

## ANÁLISIS DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO Y EL DISEÑO DE UN NUEVO DISPOSITIVO PARA SU CORRECCIÓN

Pacheco Reyes H. A.<sup>1</sup>, Domínguez Villalba G.<sup>1</sup>, Castillejos Othárula J.<sup>1</sup>, Rangel Cruz M.<sup>1</sup>, Villalobos García J. A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtepec, Depto. De Metal Mecánica

[hapacheco\\_32@hotmail.com](mailto:hapacheco_32@hotmail.com), [dguetz\\_vg@yahoo.com.mx](mailto:dguetz_vg@yahoo.com.mx), [javier\\_castillejos@hotmail.com](mailto:javier_castillejos@hotmail.com), [iemily888@hotmail.com](mailto:iemily888@hotmail.com), [villalobosja19@hotmail.com](mailto:villalobosja19@hotmail.com)

### RESUMEN.

En este artículo se presenta un estudio del factor de potencia, en el proceso de soldadura por arco eléctrico y el diseño de un dispositivo concebido para corregirlo en forma activa, en máquinas de soldadura por arco eléctrico con transformador. Uno de los tipos de equipos de soldar, más comúnmente utilizados en talleres y para uso industrial, son aquellas que utilizan un transformador de potencia para lograr reducir el voltaje y con ello incrementar la corriente para la fundición en el devanado secundario. El hecho de que la máquina utilice un transformador para su funcionamiento, implica trabajar con cargas inductivas debido a las bobinas del devanado primario y secundario, lo cual provoca que la corriente experimente un retraso con respecto al voltaje de suministro, que se traduce en que el equipo de soldar trabaje con un bajo factor de potencia (promedio es de 0.45), lo cual ocasiona un alto consumo de potencia reactiva, provocando un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica y un elevado costo del servicio. Una forma de solucionar este problema, es realizar un análisis detallado de las características de funcionamiento de estos equipos, utilizar determinados cálculos así como métodos de control, para diseñar un dispositivo que automáticamente inyecte la potencia reactiva necesaria mediante un banco de capacitores conmutados, para compensar el factor de potencia en tiempo real, de forma activa considerando el ajuste de corriente de salida de la máquina.

**Palabras Clave:** Soldadura, Factor de potencia, Capacitores Ahorro.

### ABSTRACT.

This article presents a study of the power factor in the electric arc welding process and the design of a device designed to actively correct it in electric arc welding machines with a transformer. One of the types of welding equipment, most commonly used in workshops and for industrial use, are those that use a power transformer to reduce the voltage and thereby increase the current for casting in the secondary winding. The fact that the machine uses a transformer for its operation implies working with inductive loads due to the coils of the primary and secondary winding, which causes the current to experience a delay with respect to the supply voltage, which means that the welding equipment works with a low power factor (average is 0.45), which causes a high consumption of reactive power, causing a waste in

the consumption of electrical energy and a high cost of service. One way to solve this problem is to carry out a detailed analysis of the operating characteristics of this equipment, use certain calculations as well as control methods to design a device that automatically injects the necessary reactive power through a bank of switched capacitors, to compensate the power factor in real time, actively considering the setting of the output current of the machine.

**Key Words:** Welding, Power factor, Capacitors Savings.

### 1. INTRODUCCIÓN

Después de llevar a cabo un estudio de campo, para conocer la eficiencia con la cual operan, los equipos de soldadura por arco eléctrico con transformador en la región de Tuxtepec Oax., en donde se realizaron mediciones de parámetros eléctricos, encontrándose que la mayoría de estos equipos, trabaja con un bajo factor de potencia, aun en aquellas máquinas de marcas reconocidas, provocando con ello un desperdicio excesivo de la energía eléctrica y como consecuencia un gasto económico considerable en los usuarios de este tipo de equipos. Por tal motivo surge la necesidad de corregir el factor de potencia en este tipo de equipos, ya que de esta manera se logrará un ahorro significativo de energía, beneficiando en primera instancia a los usuarios, además del medio ambiente.

