reactiva para cada fase. Cabe destacar que las mediciones se agruparon en escenarios por cada 5 minutos tomando como escenario número 1 a las 12:50 horas y el escenario final el número 11 el de las 13:40 horas.

Tabla 10: Información recopilada y separa por escenarios de cada 5 minutos.

Escenario 1:	12:50 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.29	131.35	131.23
	Irms	66	68	54
Promediado	FP.	0.53	0.53	0.53
	Potencia Activa	4592.51	4733.75	3755.85
	Potencia Aparente	8665.10	8931.61	7086.51
	Potencia Reactiva	7347.99	7573.98	6009.35
Escenario 2:	12:55 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	130.77	131.92	130.13
	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	0.9	0.9	0.9
	Potencia Activa	12122.36	12466.87	15928.49
	Potencia Aparente	13469.29	13852.08	17698.33
	Potencia Reactiva	5871.13	6037.98	7714.52
Escenario 3:	13:00 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.20	131.87	130.19

	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	0.99	0.99	0.99
	Potencia Activa	13378.75	13707.55	17529.12
	Potencia Aparente	13513.89	13846.01	17706.18
	Potencia Reactiva	1906.37	1953.22	2497.76
Escenario 4:	13:05 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	130.9430411	131.75	130.192
	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	0.99	0.99	0.99
	Potencia Activa	13352.26	13695.55	17529.12
	Potencia Aparente	13487.13	13833.89	17706.18
	Potencia Reactiva	1902.59	1951.51	2497.76
Escenario 5:	13:10 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.0007761	131.6358614	130.0770156
	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	1	1	1
	Potencia Activa	13493.08	13821.77	17690.47
	Potencia Aparente	13493.08	13821.77	17690.47
	Potencia Reactiva	0.00	0.00	0.00
Escenario 6:	13:15 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.0585111	131.6358614	130.1347507
	Corriente	103	105	136

Promediado	FP.	1	1	1
	Potencia Activa	13499.03	13821.77	17698.33
	Potencia Aparente	13499.03	13821.77	17698.33
	Potencia Reactiva	0.00	0.00	0.00
Escenario 7:	13:20 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	130.885306	131.6358614	130.0770156
	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	1	1	1
	Potencia Activa	13481.19	13821.77	17690.47
	Potencia Aparente	13481.19	13821.77	17690.47
	Potencia Reactiva	0.00	0.00	0.00
Escenario 8:	13:25 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.0007761	131.5781263	130.0770156
	Corriente	103	105	136
Promediado	FP.	1	1	1
	Potencia Activa	13493.08	13815.70	17690.47
	Potencia Aparente	13493.08	13815.70	17690.47
	Potencia Reactiva	0.00	0.00	0.00
Escenario 9:	13:30 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.8090665	130.885306	130.6543659
	Corriente	66	107	104
Promediado	FP.	0.8	0.8	0.8
	Potencia Activa	6959.52	11203.78	10870.44
	Potencia Aparente	8699.40	14004.73	13588.05
	Potencia Reactiva	5219.64	8402.84	8152.83

Escenario 10:	13:35 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.0007761	131.2317162	131.0585111
	Corriente	66	58	64
Promediado	FP.	0.53	0.53	0.53
	Potencia Activa	4582.41	4034.06	4445.50
	Potencia Aparente	8646.05	7611.44	8387.74
	Potencia Reactiva	7331.83	6454.48	7112.79

Escenario 11:	13:40 hrs			
		Fase A	Fase B	Fase C
	Voltaje	131.1739812	131.2894512	131.2317162
	Corriente	66	58	64
Promediado	FP.	0.53	0.53	0.53
	Potencia Activa	4588.465861	4035.83773	4451.379813
	Potencia Aparente	8657.482757	7614.78817	8398.829836
	Potencia Reactiva	7341.524959	6454.482777	7112.787732

Como resulta evidente de los 11 escenarios que estamos analizando existe un factor de potencia atrasado menor al 0.95 que CFE nos exige, hay cuatro escenarios disponibles que no los cumple, siendo de 0.53 el más bajo. Esto dice que se está desperdiciando el 47% de energía reactiva que aplicando la fórmula de penalización que nos proporciona CFE nos da un valor de

$$Penalización \rightarrow \frac{3}{5} \left[\left(\frac{95}{FP} \right) - 1 \right] * 100 = \frac{3}{5} \left[\left(\frac{95}{0.53} \right) - 1 \right] * 100 = 10,694.716$$

Con hasta un máximo aplicable del 120%.

Corrección del factor de Potencia y cálculo de capacitores.

Para la corrección del factor de potencia primero se tomó en cuenta que el factor de potencia mínimo para evitar cualquier recargo o multa por parte de CFE es de 0.95. Por eso se calcula el ángulo a un factor de potencia cercano a la unidad. En este caso el parámetro será de

$$0 \geq \theta_2 \leq 8.10^\circ$$

Primero para todos los casos por fase se calculó una potencia aparente de la siguiente manera.

$$S_2 = \frac{P_1}{FP_2}$$

Después con la nueva potencia aparente se calcula la potencia reactiva dos

$$Q_2 = S_2 \tan \theta_2$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V_{RMS}^2}$$

Siendo:

$$Q_2 = \text{Potencia Reactiva nueva}$$

$$S_2 = \text{Potencia aparente nueva}$$

$$Q_c = \text{Potencia reactiva de los capacitores necesarios}$$

$$C = \text{Capacitancia necesaria.}$$

Tabla 11: Tabla con las capacitancias requeridas por fase para corregir el factor de potencia

Escenario 1: 12:50 horas			
	A	B	C
S2	4834.22	4982.90	3953.53
Q2	1509.48	1555.91	1172.764323
QC	5838.50	6018.07	4836.58
C	8.98484956643687000E-04	9.253048672376060E-04	7.44954578810166E-04
CAPACITANCIA TOTAL= 2.56874440269146000E-03			
Escenario 2: 12:55 horas			
	A	B	C
S2	12760.38	13123.02	16766.83524
Q2	3984.428296	4097.661583	5235.442627
QC	1886.70	1940.32	2479.08
C	2.92655490830388E-03	2.95726847131937E-04	3.88304707038158E-04
CAPACITANCIA TOTAL= 3.61058646247398E-03			
Escenario 9: 13:30 horas			
	A	B	C
S2	7325.809167	11793.45494	11442.57184
Q2	2287.483179	3682.505126	3572.941911
QC	2932.16	4720.33	4579.89
C(F)	4.47677598960875E-04	7.30902751946649E-04	7.11665847671222E-04
CAPACITANCIA TOTAL= 1.89024619857875E-03			
Escenario 10: 13:35 horas			
	A	B	C
S2	4823.586471	4246.382059	4679.478628

Q2	1506.164393	1325.932373	1461.166733
QC	5825.67	5128.55	5651.62
C(F)	9.00464870607203E-04	7.92014348996912E-04	8.72793396409662E-04
CAPACITANCIA TOTAL= 2.56527261601378E-03			
Escenario 11: 13:40 horas			
	A	B	C
S2	4829.964064	4248.250242	4685.662961
Q2	1508.155796	1326.515713	1463.097791
QC	5833.369163	5127.967064	5649.689942
C(F)	8.99275876499887E-04	7.89140699446332E-04	8.70193587559599E-04
CAPACITANCIA TOTAL= 2.55861016350582E-03			

Del escenario 4 al escenario 8 no es necesario corregir el factor de potencia debido a que ya cumple con las normativas establecidas.

Balance de cargas.

El último paso se debe balancear la carga. Debido a que el factor de potencia es casi uno podemos balancear la carga con potencia activa, esta a su vez se hará con módulos de resistencia solamente balanceando respecto a la carga más grande:

$$P_R = |P_{Fase\ mayor} - P_{fase}|$$

$$R_{FASE} = \left(\frac{V_{FASE}^2}{P_R} \right) FP_{FASE}$$

Tabla 12: Resistencias necesarias para el balance de corrientes del circuito

Escenario 1 12:50 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	4592.51	4733.75	3755.85
PR	141.25		977.90
R	64.68		9.33
RESISTENCIA TOTAL= 74.01			
Escenario 2 12:55 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	12122.36	12466.87	15928.49
PR	3806.13	3461.62	
R	4.04	4.52	
RESISTENCIA TOTAL= 8.56			
Escenario 3 13:00 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13378.75	13707.55	17529.12
PR	4150.36	3821.56	
R	4.11	4.50	
RESISTENCIA TOTAL=8.61			
Escenario 4 13:05 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13352.26	13695.55	17529.12
PR	4176.85	3833.57	
R	4.06	4.48	
RESISTENCIA TOTAL= 8.54			
Escenario 5 13:10 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13493.08	13821.77	17690.47
PR	4197.39	3868.71	
R	4.09	4.48	

RESISTENCIA TOTAL= 8.57			
Escenario 6 13:15 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13499.03	13821.77	17698.33
PR	4199.30	3876.56	
R	4.09	4.47	
RESISTENCIA TOTAL= 8.56			
Escenario 7 13:20 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13481.19	13821.77	17690.47
PR	4209.29	3868.71	
R	4.07	4.48	
RESISTENCIA TOTAL= 8.55			
Escenario 8 13:25 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	13493.08	13815.70	17690.47
PR	4197.39	3874.77	
R	4.09	4.47	
RESISTENCIA TOTAL= 8.56			
Escenario 9 13:30 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	6959.52	11203.78	10870.44
PR	4244.26		333.34
R	3.27		40.97
RESISTENCIA TOTAL= 44.24			
Escenario 10 13:35 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	4582.41	4034.06	4445.50
PR		548.34	136.90
R		16.65	66.50
RESISTENCIA TOTAL= 83.15			
Escenario 11 13:40 hrs			
	Fase A	Fase B	Fase C
P	4588.47	4035.84	4451.38
PR		552.63	137.09
R		16.53	66.58
RESISTENCIA TOTAL= 83.11			

Se propone para el sistema de balanceo dinámico de cargas bifásicas para el servicio de ayudas visuales de los aeropuertos ASA una infraestructura que tengan tres dispositivos importantes:

- Un analizador de voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia por línea.
- Un controlador lógico programable (PLC) que sea capaz de analizar datos y realizar diferentes tipos de operaciones lógicas y aritméticas.
- Un compensador de potencia reactiva.
- Resistencias de potencia.

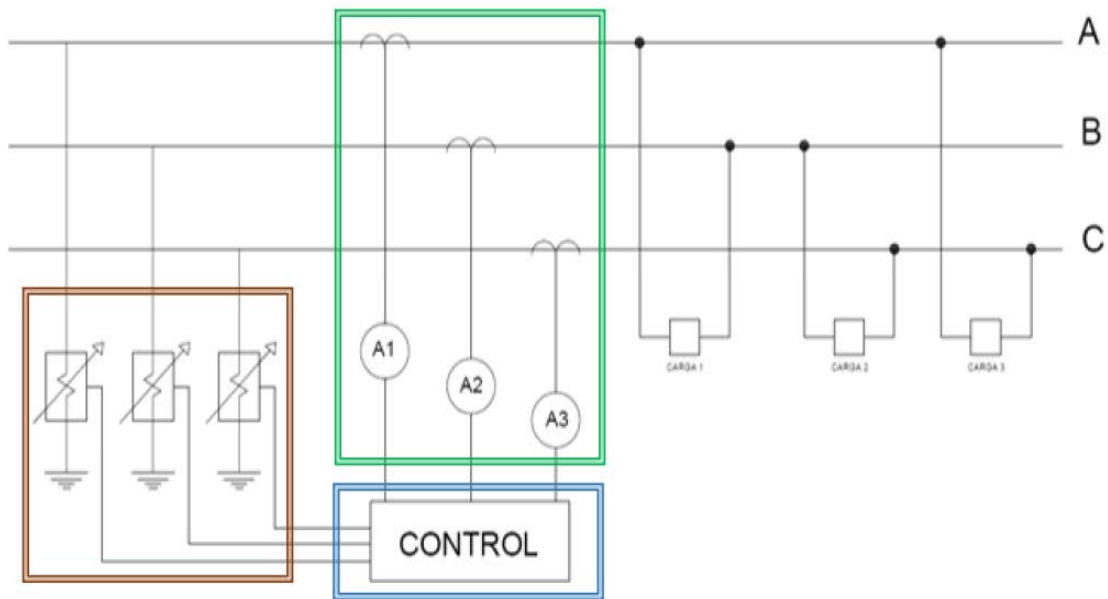


Figura 18: Diagrama de conexión propuesto para el balance dinámico.

Como se observa en la ilustración anterior se presenta un circuito donde se observan las tres líneas: A, B y C. Se divide en tres recuadros que son los siguientes

- El rectángulo verde tendrá conectado el analizador o medidor de potencias.
- El cuadro azul será el 'PLC' donde se almacenarán los datos recogidos por el analizador y realizara algoritmo para incrementar o disminuir la carga.
- La parte café tendrá los compensadores de carga variable conectada a las tres fases de la acometida.

Los equipos que se proponen para la infraestructura mostrada son los siguientes.

Medidor de potencia ELNET VIP

Un medidor de potencia activa, potencia reactiva, voltaje, corriente y factor de potencia en cada línea de la marca ELNET VIP. Tiene un voltaje de alimentación 90-250VAC/ 110-280 VDC



Figura 19: Pantalla del analizador de potencia.

Este medidor contiene señalizaciones por medio de leds que irán conectados a las líneas. El analizador se energiza tomando corriente de alguna de las líneas y conectandola al neutro. A continuación su diagrama de alambado proporcionado por su fabricante.

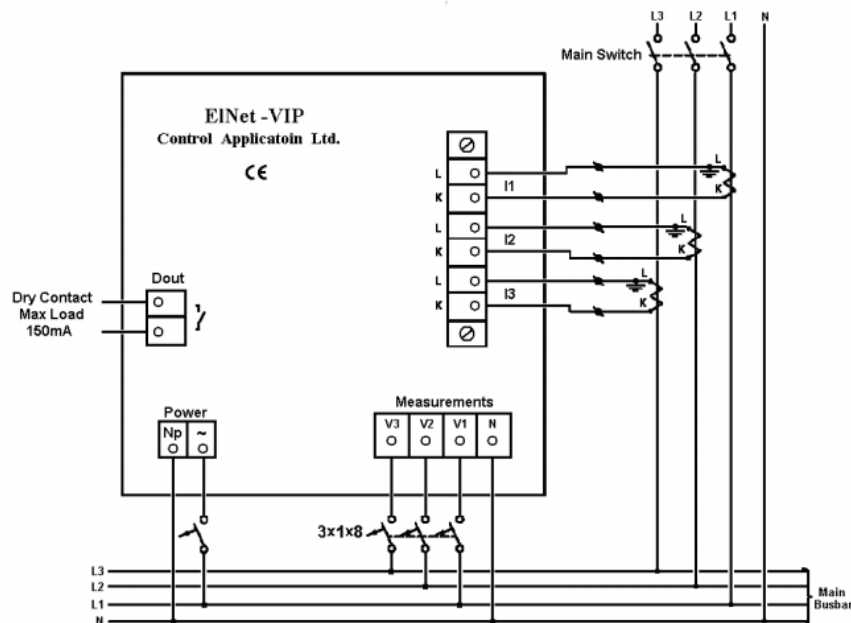


Figura 20: Diagrama de alambrado.

