

***ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO***

**LEONARDO ANDRES HERNANDEZ SANCHEZ**

**RAMIRO ALBERTO ARISTIZABAL OCAMPO**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA**

**PEREIRA**

**2012**

***ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO***

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar por el grado de  
Ingeniero Electricista.**

Presentado por:

**LEONARDO ANDRES HERNANDEZ SANCHEZ**

Cód. 10033366

**RAMIRO ALBERTO ARISTIZABAL OCAMPO**

Cód. 4514888

**Director**

**MSc. Alfonso Álzate.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA**

**PEREIRA**

**2012**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma de presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## ***AGRADECIMIENTOS***

Al ingeniero Alfonso Alzate por darnos la oportunidad de presentar el tema de tesis y por la asesoría brindada durante la ejecución del trabajo.

Al ingeniero Jesser James Marulanda por aclarar las dudas respecto al manejo del software PSCAD.

Al ingeniero Andrés Felipe Panesso por su colaboración incondicional en este trabajo.

Al ingeniero Harrison Ramírez Murillo por la ayuda con todas la dudas presentadas acerca del manejo del software MATLAB.

A Yurly Viviana Ramírez por la ayuda en la impresión del documento.

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por ayudarme alcanzar mis metas.*  
*A mi padre José por su colaboración en toda mi carrera.*  
*A mi madre Martha por su amor incondicional en toda mi vida. ¡Te amo!*  
*A mi tío Gonzalo por su colaboración y por sus palabras de aliento en los momentos más duros de mi carrera y de mi vida.*  
*A mi tía Rubiela por tus sabios consejos.*  
*A mis hermanas Andrea y Stephany por su confianza.*  
*A mi sobrina Mariana por llenarme de alegría.*

LEONARDO ANDRÉS HERNÁNDEZ SANCHEZ

*A dios por ser el guía de mi vida.*  
*A mi madre olga lucia por brindarme su amor, confianza y apoyo durante la carrera.*  
*A novia yurly viviana por ser la persona que siempre me alentaba para superarme en la vida.*  
*A Leonardo por ser un gran compañero de tesis.*

RAMIRO ALBERTO ARISTIZÁBAL OCAMPO

## CONTENIDO

pág.

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del problema.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
 <b>2. <i>CONCEPTOS BASICOS</i>.....</b>	 <b>4</b>
2.1 ¿Qué es un soldador de punto?.....	4
2.1.1 ¿Cómo se hace un soldadura por resistencia?.....	5
2.1.2 ¿Cuáles son los factores importantes al hacer una soldadura?.....	6
2.1.3 ¿Cómo se obtiene la corriente adecuada?.....	6
2.1.4 ¿Cómo es controlado el tiempo?.....	7
2.1.5 ¿Cómo se obtiene la fuerza en los electrodos?.....	7
2.1.6 ¿Qué es un control de soldadura por resistencia?.....	7
2.1.7 ¿Cómo está conectado el control de soldadura a la máquina de soldar?.....	7
 2.2 Rectificador controlado silicio (S.C.R.).....	 9
2.2.1 Características del SCR.....	9

2.2.2 Factores que provocan el encendido del SCR.....	10
2.3 NTC 818 norma técnica colombiana.....	11
2.4 NTC 819 norma técnica colombiana.....	14
2.5 Control integral. on-off.....	18
2.6 Calidad de la energía.....	19
<b>3 EFECTOS DE UN SOLDADOR DE PUNTO EN LA RED.....</b>	<b>20</b>
3.1 Perturbación de la tensión (flicker).....	20
3.2 Flicker sistemático o periódico.....	20
3.2.1 Modelo matemático de flicker periódico.....	20
3.2.2 Fórmula matemática general para determinar el flicker.....	20
3.3 Medición del parpadeo.....	21
3.3.1 Diseño del flickermeter.....	21
3.3.2 Flicker provocado por un soldador de punto.....	22
3.4 Severidad de corta duración (Pst).....	23
3.5 Límites permitidos del flicker .....	24
3.6 Transferencia de flicker.....	24
3.7 Desbalance de tensión en sistemas trifásicos.....	25
3.7.1 Medición del desbalance de tensión.....	25
3.7.2 Límites admisibles para el desbalance en la red.....	26
<b>4 SIMULACIÓN DE UN MODELO DE SOLDADOR DE PUNTO.....</b>	<b>27</b>
4.1 Procedimiento .....	27