La forma más común de corregir el factor de potencia en la mayoría de los casos, es conectando un banco de capacitores en paralelo con la carga, el cual se ajusta a una potencia fija o bien utilizando motores síncronos para el caso de aplicaciones industriales, sin embargo en una máquina de soldar la potencia que ésta demanda de la línea, se mantiene constante mientras trabaja en vacío, sin embargo cuando la máquina realiza el trabajo de soldar (genera el arco eléctrico), la potencia de la máquina cambia drásticamente y además de esto la potencia con carga de la máquina, puede variar por el hecho de que la corriente de salida se tiene que ajustar a diferentes valores, dependiendo del grosor del perfil estructural que se necesite soldar, por lo anteriormente expuesto, la metodología empleada en el presente artículo, es el de llevar a cabo una compensación de potencia reactiva en forma activa, mediante un banco de

capacitores conmutados, es decir capacitores que estén controlados mediante interruptores de estado sólido y éstos a su vez sean gobernados mediante una señal PWM, de tal manera que dependiendo del ancho de pulso de la señal de control del interruptor, el banco de capacitores permanecerá conectado a la línea durante más o menos tiempo y como consecuencia la potencia reactiva capacitiva será variable.

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó información recopilada por investigadores del Instituto Tecnológico de Tuxtepec, en donde se describen diferentes tipos de máquinas de soldadura por arco eléctrico, posteriormente se muestra el esquema propuesto de conexión para los capacitores y se emplea el triángulo de potencia para describir el método utilizado para hallar los valores de capacitancia y potencia reactiva (kVAR) y de esta manera compensar el factor de potencia de la máquina soldadora hasta un valor de 0.90, cuando la máquina está en vacío y cuando está con carga, cabe mencionar que este método es útil para motores, y diferentes elementos o aparatos conectados a un sistema eléctrico.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Estudio de campo.

Con base en un estudio de campo realizado por investigadores del Instituto Tecnológico de Tuxtepec, acerca del consumo de energía eléctrica que se presenta en el proceso de soldadura por arco eléctrico con transformador, en el cual se realizaron mediciones de la potencia real, aparente, reactiva y factor de potencia, en diferentes talleres y empresas de la región de Tuxtepec, cuyo resultado se puede observar en la tabla 1, en donde el parámetro de interés para el proyecto en cuestión es el factor de potencia, se tomó para el estudio una máquina de soldar marca Infra modelo MI2-350-CD, que de acuerdo al resultado de la investigación antes mencionada, es una de las más utilizadas en la región. También se puede observar que el factor de potencia de este tipo de máquina, está en el rango 0.63, y en el peor de los casos de 0.38.

El levantamiento de datos en campo se muestran en la tabla 1, cabe mencionar que los datos que se presentan en esta tabla, referente a las mediciones con carga, pueden variar por que dependen del ajuste de la corriente de salida, que en ese momento tenga ajustada la máquina, y esto depende del espesor y del material de la pieza a soldar.

### 2.2. Esquema propuesto para la corrección del factor de potencia en máquinas de soldar con transformador.

En la figura 1 se muestra la topología del sistema propuesto, para la corrección del factor de potencia en máquinas de soldadura por arco eléctrico con transformador. El transformador de la máquina de soldar es una carga altamente

inductiva, lo que provoca que la corriente sufra un desfaseamiento, con respecto a la fundamental del voltaje de la fuente de entrada, provocando un bajo factor de potencia.

Tabla 1 Medicines del estudio de campo.

CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA			MEDICIONES VACÍO				MEDICIONES CARGA					
No	MARCA	MODELO	CONEX	TIPO	W	VA	VAR	FP	W	VA	VAR	FP
1	MUNDIAL	325 CA/CD	2 F	CC	230	890	850	0.25	2110	442	3930	0.45
2	INFRA	TH 225/150	2 F	CA	390	1530	1520	0.25	2600	4800	4100	0.54
3	INFRA	Thunderbolt 225-CA	2 F	CA	400	1550	1530	0.26	2540	4790	4060	0.53
4	MILLER	Thunderbolt 225-CA	2 F	CA	410	1580	1530	0.26	2541	4790	4060	0.531
5	INFRA	Miller 250	2 F	CC	310	1120	1080	0.27	4570	8210	6820	0.56
6	LINCOLN	RX-450	3 F	CC	390	1240	1180	0.31	6860	11200	8580	0.6
7	INFRA	Miller 250	2 F	CC	380	1200	1150	0.32	4630	8300	6920	0.56
8	MILLER	MI-250-CD	2 F	CC	740	2180	2050	0.34	5330	10100	8550	0.56
9	MILLER	MI-250-CD	2 F	CC	740	2180	2050	0.34	5330	10100	8550	0.56
10	MILLER	MI-250-CD	2 F	CC	470	1350	1260	0.35	1640	3480	3070	0.52
11	INFRA	MI250L-CD	2 F	CC	280	770	720	0.36	3510	6400	5340	0.53
12	INFRA	MI250-CD	2 F	CC	170	470	440	0.37	4600	8300	6600	0.57
13	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	490	1310	1210	0.38	4280	8090	6890	0.53
14	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	530	1350	1240	0.39	1090	3320	3140	0.37
15	MILLER	MI2-250-CD	2 F	CC	540	1320	1210	0.41	3600	6100	4840	0.45
16	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	560	1380	1260	0.41	3710	6110	4860	0.47
17	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	610	1400	1290	0.42	3400	7200	5340	0.46
18	LINDE	PL-520	3 F	CC	620	1400	1260	0.44	5670	1060	8950	0.54
19	MILLER	MI2-250-CD	2 F	CC	450	970	820	0.48	2010	6000	3550	0.46
20	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	610	1270	1114	0.48	3840	8010	7030	0.48
21	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	640	1310	1143	0.49	3150	5670	4720	0.49
22	ISSA	BMS-3-400-A	3 F	CC	760	1400	1170	0.55	3060	5700	4650	0.54
23	MILLER	Thunderbolt XL 225-CA	2 F	CA	360	610	1530	0.59	3920	6720	4060	0.58
24	LINCOLN	AC-225 GM	2 F	CC	550	920	757	0.60	4400	7330	5860	0.60
25	LINCOLN	AC 225 ARC WELDER	2 F	CA	730	1220	977	0.60	4400	7330	5860	0.60
26	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	350	580	430	0.60	4650	7940	6450	0.59
27	MILLER	SR-200	2 F	CA	790	1270	994	0.62	4750	7200	5411	0.66
28	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	380	610	470	0.62	4720	7950	6480	0.59
29	MILLER	SRH-222	2 F	CC	712	1140	890	0.62	10500	16170	12297	0.61
30	INFRA	MI2-300-CD	2 F	CC	370	590	460	0.63	4800	8100	6500	0.62
31	MILLER	SRH 333	3 F	CC	510	800	616	0.64	4700	7550	5909	0.62
32	LINCOLN	AC 180	2 F	CD	640	990	755	0.65	3840	5890	4466	0.65
33	INFRA	TH 235/160	2 F	CD	692	1060	803	0.65	4150	6400	4872	0.65
34	INFRA	MI-265 L CA/CD	2 F	CC	790	1210	917	0.65	4800	7360	5579	0.65
35	INFRA	MI-250-CD	2 F	CC	690	1050	800	0.66	6110	9900	7790	0.64
36	LINCOLN	RX-300	3 F	CC	540	800	590	0.67	5000	5300	6000	0.62
37	SUPER DELTA	SD-300	2 F	CC	610	820	548	0.74	5540	7330	4800	0.76
38	ISSA	BMS-3-400-A	3 F	CC	280	280	60	0.97	1970	3370	3010	0.53
39	ISSA	BMS-3-400-A	3 F	CC	920	940	190	0.98	5150	8500	6770	0.61
40	ISSA	BMS-3-400-A	3 F	CC	840	850	90	0.99	3090	10200	9710	0.3
FACTOR DE POTENCIA PROMEDIO=								0.52				0.555

La forma convencional de corregir el factor de potencia en cargas fijas, es conectando un banco de capacitores en paralelo con la carga, el cual se ajusta a una potencia fija, sin embargo, como es sabido en una máquina de soldar la potencia que esta demanda de la línea se mantiene constante mientras ésta trabaja en vacío, no obstante, cuando la máquina realiza el trabajo de soldar (genera el arco eléctrico), la potencia de la máquina cambia drásticamente, y además de esto la potencia con carga de la máquina puede variar, por el hecho de que la corriente de salida se tiene que ajustarse a diferentes valores, dependiendo del grosor del perfil estructural y del tipo de material, que se necesite soldar, por tal motivo la compensación de potencia reactiva en este tipo de procesos no se puede llevar a cabo únicamente con un banco de capacitores fijo. Considerando lo antes mencionado, la hipótesis que se pretende demostrar con el desarrollo de la presente investigación, es el de llevar a cabo una compensación de potencia reactiva en forma activa,

mediante un banco de capacitores conmutados, de tal forma que el interruptor que activa a los capacitores, este controlado mediante una señal PWM, de tal manera que dependiendo del ancho de pulso de la señal de control del interruptor, el banco de capacitores permanecerá conectado a la línea durante más o menos tiempo y como consecuencia la potencia reactiva capacitiva será ajustable de acuerdo a la necesidad de kVAR capacitivos que requiera el equipo de soldar en un determinado momento.