Controlador lógico programable SIMATIC S7-1200

Puede ser una opción muy buena porque automatiza los dispositivos conectados con funciones ya integradas en el controlador. Su disponibilidad se puede encontrar en versiones estándar y a pruebas de fallo. Contiene una amplia variedad de funciones tecnológicas especiales como son el conteo y los módulos de comunicaciones.



Figura 21: PLC Simatic s7-1200

Condensadores cilíndricos VARPLUS Can.

Son condensadores especialmente diseñados para ofrecer una larga vida útil, con pocas pérdidas en condiciones normales de funcionamiento. Esto serán seleccionados en función de las condiciones de trabajo previstas. Pueden ser una solución segura y de alto rendimiento para la corrección del factor de potencia en condiciones de uso severas.



Figura 22: Condensadores de baja tensión

PROTOTIPO:

Para la demostración del algoritmo desarrollado se creará un dispositivo de que simulará la corrección de potencia para dos cargas RL y con ayuda de la plataforma “Arduino” se programará con un lenguaje de código abierto dando como resultado el balance reactivo.

Arduino:

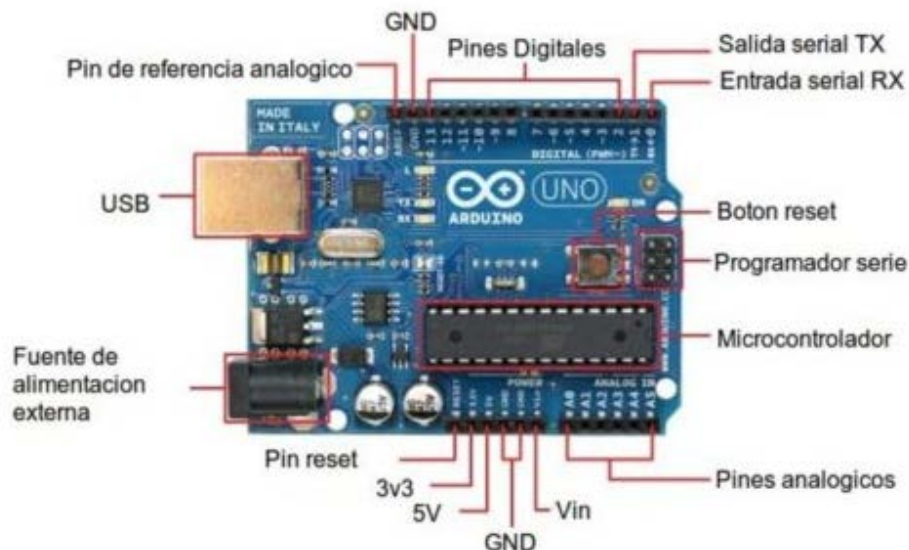


Figura 23: Elementos de una placa Arduino uno.

Arduino es una plataforma de creación a código abierto. Permite crear diferentes tipos de acciones que nos ayudan a cumplir con los fines operativos de cualquier problemática planteada. Consta de una tarjeta que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembras (de entrada, o salida analógica y digitales).

El microcontrolador con el que opera es el modelo ATmega328P. Este cuenta con 8bits de alto desempeño que combina memoria flash ISP de 32 kB con capacidades de lectura mientras se realiza escritura, RAM de 2kB, 23 líneas de E/S, con convertidor A/D de 6 canales y 10 bits. Es usualmente empleado para diferentes tipos de proyectos de electrónica, robótica y mecatrónica.

Alimentación de la placa.

El voltaje de funcionamiento de la tarjeta “Arduino UNO” es de 5V, pero existen varias maneras de alimentar nuestra tarjeta para una vez programado el microcontrolador se pueda quitar la conexión de nuestro computador si así se requiere.

Se puede alimentar de las siguientes maneras.

- Emplear un regulador de voltaje integrado en la placa

- Aplicar directamente un voltaje regulado a la tensión nominal de la placa.

Entradas y salidas digitales

La placa contiene 14 pines hembras de entradas o salidas digitales (dependiendo de los proyectos) y es aquí donde se conectan mediante cables de comunicación como los 'jumpers machos' para que la placa pueda recibir datos de la computadora

Estos pines funcionan a 5V y pueden proveer o recibir un máximo de 40mA y disponer de una resistencia interna de alrededor de 50kΩ.

Entradas analógicas:

Dispone de 6 entradas analógicas (enumeradas desde A0 hasta A5) que reciben voltajes en un rango de valores continuos de entre 0 y 5V, cualquier valor más arriba de este puede dañar de manera permanente tu placa además de tu equipo de cómputo. Pero si se requiere se puede recibir valores digitales desde algún dispositivo, pero se necesita previamente hacer una conversión del valor digital al valor analógico lo más aproximado posible.

Esto se logra armando un circuito conversor analógico/ digital incorporada en la placa. El circuito dispone de 6 canales conversores y cada canal dispondrá de 10 bits de la memoria para guardar un valor del voltaje digitalmente.

Memorias de la placa Arduino:

Cuando se realiza un programa o un sketch (como se conoce en la plataforma) se tiene la necesidad de almacenarlo en alguna parte de la memoria del Arduino, a su vez cuando se ejecuta también se generan datos que se tienen que utilizar y se encuentran dentro de alguna localidad de la memoria.

Existen diferentes tipos de memoria dentro de la placa del arduino, las principales son las siguientes.

- SRAM: es donde la placa crea y manipula las variables cuando se ejecuta. Es un recurso limitado.
- EEPROM: memoria no volátil para mantener datos después de un reset o apagado. Las EEPROMs tienen un número limitado de lecturas/escrituras.
- Flash: Memoria de programa. Usualmente desde 1 kb a 4 Mb. Donde se guarda el sketch.

Software de Arduino:

Es un conjunto de programas de cómputo que almacenan y distribuyen datos, procedimientos y pautas que permiten cumplir tareas de un sistema informático. Comúnmente se utiliza el termino para referirse de forma muy genérica a los programas de un dispositivo informático.

Se le conoce como software de programación a las herramientas que permiten el desarrollo de un nuevo programa, estas no suelen ser utilizadas por el usuario

final sino por los programadores. Es importante mencionar también los siguientes conceptos puestos que muchos softwares vienen integrados los siguientes:

- Compiladores: programas que analizan y ejecutan otros programas.
- Intérpretes: Traduce los diferentes lenguajes de programación.
- Editores de texto o IDE: crean y modifican archivos de texto, lenguaje de programación o código fuente.

En el caso de Arduino, se necesita un IDE que nos permita escribir y editar nuestro programa que se le llama sketch.

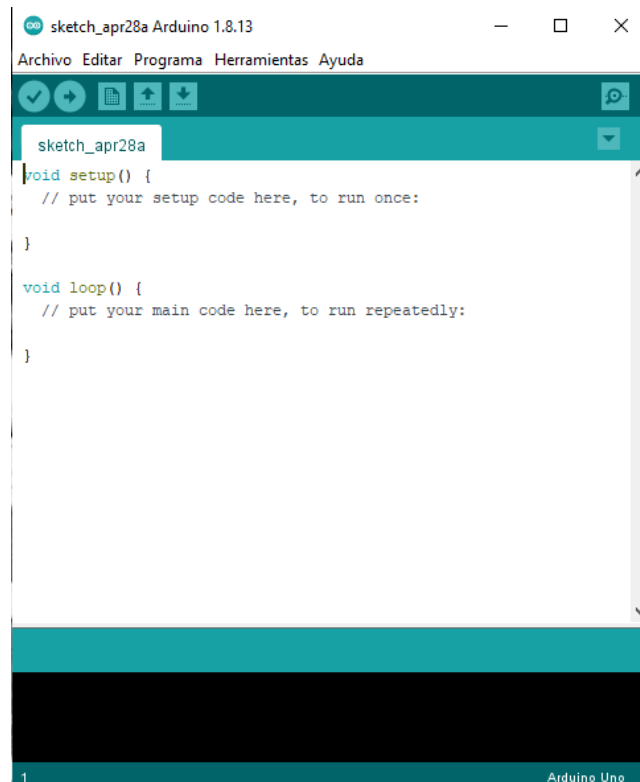


Figura 24: IDE del software de Arduino.

Los programas de Arduino contienen una estructura muy básica de programación y divide la ejecución en dos partes: setup y loop.

La función Setup () se llama cuando se inicia un sketch, donde se incluye la declaración de variables y también es la primera función que se ejecuta en el programa que se desarrolla. Además se usan para inicializar variables, los “PinMode”(modos del pin). Solo se ejecuta una vez, después de cada encendido o reset de la placa Arduino.

La función Loop () incluye el código a ser ejecutado en un ciclo (leyendo las entradas, salidas de la placa, etc). Se usa para controlar activamente la placa Arduino.

Diseño del prototipo:

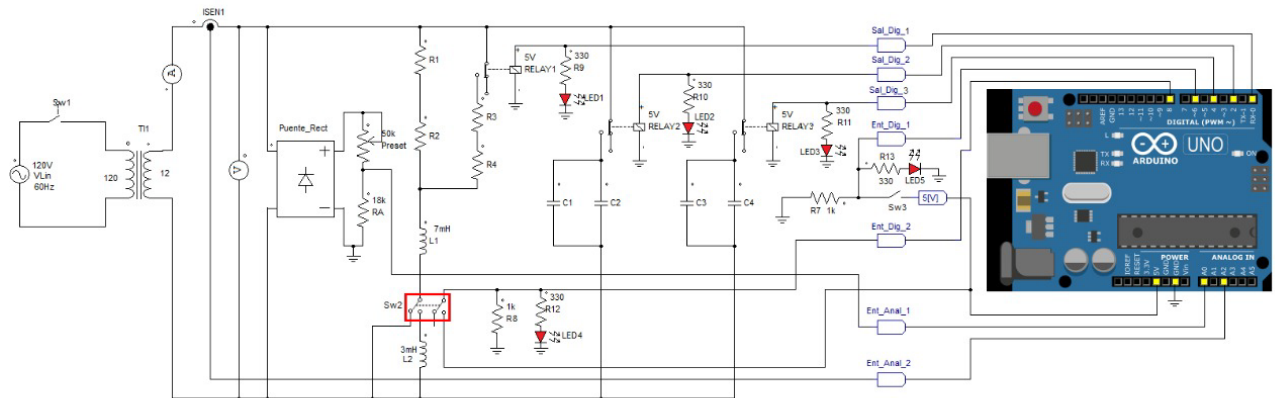


Figura 25: Esquema del prototipo

Como se observa en la figura 23 se realizó un prototipo que simule una carga RL con dos inductancias diferentes. La unidad correctora la haremos por medio de relevadores que conecten dos cargas capacitivas en paralelo de la carga RL esto con el fin de mejorar el factor de potencia sin modificar la potencia activa.

Implementaremos un prototipo que simule un tablero monofásico donde se tienen conectado una resistencia obteniendo un factor de potencia cercano a 1 puesto que estos actúan como resistencias. Con ayuda de dos interruptores se le añadirán al circuito dos inductancias de valores diferentes para atrasar el factor de potencia y después corregirlos con capacitores en paralelo como se muestra en el diagrama

Material y Equipo.

Para el desarrollo del prototipo se necesitarán de los siguientes materiales y equipo.

Tabla 13: Materiales y equipo a emplear.

Número consecutivo	Etiqueta en El diagrama	Cantidad de piezas	Descripción
1	Sw1, Sw2, Sw3	3	Switch miniatura, de palanca, 1 polo, 2 tiros, 2 posiciones, de 3 y 6 Amperes

2	Tf1	1	Transformador de 12 Vca, 3 Amperes, con Tap central
3	Isen1	1	Sensor de corriente de hasta 5[A] ACS712 para aplicaciones con Arduino
4	Puente Rectificador	1	Puente Rectificador 1[A] a 100[V]
5	Preset	1	Trimpot Cuadrado Vertical 25 Vueltas 50K 500mW
6	RA	1	Resistencia De Carbón 18k Ohms 1/2W
7	RELAY1, RELAY2, RELAY3	3	Relevador 1P2T 5VDC 2A
8	R7	1	Resistencia De Carbón 1k Ohms 1/2W
9	Arduino	1	Arduino UNO REV3
10	Protoboard	2	Protoboard de 830 Puntos de Conexión 2 Tiras deslizable
11	Cables para alambrear	2	40 cables macho a macho para Arduino
12	Cable de alimentación	1	Cable USB tipo A/B 1.8 mts
13	multímetro	2	multímetro digital

Transformador:

La figura 24 muestra el transformador que tiene una entrada de 127 Vac y una salida de 12 Vac con un TAP de 6 Vac con una corriente que soporta los 3 A.



Figura 26: Transformador de 127 Vca a 12 Vca

Protoboard:

Es una tablilla de conexiones en los que se insertan elementos pasivos electrónicos y cables con la finalidad de crear circuitos sin la necesidad de soldar

ninguno de los componentes. Estos cuentan con orificios que se conectan entre si formando continuidad entre filas o renglones dependiendo de la marca que se utilice.

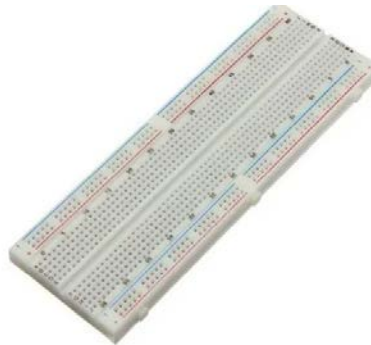


Figura 27: Tablilla de experimentos.

Relevador:

Para la corrección del factor de potencia implementamos el uso de “módulos relé”, Son dispositivos que funcionan como un interruptor o conmutador en circuito electrónico, pero se mantiene separada la parte del circuito que controla las entradas o salidas de activación. Como la parte del circuito es controlada permite de ese modo señales de baja potencia, maniobren mecanismos de potencia elevada.

Está diseñado con 3 pines de conexión; dos de alimentación (Vcc y GND) y un pin de activación el cual permite habilitar o deshabilitar el relevador.

Este dispositivo soporta una carga máxima de hasta 250 Vca a 10 A, o Vcc a 10 A. Puede ser conectado al nivel que se recibe de 127 Vca sin ningún problema.

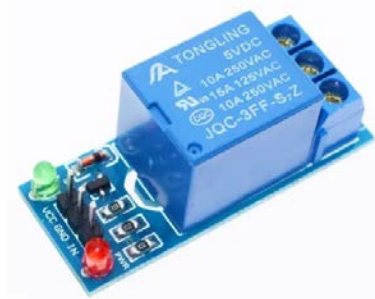


Figura 28: Modulo de un relevador.

Este relevador está formado por una bobina que crea un campo magnético que atrae una pieza metálica, provocando el paso de corriente eléctrica (NO). Cuando no hay circulación de corriente el campo magnético desaparece y la pieza vuelve a su posición original (NC).