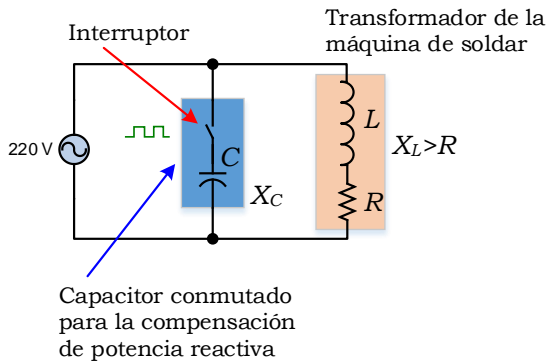


Figura 1. Esquema propuesto para la corrección del factor de potencia

### 2.3. Cálculo de la potencia reactiva por compensar.

De la información presentada en la Tabla 1, se tomó para el estudio en cuestión la máquina MI2-300-CD, que es una de las más utilizadas en la región del Papaloapan. En la tabla 2, se presentan únicamente la información de los datos de este modelo de máquina de soldar para obtener los valores promedio de la potencia en vacío y con carga y con ellos realizar el análisis de la compensación del factor de potencia.

Tabla 2. Parámetros de la maquina elegida para pruebas

NÚMERO	MÁQUINA	SIN CARGA				CON CARGA			
		W	VA	VAR	FP	$W_c$	$V_{Ac}$	$VAR_c$	$FP_c$
13	MI2-300-CD	490	1310	1210	0.38	4280	8090	6890	0.53
14	MI2-300-CD	530	1350	1240	0.39	1090	3320	3140	0.37
16	MI2-300-CD	560	1380	1260	0.41	3710	6110	4860	0.59
17	MI2-300-CD	300	610	720	0.42	3400	7200	5340	0.46
20	MI2-300-CD	610	1270	1114	0.48	3840	810	7030	0.48
21	MI2-300-CD	640	1310	1143	0.49	3150	5670	4720	0.49
26	MI2-300-CD	350	580	430	0.60	3650	7940	6450	0.59
	PROMEDIO	497	1115	1017	0.45	3302	5175	5490	0.50

#### 2.3.1 Compensación del factor de potencia de la máquina en vacío.

a) Se dibuja el triángulo de potencia en vacío de la máquina.

Para ello se toman los valores de cada una de las potencias promedio mostradas en la Tabla 2, cuyas magnitudes corresponden a la dimensión de cada uno de los lados del triángulo, lo cual corresponde a una máquina trabajando en vacío con un factor de potencia de 0.45 y en estas condiciones el ángulo de desfase entre la potencia real y aparentes de  $63.25^\circ$ . En la Figura 2 se muestra dicho triángulo.

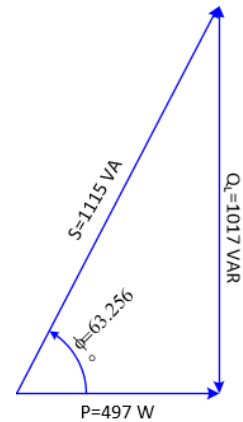


Figura 2. Triángulo de la potencia en vacío de la máquina.

donde:

$P$  = Potencia Real en Watts

$S$  = Potencia Aparente en VA

$Q_L$  = Potencia reactiva inductiva en VAR

b) Establecer el factor de potencia a compensar.

En primer lugar, se compensará el sistema para trabajar a un factor de potencia de 0.9, esto se traduce en un ángulo de desfase de  $25.84^\circ$  y el triángulo de potencias con estas consideraciones es el que se muestra en la figura 3.

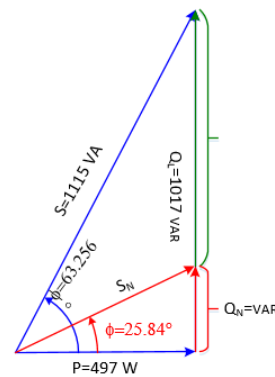


Figura 3. Triángulo de potencia donde se muestra la compensación del factor de potencia de 0.45 a 0.90

En el triángulo de potencias de la figura 3, para un factor de potencia de 0.45, cuando la máquina de soldar trabaja en vacío, el ángulo de desfase es de  $63.256^\circ$ , con lo cual se tiene una potencia aparente  $S = 1115$  VA y una potencia reactiva

inductiva  $Q_L = 1017 \text{ VAR}$ . En cambio cuando el factor de potencia es de 0.9, el ángulo de desfase es de  $\phi = 25.84^\circ$ , con lo cual ahora se ha disminuido la potencia aparente  $S_N = 552.213 \text{ VA}$  y la potencia reactiva inductiva  $Q_N = 240.687 \text{ VAR}$  como se demuestran en cálculos siguientes:

$$S_N = \frac{497W}{\cos(25.84^\circ)} = 552.213 \text{ VA},$$

$$Q_N = 497W * \tan(25.84) = 240.687 \text{ VAR}$$

**c) Obtener la potencia reactiva capacitiva necesaria para la compensación.**

Entonces para poder ajustar el factor de potencia de 0.45 a 0.9, es necesario inyectar potencia reactiva capacitiva  $Q_C$ , como se muestra en la figura 4.

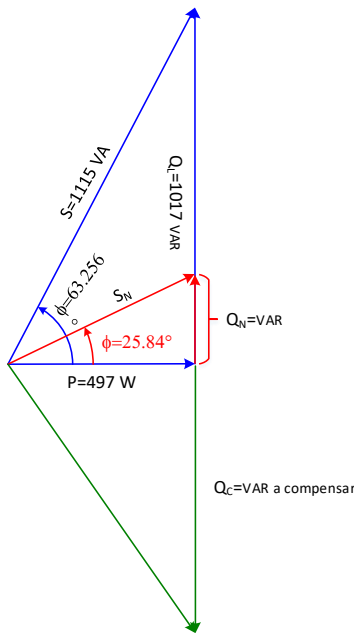


Figura 1. Compensación de potencia reactiva capacitiva en el triángulo de potencia

De la Figura 4, la potencia reactiva capacitiva a compensar  $Q_C$  se puede obtener gráficamente de la manera siguiente:

$$Q_C = Q_L - Q_N = 1115 \text{ VAR} - 240.687 \text{ VAR}$$

$$Q_C = 776.313 \text{ VAR}$$

**d) Cálculo del capacitor para la compensación.**

Para ello se aplica la siguiente ecuación.

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C}$$

$$(2.1)$$

donde:

$Q_C =$  Potencia reactiva capacitiva por compensar en VAR

$Q_C =$  Voltaje de sistema en V

$X_C =$  Reactancia capacitiva en Ohms

Despejando la reactancia capacitiva y sustituyendo los datos correspondientes se tiene:

$$X_C = \frac{(220V)^2}{776.313 \text{ VAR}} = 62.346 \Omega$$

Finalmente, el valor de la capacitancia se puede obtener de la siguiente ecuación.

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_C} \quad (2.2)$$

Sustituyendo los datos correspondientes se tiene:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 \text{ Hz} * 62.346 \Omega} = 42.546 \mu\text{F}$$

**2.3.2 Compensación del factor de potencia de la máquina con carga.**

Se aplicó el mismo procedimiento para encontrar la potencia a compensar, cuando la máquina trabaja con carga. Cabe mencionar que los valores de la corriente de salida cuando la máquina trabaja con carga, presentados en la tabla 2, son los ajustes más comúnmente utilizados en los talleres encuestados. Los resultados de los cálculos son los siguientes:

La potencia a compensar resulto ser:  $Q_C = 3980.906 \text{ VAR}$

Y el tamaño del capacitor es de:  $C = 213.243 \mu\text{F}$

En la figura 5 se muestra el triángulo de potencias de la máquina con carga.