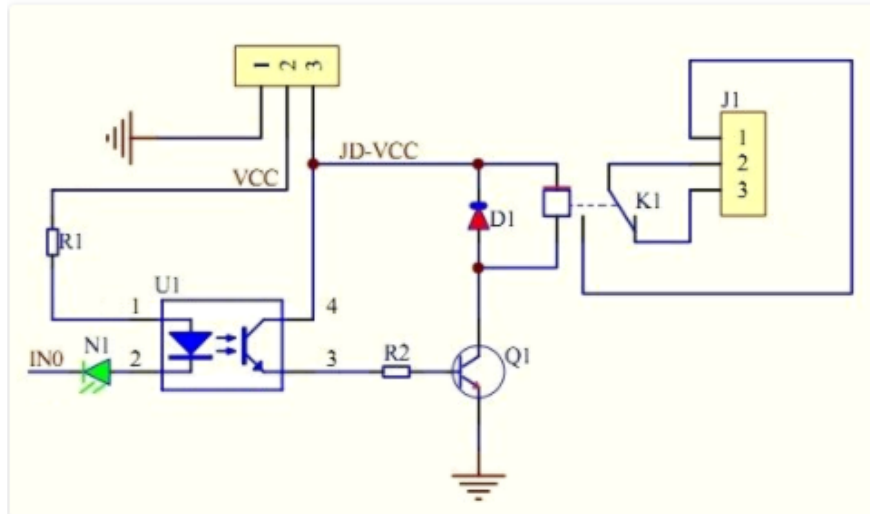


Figura 29: Esquema de un módulo relevador de una pieza

Switch o interruptor:

Un interruptor eléctrico es un dispositivo que permite desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica. En este caso se trata de un interruptor de dos polos dos tiros. Los contactos, normalmente separados, se unen mediante un actuante para permitir que la corriente circule.



Figura 30: Switch dos polos dos tiros.

Sensor de corriente:

Para obtener la corriente eficaz que circula en nuestro circuito se utilizó un sensor de corriente ACS712 disponible para la plataforma Arduino el cual trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula en el conductor que se está midiendo.

El efecto Hall es la aparición de un campo eléctrico por separación de cargas en el interior de un conductor por el que circula una corriente eléctrica gracias a la aparición de un campo magnético. Este campo magnético ejerce una fuerza transversal sobre los portadores de cargas móviles que las empujará hacia un lado

del conductor. La acumulación de cargas en los costados del conductor equilibrara esta fuerza magnética produciendo un voltaje medible entre los lados del conductor.



Figura 31: Sensor ACS712

Pantalla oled:

Un OLED (Organic light-emitting diode) es un tipo de pantalla LED en que la capa que emite está formada por un compuesto orgánico que emite luz en respuesta a la electricidad. Este tipo de dispositivo necesitan un controlador específico que convierta los datos recibidos en señales electrónica para controlar la pantalla. Tienen la ventaja de tener un consumo de energía bajo, en torno a 20mA dado que solo se enciende el píxel necesario y no requieren de backlight.

La comunicación puede realizarse por bus SPI o por bus I2C porque es fácil tener datos de los sensores. Esta pantalla nos será de mucha ayuda pues podemos desplegar los valores de potencia activa, aparente y reactiva. Además, nos daremos cuenta cuando el factor de potencia sea corregido o cumpla con los requerimientos.



Figura 32: Pantalla oled.

Construcción del amperímetro.

La salida del sensor es una tensión proporcional a la corriente e independiente de la temperatura. Existen modelos para rangos de 5 A, 20 A, 30 A. Para fines de

este proyecto se utilizará para un rango de 5 A. El sensor nos entrega un valor de 2.5 V para una corriente de 0 A y a partir de ahí se incrementa la sensibilidad gradualmente. Esta relación entre el voltaje y la corriente se puede representar como una ecuación lineal donde la sensibilidad es la pendiente y la intersección en el eje “Y” es 2.5 voltios. La ecuación de la recta es

$$V = mI + 2.5 \quad (62)$$

Despejando la corriente nos queda la ecuación para hallarla así.

$$I = \frac{V - 2.5}{\text{Sensibilidad}} \quad (63)$$

Gracias a esta ecuación la podremos programar en Arduino.

Para la obtención de nuestra I_{RMS} se hicieron pruebas para obtener la más cercana con la ayuda de un multímetro.

El sensor empleado tiene de rango 5 A y según su ficha técnica tiene una sensibilidad de 185 mV/A, si en dado caso que el sensor tenga otro rango se usará otro valor de sensibilidad.

```
prueba_2$
float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  float voltajeSensor= analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0); //lectura del sensor
  float I=(voltajeSensor-2.5); //Ecuación para obtener la corriente
  Serial.print("Corriente: ");
  Serial.println(I,3);
  delay(200);
}
```

Figura 33: Código para una lectura de 0A



Figura 34: Monitor serie con las lecturas del Sensor

Como se puede ver el sensor presenta ruido para una lectura de 0 A con lo cual se procederá a intentar a hacer lo más pequeña que se pueda.

En la siguiente prueba se aplica un filtro aplicando aritmética en varias lecturas consecutivas; se suman las lecturas y se dividen por el número de lecturas tomadas.

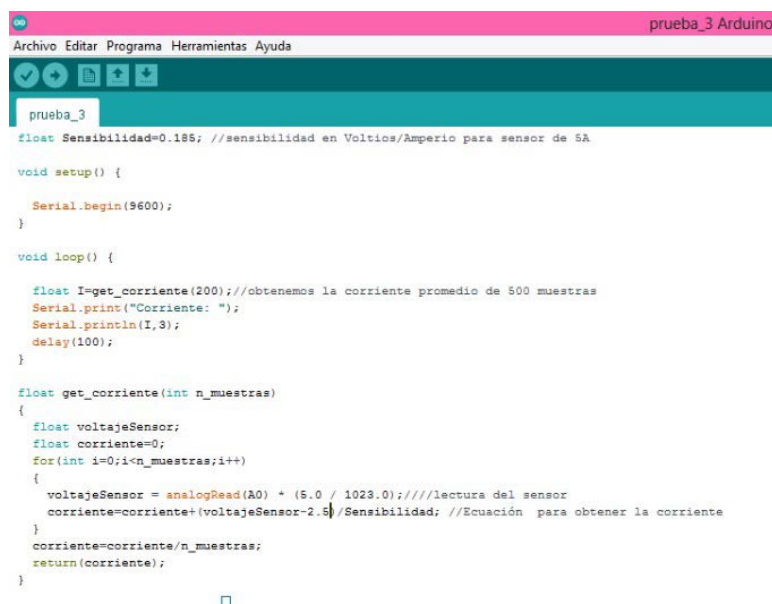


Figura 35: Código de prueba dos.

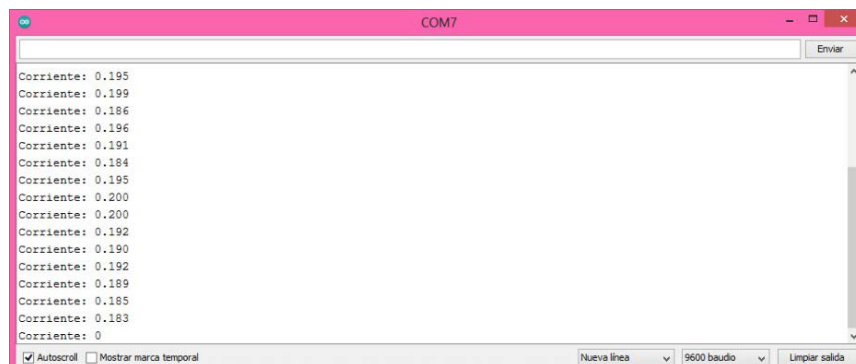


Figura 36: Lecturas del sensor con la prueba dos sin carga.

Como se puede ver sigue llegando ruido al sensor pues el valor debe ser de 0 A y este es cercano a 200 mA. Por lo tanto, al hacer nuestros cálculos en las lecturas es de mucha importancia sustraerlo puesto que es un error demasiado grande y nos puede alejar de nuestros objetivos de aplicación.

Como el error afecta en los cálculos de la I_{RMS} debemos calibrar el sensor de 5 A y obtener los valores reales pues los del fabricante son cercanos. Para obtener la sensibilidad utilizamos la ecuación [63].

Implementamos el siguiente código para obtener el voltaje del sensor para dos pruebas: cuando existe una corriente circulante y cuando no hay carga.

```
prueba_4 Arduino 1.8.1
Archivo  Editor  Programa  Herramientas  Ayuda

prueba_4
void setup() {
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    float voltajeSensor =get_voltage(10000);//obtenemos voltaje del sensor(10000 muestras)
    Serial.print("Voltaje del sensor: ");
    Serial.println(voltajeSensor,3);
}

float get_voltage(int n_muestras)
{
    float voltage=0;

    for(int i=0;i<n_muestras;i++)
    {
        voltage =voltage+analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0);
    }
    voltage=voltage/n_muestras;
    return(voltage);
}
```

Figura 37: Código prueba tres.

Esta fue la lectura del voltaje del sensor que obtuvimos de la herramienta de Arduino monitor serie para una corriente circulante de 0 A.

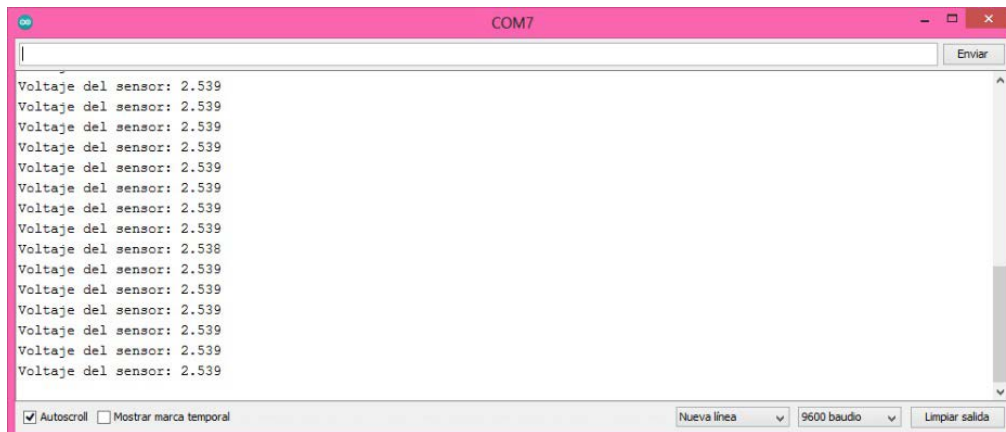


Figura 38: Lecturas de la prueba tres sin carga.

Despues se le conecta una carga de aproximadamente de $7\ \Omega$ con una corriente circulante de 1.373 A tal y como se muestra en la ilustración número [32]



Figura 39: Corriente generada para la prueba tres con carga.

Y se obtuvieron las siguientes medidas del sensor.

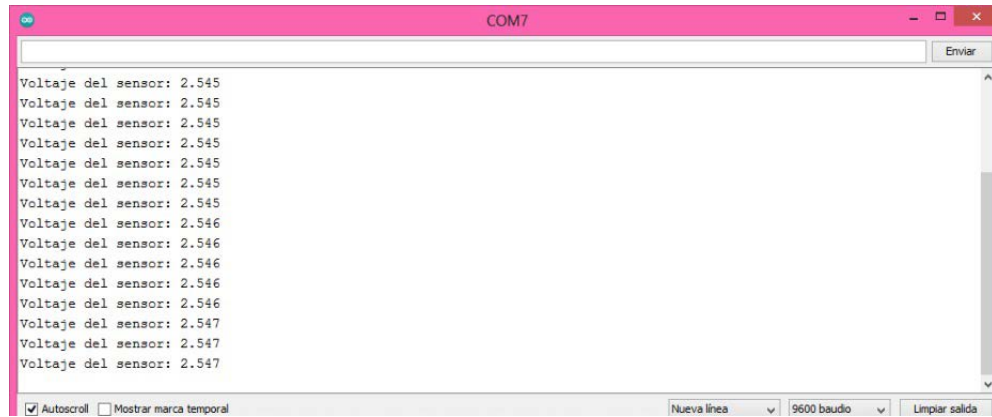


Figura 40: Lecturas de la prueba tres con una carga de aproximadamente 7Ω

A partir de los puntos se calcula la sensibilidad de la siguiente manera.

$$\text{Sensibilidad} = m = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{2.547 - 2.539}{1.373 - 0} = 0.0058 \text{ V/A}$$

Ahora solo se aplica en el programa para obtener la corriente RMS.

El algoritmo del siguiente programa realiza mediciones durante medio segundo, lo cual equivale a realizar medidas durante 30 ciclos (60 hz). A este resultado se le resta la amplitud del ruido que previamente determinamos.

Para disminuir más el ruido se aplica un filtro “pasa baja” que realiza el promedio de 10 muestras.

$$\text{corriente} = 0.9 * \text{corriente} + 0.1 \left(\frac{\text{voltajesensor} - 2.5}{\text{Sensibilidad}} \right); \quad (64)$$

Obteniendo la siguiente grafica de la corriente.

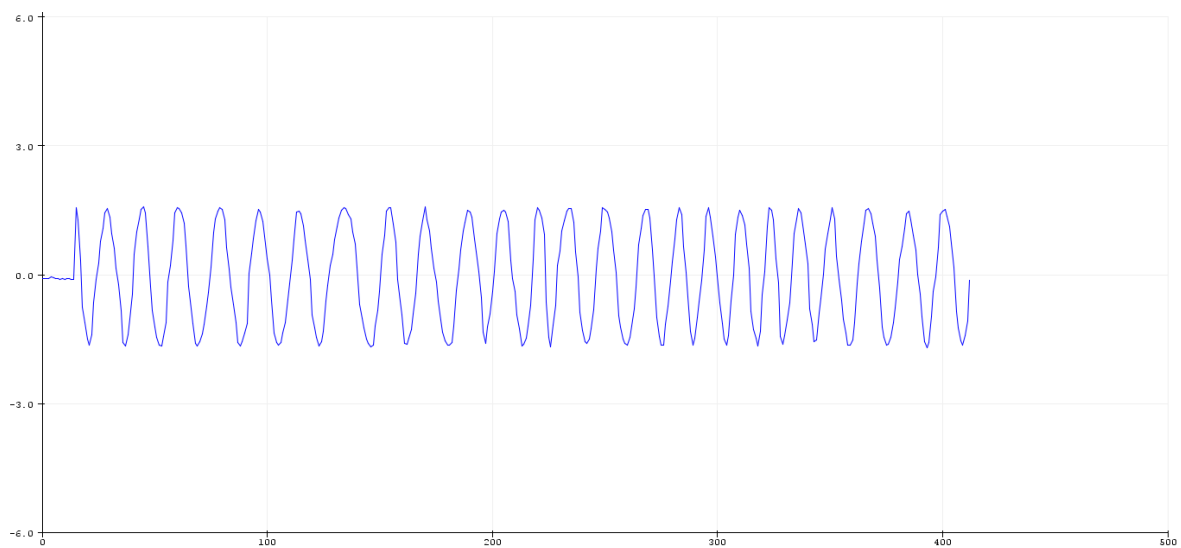


Figura 41: Onda de corriente.



```

Corriente_RMS_prueba
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

float Sensibilidad=0.134; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor
float offset=0.100; // Equivale a la amplitud del ruido
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  float Ip=0; //obtenemos la corriente pico
  float Irms=0; //Intensidad RMS = Ipico/(2*1/2)
  float corrienteSensor;
  float corriente=0;
  long tiempo=millis();
  float Imax=0;
  float Imin=0;

  while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
  {
    corrienteSensor = analogRead(A0)*(5.0)/(1023.0);//lectura del sensor
    corriente=0.9*corriente+0.1*((corrienteSensor-2.545)/Sensibilidad); //Ecuación para obtener la corriente
    if(corriente>Imax) Imax=corriente;
    if(corriente<Imin) Imin=corriente;
  }
}

```

Figura 42: Implementación del código para la obtención de la corriente eficaz

Cuando el sensor realiza una lectura se obtiene un valor al instante, el valor oscila con una frecuencia de 60 Hz. Los valores maximos serán las corrientes picos. La corriente pico se calcula mediante la ecuación 65.

$$I_p = \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{2} \right) - offset; \quad (65)$$

Una vez encontrado el valor pico en un instante determinado, se calcula Irms con la ecuación 66

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}; \quad (66)$$

```

Ip=(( (Imax-Imin)/2)-offset);
Irms=Ip/sqrt(2);

Serial.print("Ip: ");
Serial.print(Ip,3);
Serial.print("A , Irms: ");
Serial.print(Irms,3);
Serial.println("A");
delay(500);
}

```

Figura 43: Implementación del código para la obtención de la corriente eficaz

Notar que la sensibilidad no es la misma a la que se calculó. Al ser una constante propuesta, se puede variar hasta encontrar un valor que nos permita calcular la corriente eficaz más cercana.