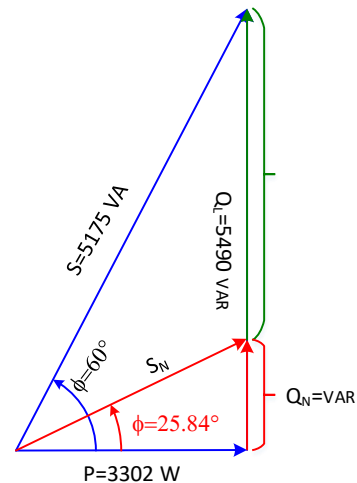


Figura 2. Triángulo de potencia donde se muestra la compensación del factor de potencia de .45 a 0.90 en la máquina de soldadura con carga

#### 2.4. Medición del Factor de Potencia.

Para poder efectuar la compensación del factor de potencia en el proceso en cuestión, es necesario medirlo en forma instantánea, de tal manera que la compensación de potencia reactiva sea la precisa en un instante determinado, que lo requiera la máquina. Esto implica contar con un dispositivo que mida instantáneamente el factor de potencia y nos proporcione una señal proporcional a esta medida para posteriormente utilizarla en un lazo de control. El dispositivo que cumple con estos requerimientos es el Single Phase Power Factor Meter H71, el cual produce una señal de retroalimentación analógica, digital o serial.

Para poder medir corrientes altas con el medidor de factor de potencia H71 se requiere de un Transformador de corriente (TC's), como se muestra en la figura 6, para inducir e indicar con un bajo amperaje para proteger el Medidor de FP, además que cuenta con un aislamiento magnético para evitar daños al H71.



Figura 6. Transformador de corriente 100/5

#### 2.5. Etapa de control.

Para ello se utilizó una tarjeta Arduino Mega 2560 (ATMEGA2560), sincronizada con el voltaje de línea y retroalimentada a partir del medidor del factor de potencia H71. Se programó un algoritmo de control PID, para poder controlar los interruptores de estado sólido que conmutan al capacitor, para de esta manera llevar a cabo la corrección del factor de potencia.

Para la parte de control se optó por la opción de modulación por ancho de pulsos (PWM) para hacer variar la capacitancia en el banco de capacitores fijo.

Debido a que un banco de capacitores variable por swicheo o por etapas no era conveniente para el uso que se deseaba dar, se eligió la tarjeta Arduino Mega 2560. Las partes a utilizar se dispusieron de una salida digital de señal PWM de 8 bits, una entrada analógica de 10 bits, para que a partir de la referencia de voltaje, pudiera controlar la salida de señal. En la Figura 7 se muestra el esquema de dispositivo corrector del factor de potencia.

#### 2.6. Interruptor de potencia.

Como se mencionó anteriormente, la compensación de la potencia reactiva se llevó a cabo mediante una técnica PWM, lo

cual implica estar conmutando los capacitores mediante un interruptor de potencia, muchas veces en un ciclo de la señal del voltaje de entrada. Para ello se hicieron pruebas con transistores de potencia; primeramente utilizando Mosfet y el que mejor resultados dio fue el IGBT, por el hecho de que es un dispositivo fácil control de encendido y apagado, buena velocidad de conmutación y un buen manejo de corriente.

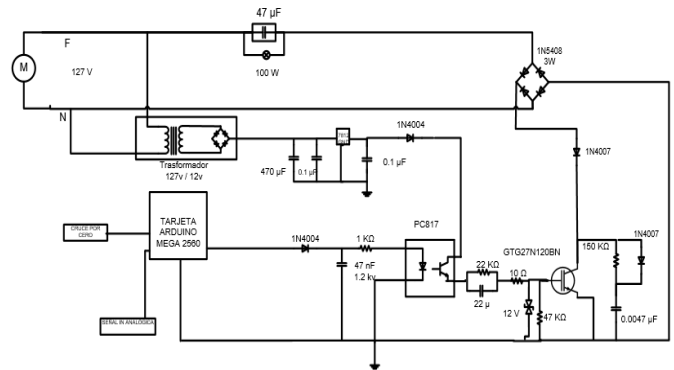


Figura 7. Esquema del compensador del FP.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ahorro de energía

Los resultados obtenidos fueron los esperados teóricamente: se pudo ajustar el funcionamiento de la máquina para trabajar con un factor de potencia de 0.90, mediante la conmutación de una celda capacitiva monofásica de 240V, 330 µF y 3.0 KVAR. Se obtuvo un control de PWM sincronizado mediante la referencia de cruce por cero, al inicio de la onda de voltaje y termina antes del siguiente cruce por cero evitando armónicos, desfases o inestabilidad en el circuito; un arreglo seguro para manejar grandes potencias, un circuito simplificado de tamaño reducido; gran velocidad de conmutación y capacidad de actuar en tiempo real.