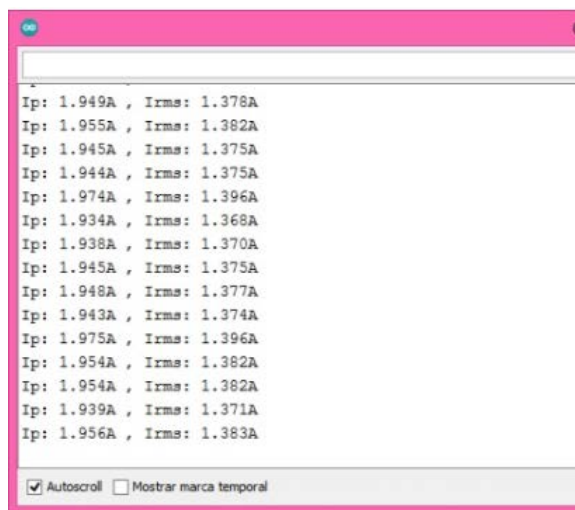


Figura 44: Lecturas obtenidas del sensor de la corriente eficaz

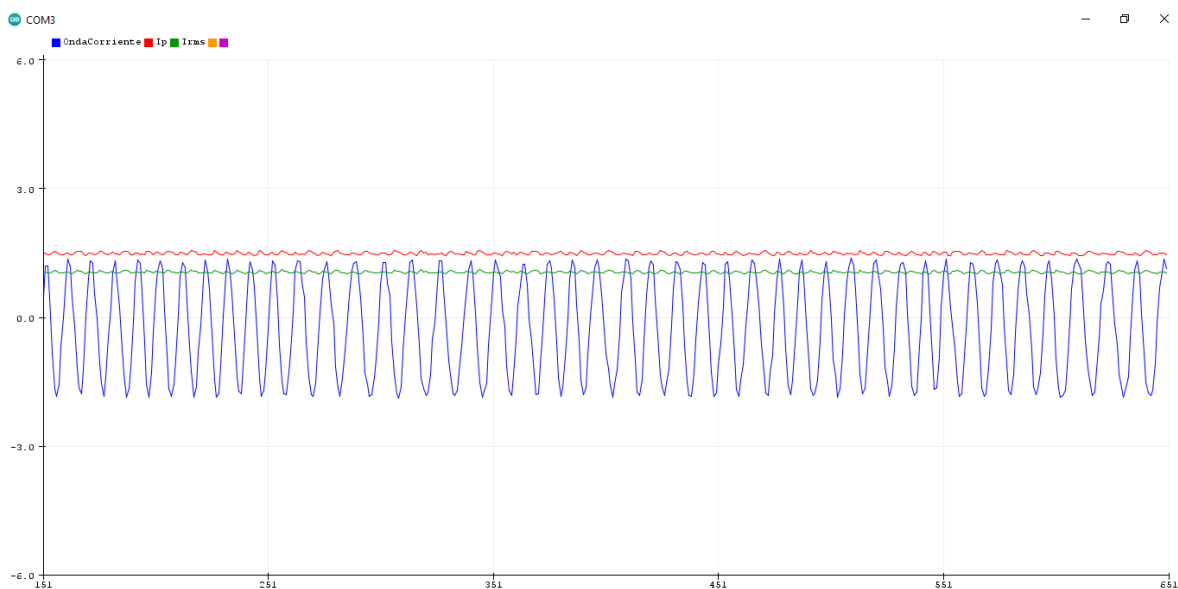


Figura 45: Onda de corriente(azul), corriente pico(roja) y corriente eficaz(verde)

Comprobando que el algoritmo empleado cumple con el criterio se conectó un multímetro en serie con el ACS712 que sensa la corriente alterna de manera correcta.

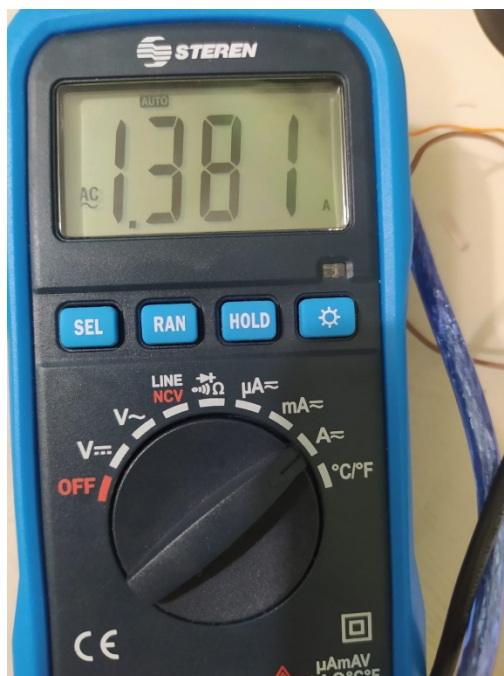


Figura 46: Corriente Real que circula en el circuito.

Construcción del voltímetro.

Para la construcción del voltímetro se utilizó un puente rectificador de media onda, un preset de $100\text{k}\Omega$ y una resistencia de $15\text{k}\Omega$.

El puente rectificador también conocido puente rectificador de diodos, es un dispositivo eléctrico que transforma corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Es muy utilizado a nivel industrial y a nivel doméstico como en los teléfonos móviles.

Los diodos son unos dispositivos que permite el flujo eléctrico en un solo sentido y cada puente rectificador lleva al menos cuatro diodos. Para que produzca la rectificación, se tienen que conectar los cuatro diodos en una disposición específica llamada configuración de rectificación.

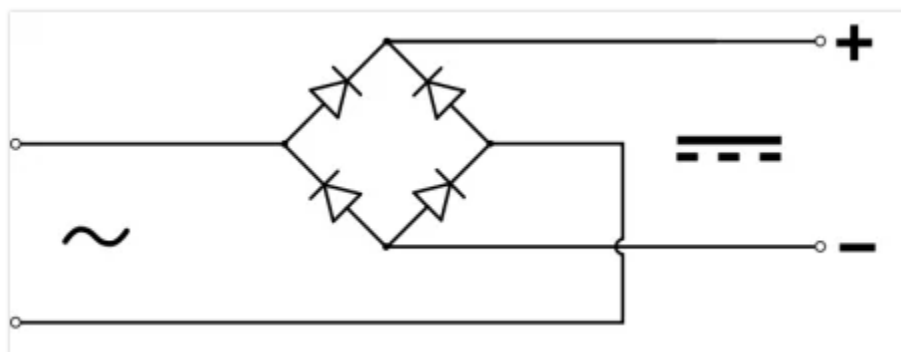


Figura 47: Configuración de rectificación de cuatro diodos

La polaridad positiva y la negativa son desviadas siempre en los diodos de salida. La corriente de entrada alterna de polaridad, pero la polaridad de salida es continua.

La señal eléctrica de salida se crea en forma de pulsos y fundan la llamada media onda de rectificación. Antes de utilizarla la señal de corriente es necesario estabilizarla para formar una señal de corriente DC completa. Si se requiere la señal puede pasar por un amplificador antes de abandonar el puente rectificador.

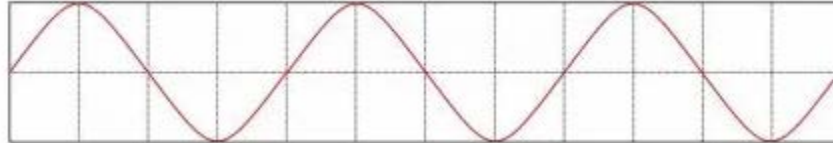


Figura 48: Señal sinusoidal

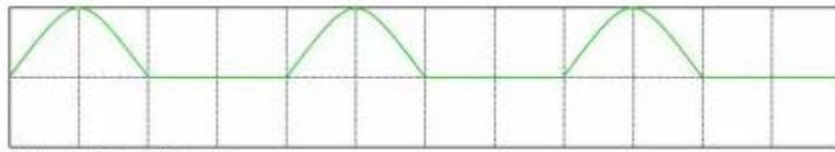


Figura 49: Media-onda de rectificación

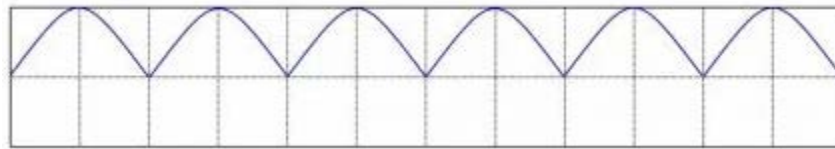


Figura 50: Onda de rectificación completa.

El puente rectificador de media onda que se utilizó para obtener el Voltaje eficaz es de 4 diodos



Figura 51: Rectificador de media onda.

Una vez rectificada la señal aplicada se obtuvo 12 V de corriente directa puesto que la placa de arduino solo lee señales de ciclos positivos.

El siguiente paso fue aplicar un divisor de voltaje con un “trimpot preset” de 10kΩ que sirve como una resistencia variable y junto una resistencia de 15kΩ, dispersamos el voltaje para que a tierra obtengamos 3.11 V puesto que solo el arduino acepta lecturas de voltajes menores a 5 V.



Figura 52: Trimpot o resistencia variable de 10kΩ

Obteniendo el siguiente circuito en la tablilla de experimentos.

Figura 53: Circuito para la obtención del voltaje eficaz

Una vez armado el circuito se procedió a implementar el programa que con ayuda a nuestro algoritmo implementado para la obtención de la V_{RMS} , modificamos la “sensibilidad” y nuestro filtro que nos queda de la siguiente forma.

$$voltaje = 0.9 * voltaje + 0.1 * ((voltajeSensor) * (ajuste)); \quad (67)$$

Y teniendo una onda completa de un filtro de 10 muestras. Y se ve de la siguiente forma.

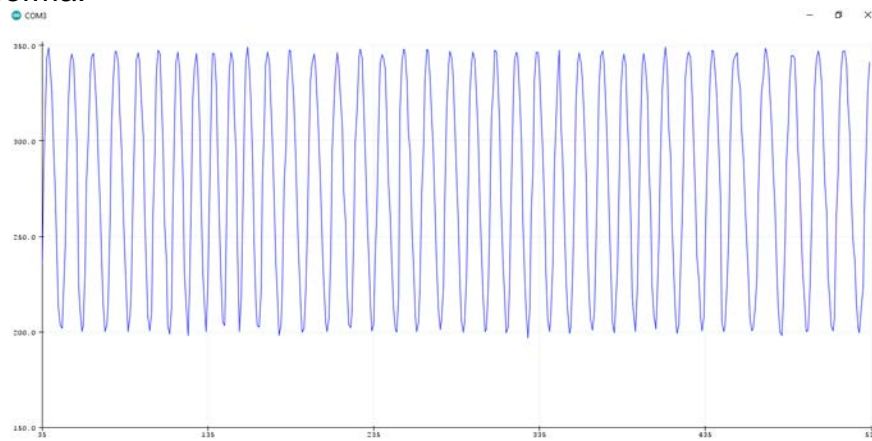


Figura 54: Onda de voltaje

Como la corriente oscila a una frecuencia de 60 Hz, los valores máximos que se encuentran son los voltajes pico. Estos valores son los que se deberán obtener. Es por eso que se aplica la siguiente ecuación.

$$V_p = (V_{max} - V_{min}) + 2.2; \quad (68)$$

Se encuentran los voltajes máximos, mínimos y se restan entre ellos. Además, se le suman 2.2V que son las pérdidas que hay en los diodos



```

voltaje_RMS_prueba2 Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

voltaje_RMS_prueba2

float ajuste=4.135; //variable para ajustar el voltaje promedio leído al voltaje pico real //se obtuvo al dividir 12.12/3.12

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  float voltajeSensor;
  float voltaje=0;
  long tiempo=millis();
  float vmax=0;
  float vmin=0;
  float Vp=0;
  float Vrms=0;
  float Vmed=0;
  float P=0;
  float cruce=0; // Es cuando se detecta el cruce por cero

  while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
  {
    voltajeSensor = analogRead(A2) * (5.0 / 1023.0); //lectura del sensor
    voltaje=0.9*voltaje+0.1*((voltajeSensor)*(ajuste)); //Ecuación para obtener la ecuacion del voltaje
    if(voltaje>vmax)vmax=voltaje;
    if(voltaje<vmin)vmin=voltaje;
  }
}

```

Figura 55: Código para la obtención del Voltaje eficaz.

Una vez calculado el voltaje pico cada medio segundo se sigue a calcular el Vrms con la siguiente ecuación.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}; \quad (69)$$

```

    }

    Vp=((vmax-vmin)+2.2); //obtenemos la corriente pico
    Vrms=Vp/sqrt(2); //voltaje RMS = Vpico/(2^1/2)
    Vmed=(2*Vp)/3.1415927;
    F=1*Vrms; // F=IV watts
    Serial.print("Vp: ");
    Serial.print(Vp,3);
    Serial.print("V , Vprom: ");
    Serial.print(Vmed,3);
    Serial.print("V, Vrms: ");
    Serial.print(Vrms,3);
    Serial.println("V");

    delay(500);
}

```

Figura 56: Continuación del código.

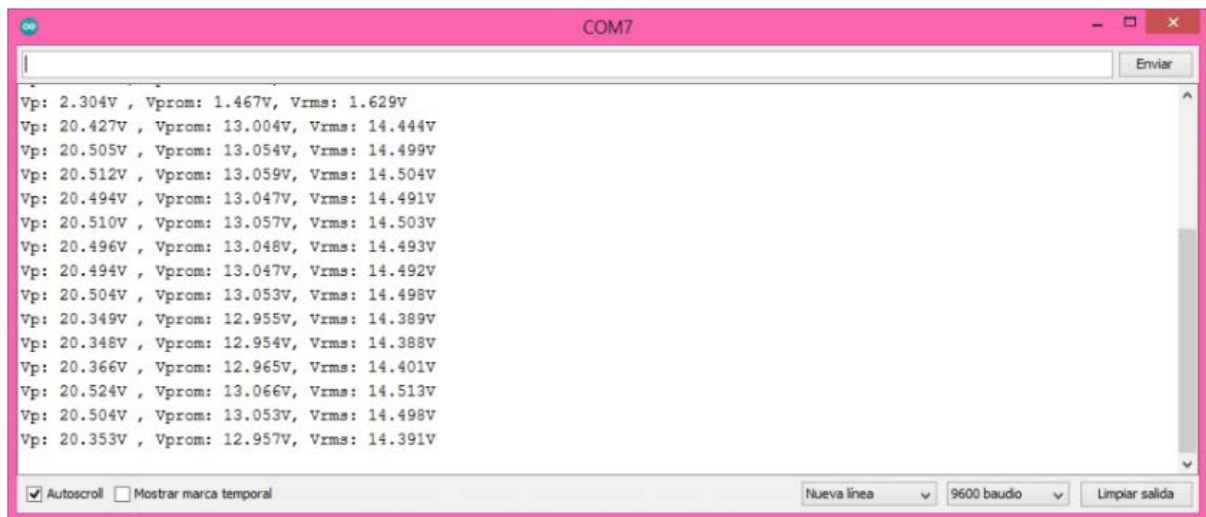


Figura 57: Voltaje eficaz obtenido por el algoritmo implementado

Y se tienen las siguientes formas de onda del voltaje, voltaje pico y voltaje eficaz respectivamente.

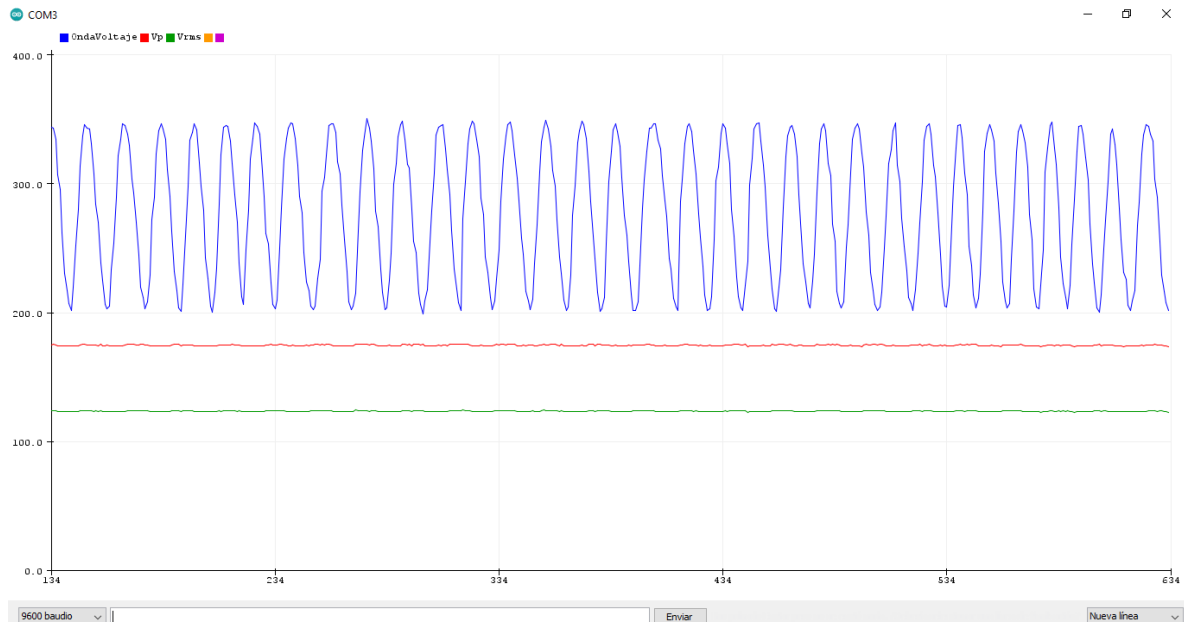


Figura 58: Formas de onda obtenidas por el Arduino en el puerto serial

Se pone un voltímetro en paralelo con la fuente para demostrar que el algoritmo empleado funciona.



Figura 59: Voltaje eficaz real.

Obtención del factor de potencia.

Para la obtención del factor de potencia se utilizó un algoritmo que sea capaz de detectar el cruce por cero de la onda de voltaje y la onda de corriente. Como ya se había planteado, la finalidad del proyecto es simular una carga mayoritariamente inductiva porque en condiciones normales tiene un factor de potencia atrasado.

Teóricamente una carga resistiva produce un factor de potencia unitario lo que quiere decir que la onda de voltaje junto a la onda de la corriente se encuentra en fase.

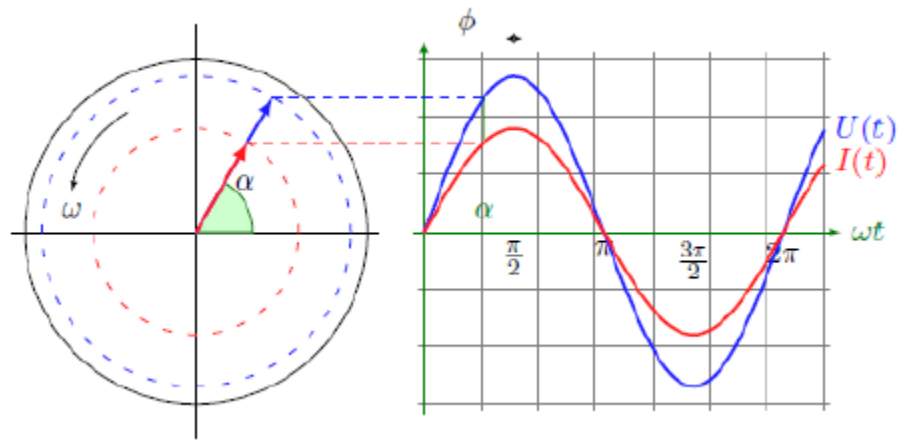


Figura 60: Carga resistiva

En el caso de una carga inductiva la onda de corriente se encuentra atrasada con respecto la onda de voltaje, esto quiere decir que produce un angulo de desfaseamiento. Este angulo de desfaseamiento dependera del valor del factor de potencia que este produzca

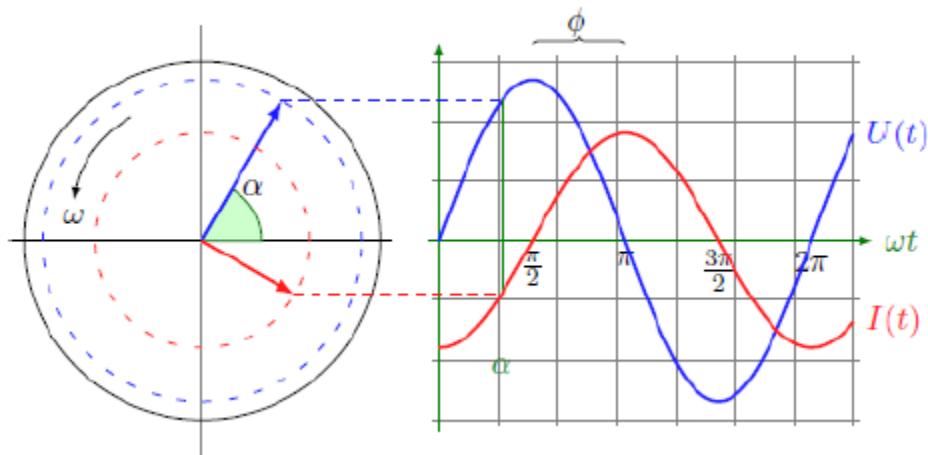


Figura 61: Carga inductiva

Se crea una tabla calculando las diferentes potencias con ayuda de los valores que en teoría debería de tener el material. Utilizando un transformador de 12 Vac junto con una resistencia de 7Ω en serie con la inductancia de 7mH. Obteniendo como resultados los siguientes valores. Cabe resaltar que la unidad compensadora se está diseñado para mejorar el factor de potencia aproximadamente de 0.99.

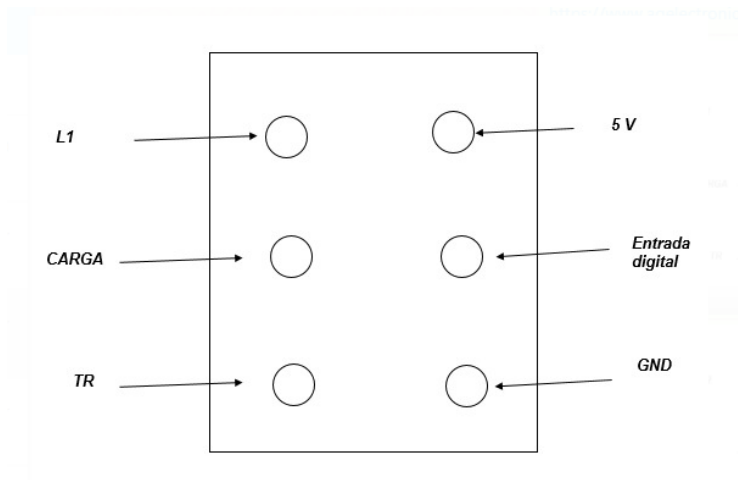


Figura 62: Interruptor empleado.

Se emplea un interruptor que inicialmente está en posición con el fin de mostrar solo la carga resistiva. Accionando el interruptor libera los primeros siete inductores conectándolos en serie con las resistencias para tener un factor de potencia de 0.93 tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14: Valores calculados para nuestro prototipo con una carga RL para que nos muestre un factor de potencia de 0.93

Potencia Activa	P	20.57142857 [W]
Irms	I	1.71 [A]
Potencia Reactiva	Q	7.76E+00 [VAR's]
Potencia aparente	S	21.98471087[VA]
Factor de potencia	FP	9.36E-01
Potencia aparente nueva	S₂	20.78 [VA]
Potencia reactiva nueva	Q₂	0.93 [VAR's]
Potencia reactiva compensadora	Q_c	6.83[VAR's]

Capacitores utilizados	C	1.2576E-04 [C]
------------------------	----------	-------------------------

Para el siguiente paso se creó otro escenario del factor de potencia y usando otro interruptor conectando el resto de los inductores dando como resultado un factor de potencia bajo con valor de 0.88. Los tornillos del lado izquierdo formaran parte del arreglo de la circuito de potencia y los del lado de la derecha formaran parte del microcontrolador.

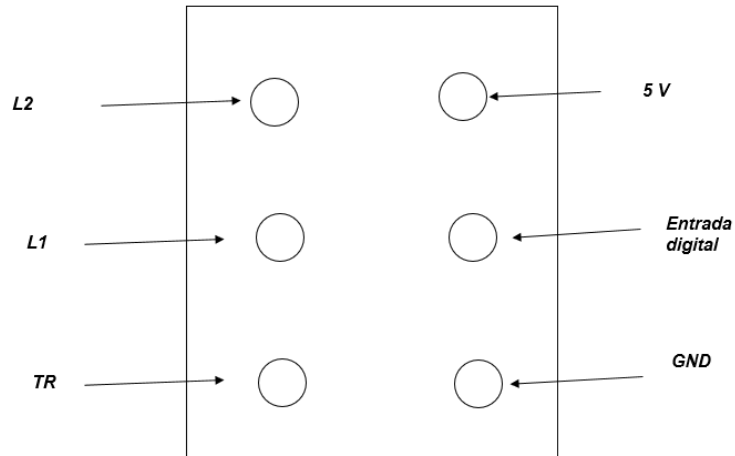


Figura 63: Esquema de conexión del Switch "2"

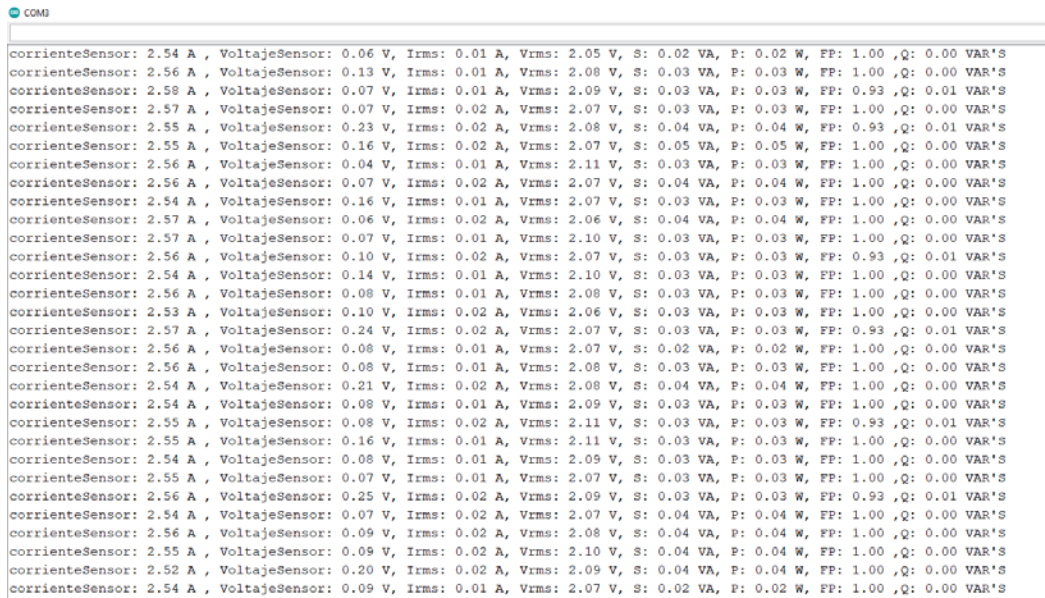
Una vez activado el interruptor obtendremos valores cercanos a los calculados en la tabla número 2.

Tabla 15: Valores calculados para nuestro prototipo con una carga RL que produce un factor de potencia de 0.88

<i>Potencia Activa</i>	P	20.57142857 [W]
<i>I_{rms}</i>	I	1.71 [A]
<i>Potencia Reactiva</i>	Q	1.11E+01[VAR's]
<i>Potencia aparente</i>	S	23.36506368[VA]
<i>Factor de potencia</i>	FP	8.80E-01
<i>Potencia aparente nueva</i>	S₂	20.78[VA]
<i>Potencia reactiva nueva</i>	Q₂	0.93[VAR's]
<i>Potencia reactiva compensadora</i>	Q_c	10.15[VAR's]

Capacitores utilizados	C	1.8699E-04 [C]
------------------------	---	----------------

Implementándolo en el microcontrolador se tuvo que medir el desfaseamiento que existe entre la onda de voltaje y la onda con respecto a corriente. Esto se logró a través de medir el tiempo en que la onda de voltaje tarda en cruzar el cero. Lo mismo sucede para la onda de corriente y para lograr esto fijamos un parámetro donde los sensores captan señales cuando el circuito se encuentra sin excitación; es decir, con un voltaje de cero volts y una corriente circulante de cero Amperes.