Considerando el ejemplo de la máquina de soldar Miller MI2-350-CD, se obtuvo que la potencia aparente antes de la compensación era de  $S = 5175 \text{ VA}$ , sin embargo una vez hecha la compensación, trabajando la maquina con un factor de potencia de 0.9, la potencia aparente se reduce a  $S_N = 3668 \text{ VA}$ , obteniéndose un ahorro de 1507 VA. Ahora bien si se considera una jornada de trabajo de ocho horas y un ciclo de trabajo del 60%, es decir la maquina estaría trabajando durante 4.8 hr por jornada diaria de trabajo y el ahorro de energía sería de:

$$P_j = 4.8 \text{ hr} * 1.507 \text{ kVA} = 7.234 \text{ kWh}$$

Si se considera la Tarifa 2 (2020) de Comisión Federal de Electricidad (CFE) en donde el precio por kW/h adicionales a



100, a la fecha es de \$3.425, el ahorro de energía en un periodo de facturación es:

$$P_m = 30 * 7.234 \text{ kWh} * \$3.425 = \$743.29$$

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con el desarrollo del presente trabajo, se ha podido implementar un dispositivo capaz de corregir el factor de potencia en máquinas de soldar con transformador y conseguir un ahorro de energía en este proceso de soldadura.

Además es necesario mencionar que el dispositivo se conecta de manera externa a la máquina, sin modificar el diseño original de la misma.

Durante el diseño e implementación del dispositivo, para la corrección del factor de potencia en forma activa, para máquinas de soldadura por arco eléctrico con transformador, mediante un sistema de control en tiempo real, se tuvieron varias etapas que fueron manejándose conforme a lo planeado y adaptándose a lo largo de esta investigación.

Al recopilar información mediante análisis integral de estudios realizados, en máquinas de soldar se pudo observar que, la mayoría trabaja con un bajo FP siendo de 0.50 en promedio y necesidad de compensar 5.5 kVAR medianamente.

En cuanto a la programación se observó la fundamental necesidad de sincronizar la onda de control con el cruce por cero de la Senoidal, por lo que el PWM estándar del Arduino es impráctico en pruebas reales. Por lo que se tomó la decisión de cambiar el control, por medio de interrupciones, a controlar la duración de onda a partir del cruce por cero. Esto se logró afectando el tiempo en función de la señal y se obtuvieron resultados positivos y debido a esto se pudo avanzar con el proyecto.

Al utilizar IGBT se tuvo el funcionamiento requerido por el planteamiento, es decir, se obtuvo un circuito que cumplió la necesidad de diseño para actuar de manera correcta de acuerdo a la programación.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] L. Robert . L, Análisis Introductorio de Circuitos, 8<sup>a</sup> Edición Prentice Hall, México. (1988).
- [2] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, 4<sup>a</sup> edición, Pearson/Prentice Hall, México. (2008).
- [3] 4.- O. Torrente, Arduino. *Curso práctico de Formación*, 1<sup>a</sup> Edición, Alfaomega, México. (2013).
- [4] H. Rashid, Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones, 2<sup>a</sup> edición, Prentice Hall, pp. México. (1995)

- [5] M. J. Fisher. Power Electronics, PWS - Kent Pub Co, Boston USA 1991.
- [6] S. Dewan, Power Semiconductors Circuits, Straughen-John Wiley & Sons. UK, (1975)
- [7] E. E Niebles, Modelo de diseño y base de conocimiento en tecnologías de soldadura para el desarrollo de productos soldados, Cienthia y Technica, ISSN 0122-1701; (en línea), 37 (1), 473-478. (2007).
- [8] E. P. Vilkas, Plasma arc welding of exhaust pipe system components, *Welding Journal* 70(4): 49-52 (1991)
- [9] R.J. Fernández, Soldadura híbrida LBW – GMAW aplicada en tuberías de conducción de hidrocarburos, *Memorias Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales* ISSN:2007-9540: 351-361 (2014).
- [10] Sira-Ramírez, Hebertt and Silva-Ortigoza, Ramón, *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, Ed. Springer. ISBN: 788578110796 (2013).
- [11] [3] T. Friedli, F. Krismer, S. D. Round J. W. Kolar, The Essence of Three-Phase AC/AC Converter Systems, in *Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 27-42 (2008).
- [12] B. K. Bose, *Power electronics and AC drives*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, USA. (1986).