Iteration	corrienteSensor	VoltajeSensor	Irms	Vrms	S	P	FF	Q
1	2.54 A	0.06 V	0.01 A	2.05 V	0.02 VA	0.02 W	1.00	0.00 VAR'S
2	2.56 A	0.13 V	0.01 A	2.08 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
3	2.58 A	0.07 V	0.01 A	2.09 V	0.03 VA	0.03 W	0.93	0.01 VAR'S
4	2.57 A	0.07 V	0.02 A	2.07 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
5	2.55 A	0.23 V	0.02 A	2.08 V	0.04 VA	0.04 W	0.93	0.01 VAR'S
6	2.55 A	0.16 V	0.02 A	2.07 V	0.05 VA	0.05 W	1.00	0.00 VAR'S
7	2.56 A	0.04 V	0.01 A	2.11 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
8	2.56 A	0.07 V	0.02 A	2.07 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
9	2.54 A	0.16 V	0.01 A	2.07 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
10	2.57 A	0.06 V	0.02 A	2.06 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
11	2.57 A	0.07 V	0.01 A	2.10 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
12	2.56 A	0.10 V	0.02 A	2.07 V	0.03 VA	0.03 W	0.93	0.01 VAR'S
13	2.54 A	0.14 V	0.01 A	2.10 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
14	2.56 A	0.08 V	0.01 A	2.08 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
15	2.53 A	0.10 V	0.02 A	2.06 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
16	2.57 A	0.24 V	0.02 A	2.07 V	0.03 VA	0.03 W	0.93	0.01 VAR'S
17	2.56 A	0.08 V	0.01 A	2.07 V	0.02 VA	0.02 W	1.00	0.00 VAR'S
18	2.56 A	0.08 V	0.01 A	2.08 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
19	2.54 A	0.21 V	0.02 A	2.08 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
20	2.54 A	0.08 V	0.01 A	2.09 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
21	2.55 A	0.08 V	0.02 A	2.11 V	0.03 VA	0.03 W	0.93	0.01 VAR'S
22	2.55 A	0.16 V	0.01 A	2.11 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
23	2.54 A	0.08 V	0.01 A	2.09 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
24	2.55 A	0.07 V	0.01 A	2.07 V	0.03 VA	0.03 W	1.00	0.00 VAR'S
25	2.56 A	0.25 V	0.02 A	2.09 V	0.03 VA	0.03 W	0.93	0.01 VAR'S
26	2.54 A	0.07 V	0.02 A	2.07 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
27	2.56 A	0.09 V	0.02 A	2.08 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
28	2.55 A	0.09 V	0.02 A	2.10 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
29	2.52 A	0.20 V	0.02 A	2.09 V	0.04 VA	0.04 W	1.00	0.00 VAR'S
30	2.54 A	0.09 V	0.01 A	2.07 V	0.02 VA	0.02 W	1.00	0.00 VAR'S

Figura 64: Valores de los sensores de corriente y voltaje con el circuito sin excitación.

Como se observa en la ilustración anterior el sensor del corriente recibe valores de 2.48 y 2.57; en cambio el sensor del voltaje recibe valores mayores a 0 pero menores a 0.22.

```

if((voltajeSensor>=0.0) && (voltajeSensor<=0.22)){
  tiempoinicial=millis();
}
if((corrienteSensor >= 2.48) && (corrienteSensor <= 2.57)){
  tiempofinal=millis();
}

```

Figura 65: Algoritmo implementado en Arduino.

Cuando la placa de Arduino capte el tiempo entre el parámetro fijado en el sensor de voltaje lo guarde en una variable llamada “tiempoinicial”; lo mismo con el sensor de corriente, pero en su caso guardara el tiempo en una variable denominada “tiempofinal”. Es importante saber que estos valores se estarán midiendo cada medio segundo. Una vez teniendo el tiempo guardado en cada

variable respectivamente se procede a calcular la diferencia entre estos dos valores y se divide entre mil para tener el resultado en segundos

```
duracion=abs((tiempofinal-tiempoinicial)/1000);
```

Figura 66: Ecuación que calcula la duración del desfase.

Para una frecuencia de 60 Hz, se sabe que una onda sinusoidal recorre 180° o π radianes en 8.33ms. Por eso con una simple regla de tres se calcula el valor en radianes y se guarda en una variable.

```
radianes=(duracion*PI)/0.00833;
```

Figura 67: Ecuación para calcular los radianes del desfasamiento

Una vez calculado el ángulo de desfasamiento entre la onda de voltaje y la de corriente se aplica la siguiente fórmula.

```
P=S*abs(cos(radianes));
```

Figura 68: Ecuación de la potencia activa.

Calculada la potencia activa solamente se divide entre la Potencia aparente obtenida del cálculo de los valores eficaces obtenidos en las rutinas de “construcción del voltímetro” y “construcción del amperímetro” como se muestra en la figura 67.

```
FP=P/S;
```

Figura 69: Ecuación del factor de potencia

```
Vrms: 13.82 V, Irms: 0.77 A, S: 10.64 VA, P: 9.89 W, FP: 0.93 ,Q: 3.92 VAR'S
Vrms: 13.82 V, Irms: 0.75 A, S: 10.39 VA, P: 7.57 W, FP: 0.73 ,Q: 7.11 VAR'S
Vrms: 13.83 V, Irms: 0.77 A, S: 10.67 VA, P: 9.92 W, FP: 0.93 ,Q: 3.93 VAR'S
Vrms: 13.84 V, Irms: 0.76 A, S: 10.46 VA, P: 9.73 W, FP: 0.93 ,Q: 3.85 VAR'S
```

Figura 70: Monitor serial donde se muestra la obtención del FP, Potencia Activa y potencia Reactiva.

Corrección del factor de potencia.

Una vez obtenido el factor de potencia se plantearon dos casos de corrección.

- Se conectó dos resistencias equivalentes a 7Ω con 7 inductores. Esto para lograr un factor de potencia atrasado de 0.93
- Con ayuda de un interruptor se le conectan 3 inductores más para tener una caga RL. Con esto se logra un factor de potencia alrededor de 0.88

Como se explicó en las tablas, se necesitan 125.76uF y 186.99uF respectivamente para tener aproximadamente un factor de potencia cercano al 0.99. No existen capacitancias con valores exactos de los que se requieren.

Se implementó dos arreglos de capacitores electrolíticos con un voltaje de operación entre los 25 volts a los 50 volts que son los que comercialmente se encontraron

Caso 1:

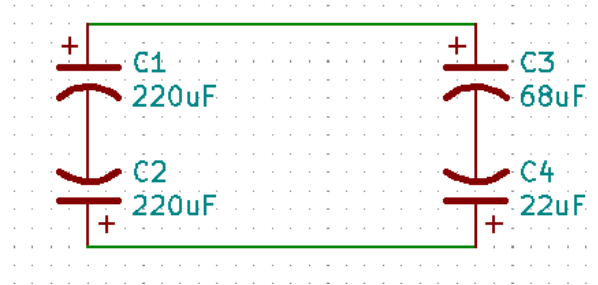


Figura 71: Arreglo de capacitores para el caso 1

Caso 2:

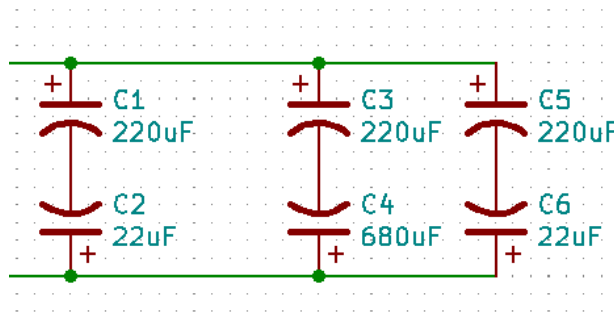


Figura 72: Arreglo de capacitores para el caso 2

Teniendo el circuito conectado se implementa el algoritmo para que al cumplirse ciertos parámetros el relay 2 y el relay 3 se activen para compensar la potencia reactiva, mejorando el factor de potencia a un valor mayor a 0.95.

En el desarrollo del código se crean parámetros de acuerdo con el factor de potencia que se está censando. Para que se accione el relevador

```

}else if((FP<= 0.95)&&(FP >=0.93)){

    digitalWrite(Rele1,LOW);
    digitalWrite(Rele2,HIGH);
    digitalWrite(ReleDesbalance,HIGH);
    //delay(2000);

}else if(FP < 0.93){
    digitalWrite(Rele1,LOW);
    digitalWrite(Rele2,LOW);
    digitalWrite(ReleDesbalance,HIGH);
    //delay(2000);
}

```

Figura 73: Código para inyectar carga reactiva.

Como se muestra en la Ilustración pasada se activará el relevador uno cuando el factor de potencia se encuentre de la siguiente manera: $0.93 \geq FP < 0.95$. Cuando el factor de potencia sea menor a 0.93, los relevadores dos y tres se activarán para inyectar capacitancia en paralelo compensando el circuito y al fin alcanzando el balance reactivo de manera satisfactoria.

```

Vrms: 14.47 V, Irms: 1.41 A, S: 20.39 VA, P: 20.38 W, FP: 1.00
Vrms: 13.97 V, Irms: 1.03 A, S: 14.43 VA, P: 14.43 W, FP: 1.00
Vrms: 13.96 V, Irms: 1.01 A, S: 14.07 VA, P: 14.07 W, FP: 1.00

```

Figura 74: Monitor serial del Arduino.

CONCLUSIONES.

- Se logró comprobar teóricamente el algoritmo de corrección de factor de potencia y balanceo de cargas, aplicando a el servicio de ayudas visuales de los aeropuertos ASA
- En la implementación del prototipo se presentaron dificultades técnicas basadas en la poca disponibilidad de equipo de experimentación
- La metodología aplicada será muy similar para todos los escenarios restantes de los aeropuertos de Servicios Auxiliares ASA.
- El prototipo funciona eficientemente para cargas con factor de potencia atrasado (CASO GENERAL DE APLICACIÓN) con escenarios de factores de potencia comprendidos de 0.86 a 0.93 (en atraso)
- Uno de los principales contratiempos que se encontró en el desarrollo de este proyecto fue en el prototipo. Debido a la disponibilidad de los materiales, equipo de medición que se necesitaban para obtener gráficas y valores que pudiera mostrar el desfase de las ondas para los diferentes tipos de cargas. Además, los cálculos que el Arduino realizaba gracias al código desarrollado tendrían mucha similitud y nos servirían de parámetro con nuestros cálculos teóricos.
- Es necesario recalcar que en las rutinas para la obtención de Voltaje eficaz, Corriente eficaz y el factor de potencia los valores resultaron muy inestables porque los sensores electrónicos son sensibles al contacto y al tratarse de un prototipo a escala los errores por muy mínimos que llegasen a ser, afectaban en los cálculos. Tratándose de sensores análogos, la plataforma Arduino solo recibía pulsos de voltaje en corriente directa se tuvo que desarrollar filtros para obtener el valor más cercano al real. Para comprobar se utilizó un multímetro digital.
- Al conectarse los toroides producían una caída de tensión provocaban una caída de tensión en nuestro circuito alterando la corriente eficaz y en nuestros cálculos teóricos.
- En la inyección de potencia reactiva se conectaron capacitores electrolíticos uniendo ambos polos negativos y dejando los polos positivos porque los capacitores cerámicos famosos por no tener polaridad; su capacitancia es demasiada baja para nuestros fines.
- La aplicación de la metodología propuesta a cada instalación en particular, representará una infraestructura en que en algunas terminales la distribución de iluminación es distinta, también el flujo de aviones en cada aeropuerto varía de acuerdo con la localidad; climas y horarios de operación. Todo esto hace que la demanda de corriente sea distinta y el desbalance entre las líneas que existen sea mayor que otro.

REFERENCIAS DOCUMENTALES

- [1] C. R. d. Energía., «Disposiciones Generales para la operación en Estado Operativo Normal del SEN (OP),» de *Código de Red*, 2016.
- [2] C. R. d. Energía, «Requerimientos del Código de Red para Centros de Carga,» *Código de Red*, 2016.
- [3] M. N. Sadiku, «Circuitos trifásicos,» de *Fundamentos de circuitos eléctricos.*, 2006.
- [4] J. William H. Hayt, «Circuitos Polifásicos.,» de *Análisis de circuitos en ingeniería.*
- [5] C. F. d. Electricidad, «Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica,» *Especificación CFE L0000-45*, 2005.
- [6] «De las Tarifas Reguladas, los Precios y Contraprestaciones,» *Reglamento de la Ley de la industria eléctrica.*, 2014.
- [7] J. E. K. S. M. D. William H. Hayt, *Análisis de circuitos en ingeniería*, Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [8] M. N. Charles K. Alexander, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, Ciudad de México: McGraw-Hill, 2006.
- [9] N. M. SAC, «NAYLAMP MECHATRONICS SAC,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html. [Último acceso: 15 03 2021].
- [10] «Bitwise Ar,» 2017 febrero 12. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/c/BitwiseAr/videos>. [Último acceso: 2021 Abril 15].
- [11] D. V. M. José Pinto Lemus, *Diseño y construcción de un dispositivo corrector automático del factor de potencia*, Chile, 2015.

APÉNDICE 1.

Como complemento del proyecto se elaboró un programa en la plataforma de Fortran que nos calcula de manera numérica la corrección del factor de potencia y el desbalance para un tablero de tres fases.

El programa contará con 5 subrutinas, 3 módulos con diferentes tipos de variables globales.

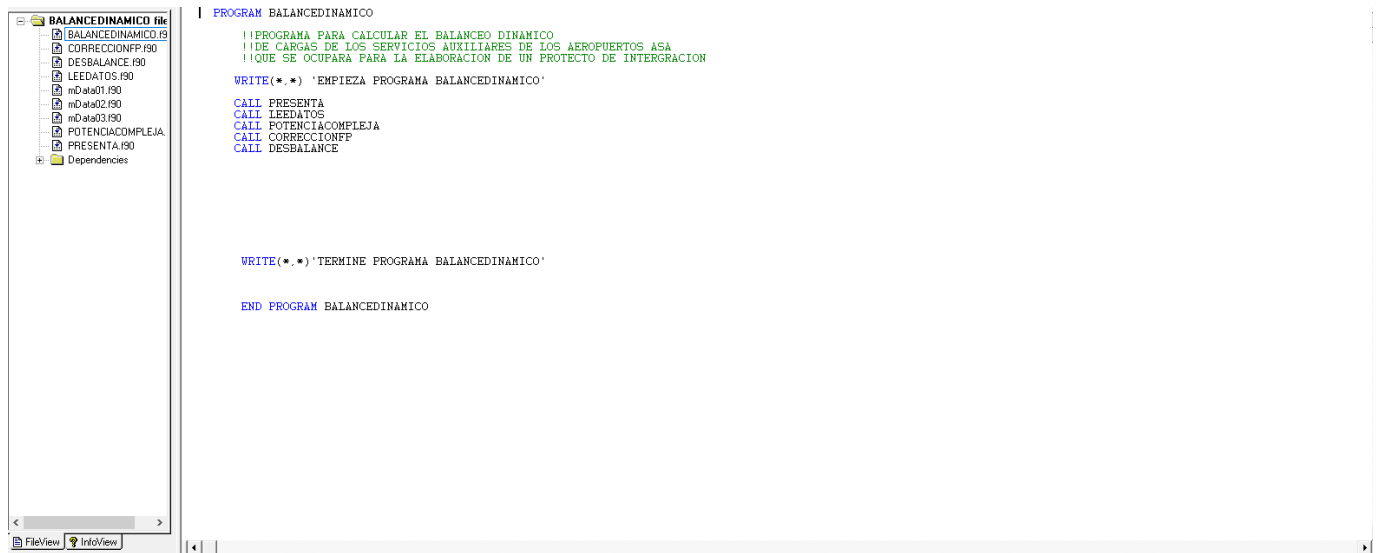


Figura 75: Captura de pantalla del programa nombrado balance dinámico

En la siguiente ilustración contiene los datos del alumno con la propuesta del proyecto de integración y el nombre.

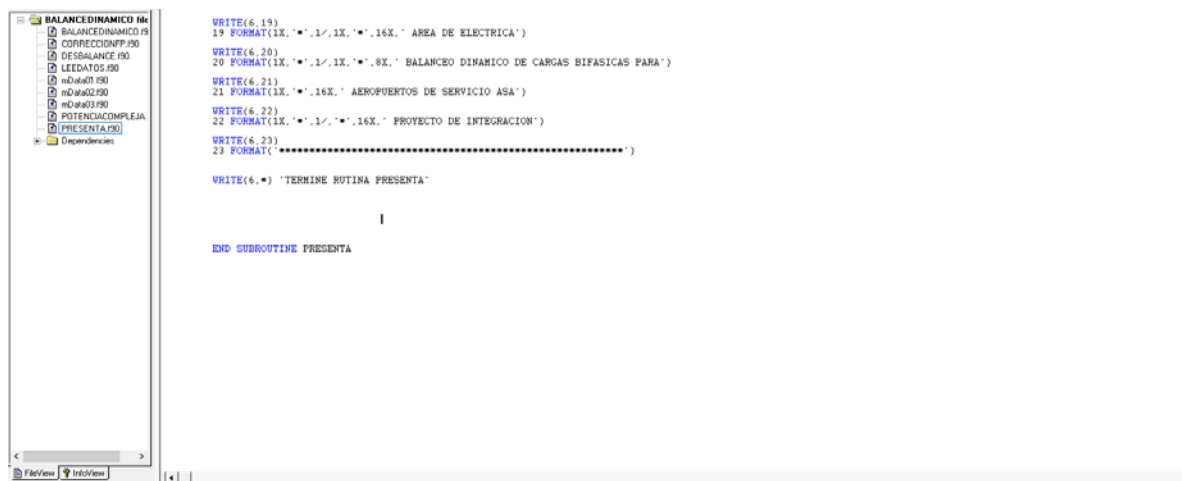
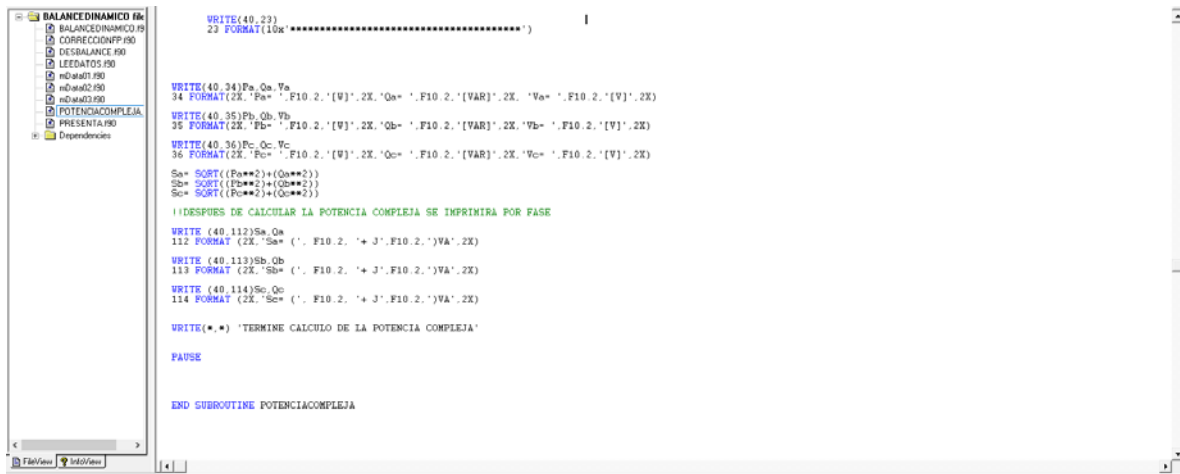


Figura 76: Subrutina de la presentación del programa

En el siguiente paso se calcula la potencia compleja de acuerdo con los datos de entrada y ordena los resultados en por fase ($\widehat{S}_a, \widehat{S}_b, \widehat{S}_c$)



```

WRITE(40,23)
23 FORMAT(10X'*****')

WRITE(40,24)Pa,Qa,Va
34 FORMAT(2X,'Pa= ',F10.2,'[V]',2X,'Qa= ',F10.2,'[VAR]',2X,'Va= ',F10.2,'[V]',2X)

WRITE(40,25)Pb,Qb,Vb
35 FORMAT(2X,'Pb= ',F10.2,'[V]',2X,'Qb= ',F10.2,'[VAR]',2X,'Vb= ',F10.2,'[V]',2X)

WRITE(40,26)Pc,Qc,Vc
36 FORMAT(2X,'Pc= ',F10.2,'[V]',2X,'Qc= ',F10.2,'[VAR]',2X,'Vc= ',F10.2,'[V]',2X)

Sa= SQRT((Pa**2)+(Qa**2))
Sb= SQRT((Pb**2)+(Qb**2))
Sc= SQRT((Pc**2)+(Qc**2))

!!DESPUES DE CALCULAR LA POTENCIA COMPLEJA SE IMPRIMIRA POR FASE

WRITE (40,112)Sa,Qa
112 FORMAT (2X,'Sa= (',F10.2,'+J',F10.2,')VA',2X)

WRITE (40,113)Sb,Qb
113 FORMAT (2X,'Sb= (',F10.2,'+J',F10.2,')VB',2X)

WRITE (40,114)Sc,Qc
114 FORMAT (2X,'Sc= (',F10.2,'+J',F10.2,')VA',2X)

WRITE(*,*) 'TERMINE CALCULO DE LA POTENCIA COMPLEJA'

PAUSE

END SUBROUTINE POTENCIACOMPLEJA

```

Figura 77: Subrutina del cálculo de la potencia compleja.

Calculada la potencia compleja y el factor de potencia se viene a corregirlo si este es menor a 0.95 (que es lo minimo permisible para no ser acreedor a una sanción económica) si cumple con lo minimo establecido se pasa a la siguiente rutina.



```

SUBROUTINE CORRECCIONFP
!!EN ESTA PARTE SE CORREGIRA EL FACTOR DE POTENCIA
!!SI ALTERAS LA POTENCIA ACTIVA DE LA FASE

USE nData01
USE nData02
USE nData03

IMPLICIT NONE

REAL:: X=0.0

Qa=Qa-QcapacitorA
Pa=Pa-PBa
Qb=Qb-QcapacitorB
Pb=Pb-PBb
Qc=Qc-QcapacitorC
Pc=Pc-PBc

X=(0.81*PI)/180

WRITE(*,*) 'INICIE CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA'

FFa=Pa/Sa
FFb=Pb/Sb
FFc=Pc/Sc
WRITE(40,12)FFa,FFb,FFc
12 FORMAT(2X,'FFa=',F3.2,2X,'FFb=',F3.2,2X,'FFc=',F3.2,2X,1/)

PAUSE

!!

WRITE(40,500)
500 FORMAT('*****')
WRITE(*,22)
22 FORMAT(2X,'FASE A',2X)

IF (FFa <= 0.95) THEN

S2a= Pa/0.999999
Q2a= S2a*SIN(X)
QcapacitorA= Qa-Q2a
Ca= (QcapacitorA)/(120*PI*(Va**2))


```

Figura 78: Subrutina que corrige el factor de potencia.

Una vez corregido el factor de potencia por medio de capacitores conectados en paralelo se sigue con el corrector de desbalance entre fases pues debe de ser menor al 3% entre la fase de mayor corriente a la de menor corriente eficaz.

```

SUBROUTINE DESBALANCE
  USE mData01
  USE mData02
  USE mData03

  IMPLICIT NONE
  WRITE(*,*) 'EMPIEZA CALCULO DE DESBALANCE'

  Ia=Pa/(Va*PFna)
  Ib=Pb/(Vb*PFnb)
  Ic=Pc/(Vc*PFnc)

  WRITE(40,12)Ia,Ib,Ic
  12 FORMAT(2X,'Ia=',F7.2,'[A]',2X,'Ib=',F7.2,'[A]',2X,'Ic=',F7.2,'[A]',2X)

  PAUSE

  WRITE(40,500)
  500 FORMAT('-----')

  IF (Ia > Ib)THEN

    IF (Ia > Ic)THEN
      WRITE(40,8)Ia
      8 FORMAT(2X,'LA CORRIENTE Ia=',F7.2,'[A]',2X,'ES LA MAYOR',2X)

      DBa=((Ia-Ib)/Ia)*100
      DBc=((Ia-Ic)/Ic)*100

      WRITE(40,20)DBa
      20 FORMAT(2X,'TIENES UN DESBALANCE EN LA FASE B DE ',F5.2,'% ',2X)

      WRITE(40,21)DBc
      21 FORMAT(2X,'TIENES UN DESBALANCE EN LA FASE C DE ',F5.2,'% ',2X)

    ELSE
      WRITE(40,500)

    IF(DBa .LT. 3.0)THEN
      WRITE(40,*)'LA CARGA DE LA FASE B CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS DE LA NORMA'
      WRITE(40,500)
    ELSE
      WRITE(40,500)
    ENDIF
  ENDIF
END
  
```

Figura 79: Subrutina donde corrige el desbalance que existe entre fases.

Se crea una hoja de datos donde se incluye voltaje, potencia activa, potencia reactiva de la fase A; voltaje, potencia activa, potencia reactiva de la fase B; voltaje, potencia activa, potencia reactiva de la fase C.

```

POTENCIAS.DAT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
130.2
4512
900
128.99
6374
8129
126.78
9191
7843
  
```

Figura 80: Datos de entrada del programa donde se incluye voltaje, potencia activa y reactiva de la fase A, B, C respectivamente..

Ejecutando el programa nos da una hoja con los resultados de la capacitancia necesaria para corregir el factor de potencia a un valor de aproximadamente de 0.99 y la resistencia necesaria a instalar para disminuir el desbalance entre fases.

```

POTENCIAS.RES: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

* AEROPUERTOS DE SERVICIO ASA
* PROYECTO DE INTEGRACION
*****
Pa= 4512.00[W] Qa= 900.00[VAR] Va= 130.20[V]
Pb= 6374.00[W] Qb= 8129.00[VAR] Vb= 128.99[V]
Pc= 9191.00[W] Qc= 7843.00[VAR] Vc= 126.78[V]
Sa= ( 4600.89+ j 900.00)VA
Sb= ( 10329.98+ j 8129.00)VA
Sc= ( 12082.51+ j 7843.00)VA
FPa=.98 Fpb=.62 Fpc=.76

*****
NO NECESITAS CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA
Sa= ( 4600.89+ j 900.00)VA
*****

FASE B
NECESITAS .12816028E-02[C] PARA CORREGIR TU FACTOR DE POTENCIA
POTENCIA COMPLEJA NUEVA DE LA FASE B
Sb= ( 6374.06+ j 90.11)VA
*****

FASE C
NECESITAS .12729018E-02[C] PARA CORREGIR TU FACTOR DE POTENCIA
POTENCIA COMPLEJA NUEVA DE LA FASE C
Sc= ( 9191.09+ j 129.93)VA
*****

Ia= 35.34[A] Ib= 49.42[A] Ic= 72.50[A]
*****
LA CORRIENTE Ic= 72.50[A] ES LA MAYOR
TIENES UN DESBALANCE EN LA FASE A DE 51.26%
TIENES UN DESBALANCE EN LA FASE B DE 31.84%
*****
NECESITAS 4679.00[W] PARA EQUILIBRAR LA FASE A
NECESITAS .3553011E+01[Ohms] PARA EQUILIBRAR LA FASE A
*****
NECESITAS 2817.00[W] PARA EQUILIBRAR LA FASE B
NECESITAS .5906374E+01[Ohms] PARA EQUILIBRAR LA FASE B
*****

```

Figura 81: Datos de resultados con los cálculos correspondientes de cada caso.

APÉNDICE 2:

Código completo del prototipo desarrollado.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#define ANCHO 128
#define ALTO 64
#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 oled(ANCHO, ALTO, &Wire, OLED_RESET);////////Librerías para la impresión en la pantalla OLED
//////////
float ajuste=4.52; //variable para ajustar el voltaje promedio leído al voltaje pico real //se obtuvo al dividir 12.12/3.12
float Sensibilidad=0.100; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor de corriente(se puede ajustar para obtener la correcta)
float offset=0.100; // Equivale a la amplitud del ruido
byte Interruptor1=8; // Cuando se accione entran 7 inductores en serie con las resistencias
byte Interruptor2=6; // Cuando se accione entran otros 10 inductores en serie
byte Rele1=9;// Carga capacitiva para corregir el FP con valores aprxo de 0.93
byte Rele2=10;// Carga capacitiva para corregir el FP con valores aprxo de 0.88
```

Figura 82: Declaración de librerías y variables globales utilizadas

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(Interruptor2, INPUT);
  pinMode(Interruptor1, INPUT);
  pinMode(Rele1, OUTPUT);
  pinMode(Rele2, OUTPUT);
  Wire.begin();
  oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);///Inicialización del puerto serial de la pantalla OLED
  Serial.begin(9600);///Monitor serie inicializado
}
```

Figura 83: Modos de pines e inicialización de puertos seriales

```
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  Interruptor_1();//Carga de 7 inductores
  Interruptor_2();//Carga de 10 inductores
  digitalWrite(Rele1,HIGH);
  digitalWrite(Rele2,HIGH);
  float Ip=0;//obtenemos la corriente pico
  float Irms=0; //Intensidad RMS = Ipico/(2^1/2)
  float S=0; // S=IrmsVrms watts
  float corrienteSensor;
  float corriente=0;
  long tiempo=millis(),tiempo1=millis(),tiempo2=millis();
  float Imax=0;
  float Imin=0;
  float voltajeSensor;
  float voltaje=0;
  float vmax=0;
  float vmin=0;
```

Figura 84: Código principal y variables locales

```

float vmin=0;
float Vp=0;
float Vrms=0;
float radianes=0, FP=0,P=0,Q=0;
float tiempoinicial=0, tiempofinal=0, duracion=0;
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
    corrienteSensor = analogRead(A0)*(5.0/1023.0);//lectura del sensor de corriente
    corriente=0.9*corriente+0.1*((corrienteSensor-2.527)/Sensibilidad); //Ecuación para obtener la corriente
    if(corriente>Imax)Imax=corriente;
    if(corriente<Imin)Imin=corriente;
    voltajeSensor = analogRead(A1)*(5.0/1023.0);//lectura del sensor de voltaje
    voltaje=0.9*voltaje+0.1*((voltajeSensor)*(ajuste)); //Ecuación para obtener la ecuacion del voltaje
    if(voltaje>vmax)vmax=voltaje;
    if(voltaje<vmin)vmin=voltaje;
    if((voltajeSensor>=0) && (voltajeSensor<=0.25))tiempoinicial=millis();
    if((corrienteSensor >= 2.47) && (corrienteSensor <= 2.55))tiempofinal=millis();
}
duracion=abs((tiempofinal-tiempoinicial)/1000);

```

Figura 85: Toma de muestras del sensor de voltaje y el de corriente cada 500 milisegundos.

```

Ip=((Imax-Imin)/2)-offset);
Irms=Ip/sqrt(2);
radianes=(duracion*PI)/0.00833;
Vp=((vmax-vmin)+2.2); //obtenemos la corriente pico
Vrms=Vp/sqrt(2); //voltaje RMS = Vpico/(2^1/2)
S=Irms*Vrms;
P=S*abs(cos(radianes));
Q=S*sin(radianes);
FP=P/S;
while(millis()-tiempo1<5000){
    if((FP>0.92)&&(FP<0.95)){
        digitalWrite(Rele1, LOW);
    }else if((FP>0.86)&&(FP<0.92)){
        digitalWrite(Rele2, LOW);
    }else if(FP>0.95){
        digitalWrite(Rele1, HIGH);
        digitalWrite(Rele2, HIGH);
    }
}

```

Figura 86: Operaciones para obtener corriente y voltaje eficaz

```

Serial.print("Ip: ");
Serial.print(corrienteSensor,3);
Serial.print("A , Vp: ");
Serial.print(voltajeSensor,3);
Serial.print("V, Irms: ");
Serial.print(Irms,3);
Serial.print("A, Vrms: ");
Serial.print(Vrms,3);
Serial.print("V, S: ");
Serial.print(S,3);
Serial.print("VA, FP: ");
Serial.print(FP,3);
Serial.print(" , P: ");
Serial.print(P,3);
Serial.print(" W, Q: ");
Serial.print(Q,3);
Serial.println(" [VAR's]");

```

Figura 87: Impresión de las variables en el monitor serial del Arduino.

```

oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(0,0);
oled.setTextSize(1);
oled.print("      Proyecto de      Integracion");
oled.setCursor(0,17);
oled.setTextSize(1);
oled.print("FP: ");
oled.print(FP, 3);
oled.setCursor(0,25);
oled.setTextSize(1);
oled.print("Irms: ");
oled.print(Irms,3);
oled.print(" A");
oled.display();
delay(500);
}

```

Figura 88: Impresión del Factor de potencia y la corriente eficaz en la pantalla OLED.

```

void Interruptor_1(){  /////Funcion para el accionamiento del interruptor 1
    static boolean estadoUltimo = 0;
    boolean estadoActual;
    estadoActual = digitalRead(Interruptor1);
    delay(30); //Delay para evitar un pequeño efecto rebote que tienen estos interruptores
    if (estadoActual == HIGH){
    } else {
    }
    if(estadoActual != estadoUltimo){
        if(estadoActual == HIGH){
        } else {
        }
    }
    estadoUltimo = estadoActual;
}

```

Figura 89: Función para conectar los 7 inductores

```

void Interruptor_2(){ ///////////////Funcion para el accionamiento del interruptor 2
    static boolean estadoUltimo = 0;
    boolean estadoActual;
    estadoActual = digitalRead(Interruptor2);
    delay(30); //Delay para evitar un pequeño efecto rebote que tienen estos interruptores
    if (estadoActual == HIGH){
    } else {
    }
    if(estadoActual != estadoUltimo){
        if(estadoActual == HIGH){
        } else {
        }
    }
    estadoUltimo = estadoActual;
}

```

Figura 90: Función para conectar los 10 inductores.

APÉNDICE 3:

Diagramas utilizados del estudio de calidad energía de la empresa “SmartPQ” entregado por el Ingeniero Sergio Martinez

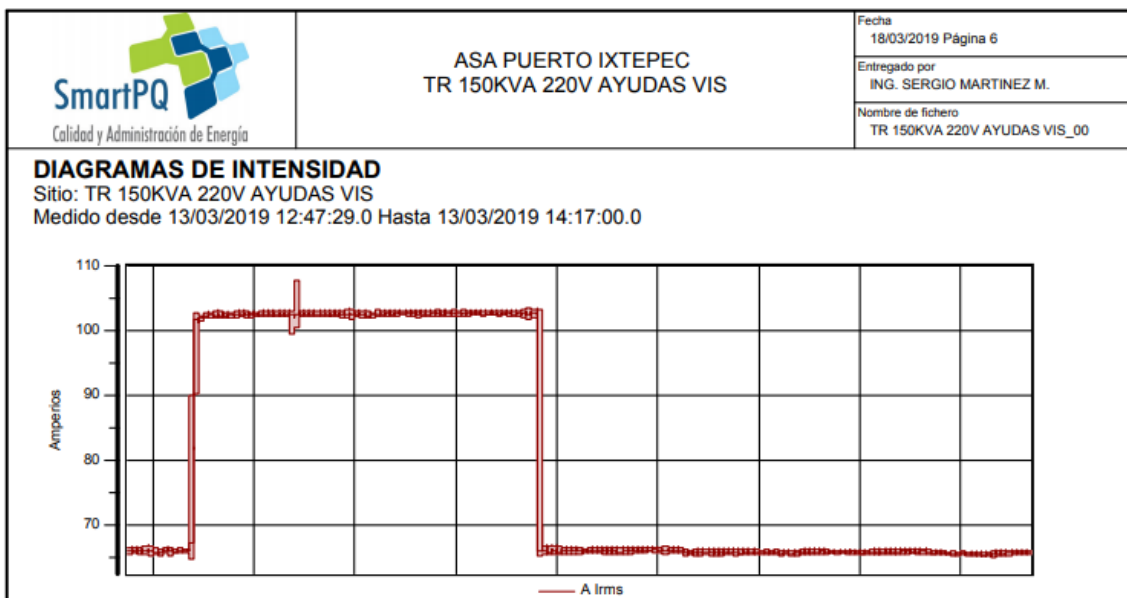


Figura 91: Diagrama de intensidad de la Fase A

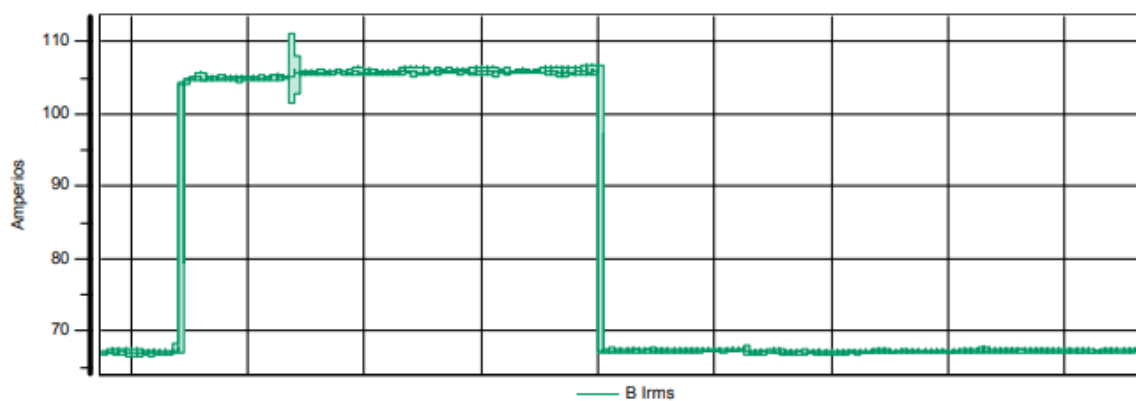


Figura 92: Diagrama de intensidad de la Fase B

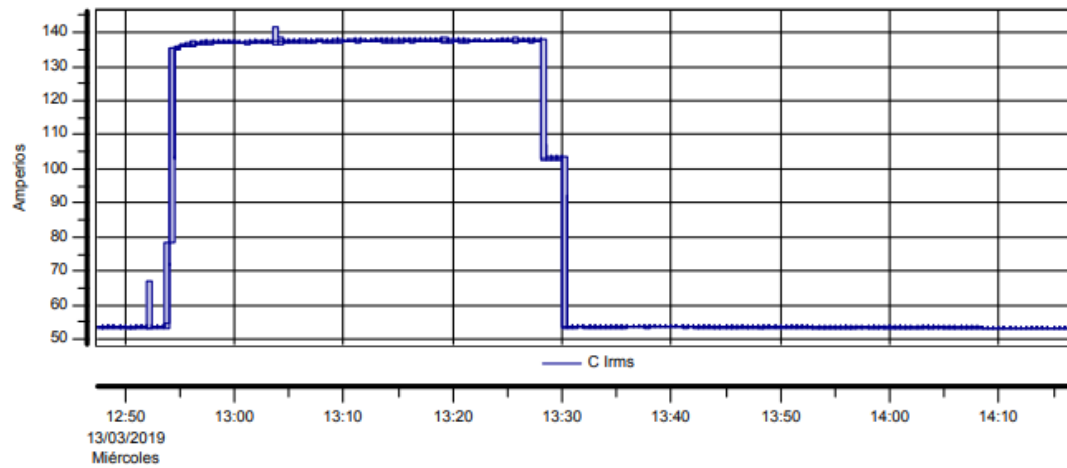


Figura 93: Diagrama de intensidad de la Fase C

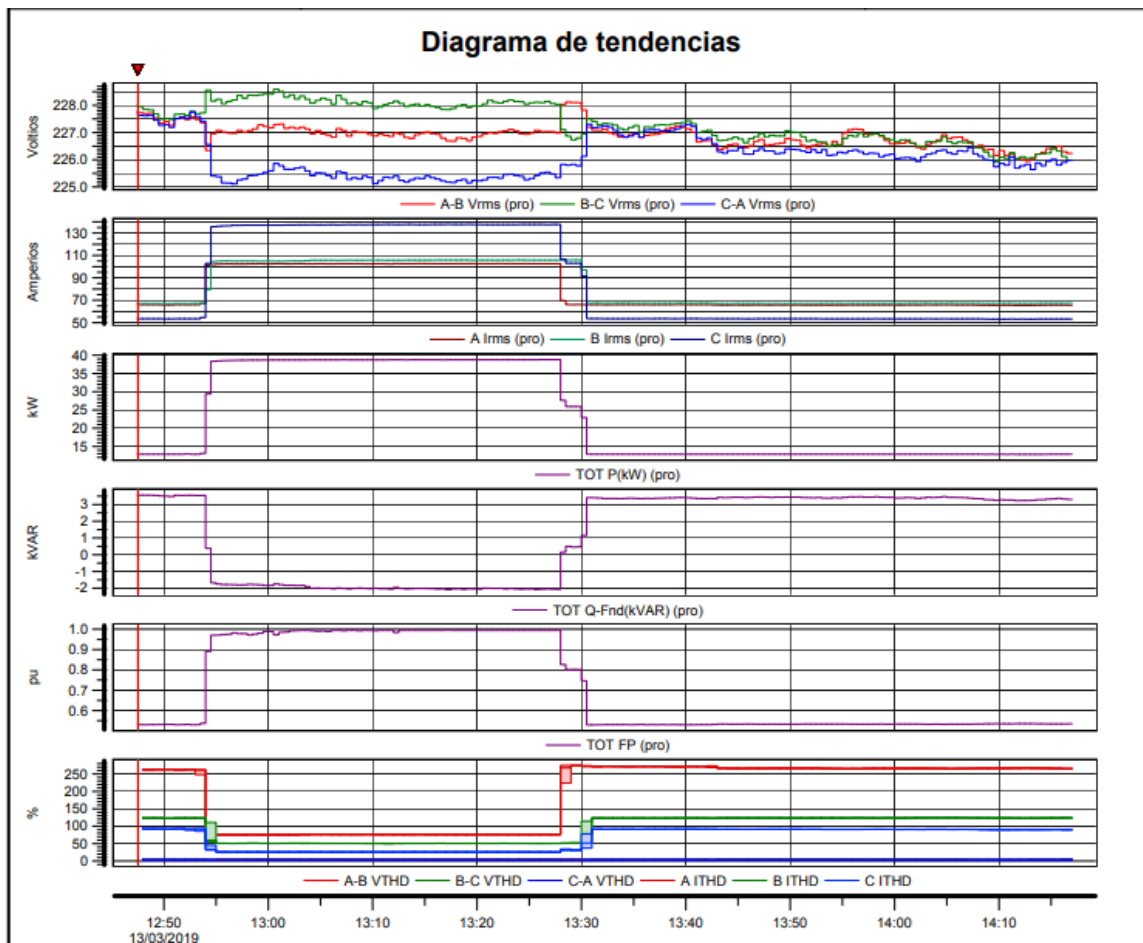


Figura 94: Diagrama de tendencias

APÉNDICE 4:

Diagrama de flujo desarrollado para la corrección del FP y el balance de cargas de sistemas trifásicos.

VARIABLE	NOMBRE DE VARIABLE	TIPO	TIPO DE DATO
Va	Voltaje de línea de la fase A	REAL	INPUT
Vb	Voltaje de línea de la fase B	REAL	INPUT
Vc	Voltaje de línea de la fase C	REAL	INPUT
Ia	Corriente de la fase A	REAL	OUTPUT
Ib	Corriente de la fase B	REAL	OUTPUT
Ic	Corriente de la fase C	REAL	OUTPUT
FPa	Factor de potencia de la fase A	REAL	OUTPUT
FPb	Factor de potencia de la fase B	REAL	OUTPUT
FPc	Factor de potencia de la fase C	REAL	OUTPUT
DBa	Desbalance referido en la Fase A	REAL	OUTPUT
DBb	Desbalance referido en la Fase B	REAL	OUTPUT
DBc	Desbalance referido en la Fase C	REAL	OUTPUT
PRa	Potencia Activa que se necesita para balancear la fase A	REAL	OUTPUT
PRb	Potencia Activa que se necesita para balancear la fase B	REAL	OUTPUT
PRc	Potencia Activa que se necesita para balancear la fase C	REAL	OUTPUT
FPna	Factor de potencia nuevo de la fase A	REAL	OUTPUT
FPnb	Factor de potencia nuevo de la fase B	REAL	OUTPUT
FPnc	Factor de potencia nuevo de la fase C	REAL	OUTPUT
Pa	Potencia activa de la fase A	REAL	INPUT
Pb	Potencia activa de la fase B	REAL	INPUT
Pc	Potencia activa de la fase C	REAL	INPUT
Sa	Potencia aparente de la fase A	REAL	OUTPUT
Sb	Potencia aparente de la fase B	REAL	OUTPUT
Sc	Potencia aparente de la fase C	REAL	OUTPUT
Qa	Potencia reactiva de la fase A	REAL	INPUT
Qb	Potencia reactiva de la fase B	REAL	INPUT
Qc	Potencia reactiva de la fase C	REAL	INPUT
S2a	Potencia aparente nueva de la fase A	REAL	OUTPUT
S2b	Potencia aparente nueva de la fase B	REAL	OUTPUT
S2c	Potencia aparente nueva de la fase C	REAL	OUTPUT
Q2a	Potencia reactiva nueva de la fase A	REAL	OUTPUT
Q2b	Potencia reactiva nueva de la fase B	REAL	OUTPUT
Q2c	Potencia reactiva nueva de la fase C	REAL	OUTPUT
QcapacitorA	Potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia de la fase A	REAL	OUTPUT

QcapacitorB	Potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia de la fase B	REAL	OUTPUT
QcapacitorC	Potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia de la fase C	REAL	OUTPUT
Ca	Capacitancia necesaria para corregir el factor de potencia de la fase A	REAL	OUTPUT
Cb	Capacitancia necesaria para corregir el factor de potencia de la fase B	REAL	OUTPUT
Cc	Capacitancia necesaria para corregir el factor de potencia de la fase C	REAL	OUTPUT
PI=3.141592	Numero PI	REAL	PARAMETRO
X	Variable X	REAL	PARAMETRO
Ra	Resistencia necesaria para balancear la carga de la fase A	REAL	OUTPUT
Rb	Resistencia necesaria para balancear la carga de la fase B	REAL	OUTPUT
Rc	Resistencia necesaria para balancear la carga de la fase C	REAL	OUTPUT