4.1.1	Análisis del modelo del soldador.....	28
4.2	Análisis de las graficas de la simulación sistema monofásico.....	34
4.3	Análisis del resultado del Pst.....	40
4.3.1	Norma IEC 61000-4-15 .....	40
4.3.2	Límites permitidos.....	40
4.4	Datos del Pst medidos en los diferentes nodos del sistema de distribución.....	41
4.5	Análisis del modelo del soldador conectado a un sistema trifásico.....	44
4.5.1	Análisis comparativo del Pst en el modelo trifásico y monofásico.....	54
4.6	Desbalance de tensión.....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>60</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<i>Figura 1. Soldador de punto.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Electrodo del soldador de punto.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Cilindro y pistón del soldador de punto.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4. Forma de conectar el control de soldadura a la máquina de soldar.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5 Estructura y símbolo del SCR.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6 Característica estática del SCR.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7. Curva de pérdidas en vacío NTC 818.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 8. Curva de pérdidas con carga NTC 818.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 9. Curva de pérdidas en vacío NTC 818.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10. Curva de pérdidas con carga NTC 818.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11. Curva característica de las pérdidas sin carga NTC 819.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Curva característica de las pérdidas con carga NTC 819.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 13 Curva característica de las pérdidas sin carga NTC 819.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 14. Curva característica de las pérdidas con carga NTC 819.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 15 Control de ciclo integral ON OFF.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 16. Partes principales del medidor de fluctuaciones de tensión.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 17. Modelo del soldador en PSCAD.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18. Ciclos de trabajo de la resistencia de soldadura.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19. Gráfica resistencia de soldadura RL.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20 Configuración de dos SCR en antiparalelo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 21. Pulsos de los disparos de los SCR.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22. Modelo monofásico del soldador conectado a la red de distribución.....</i>	<i>33</i>

<i>Figura 23. Fluctuación de tensión en la alimentación del soldador de <math>E_a</math>.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 24. Forma de onda detallada de la tensión de alimentación del soldador <math>E_a</math>.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura. 25 Corriente de soldadura <math>I_2</math>.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26 Tensión <math>E_1</math>.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27 Tensión del lado secundario del transformador interno del soldador.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28 Comportamiento de la tensión del antiparalelo de los SCR.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29 Tensión del proceso de soldadura.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30 Corriente del lado secundario del transformador de alimentación.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31 Corriente del lado primario del transformador interno del soldador.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 32 Diagrama unifilar del sistema de distribución.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 33 Medición del <math>P_{st}</math> sin el soldador conectado a la red.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 34 Medición del <math>P_{st}</math> con el soldador conectado a la red.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 35 Medición del <math>P_{st}</math> retirando el alimentador de las cargas lineales.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 36 Modelo soldador de punto conectado a un sistema trifásico.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 37 Diagrama unifilar del modelo conectado al sistema trifásico.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 38 Fluctuaciones de Tensión en la alimentación del soldador <math>E_a</math>.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 39 Fluctuaciones de Tensión en la alimentación del soldador <math>E_a</math>.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 40 Corriente de soldadura <math>I_2</math>.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 41 Tensión <math>E_1</math>.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 42 Tensión del lado del secundario del transformador interno del soldador.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 43 Tensión del antiparalelo del SCR.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 44 Tensión del proceso de soldadura.....</i>	<i>50</i>

<i>Figura 45 Corriente del lado secundario del transformador de la fuente.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 46 Corriente del lado primario del transformador interno del soldador.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47 Corrientes de las fases ABC.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 48 Tensión de las fases ABC en el intervalo de tiempo en el estado de encendido ON.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 49 Tensión de las fases ABC en el intervalo de tiempo de la máquina en el estado de apagado OFF.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 50 Medición del Pst con la carga perturbadora desconectada del sistema trifásico.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 51 Medición del Pst conectada a la red.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 52 Medición del Pst sin el transformador de alimentación de las cargas lineales.....</i>	<i>56</i>

## LISTA DE TABLAS

### PAG

Tabla 1 Niveles de compatibilidad de la severidad de “flicker” en redes de distribución.....	24
Tabla 2 Parámetros eléctricos del soldador de punto.....	27
Tabla 3 Datos tiempo de soldadura VS resistencia dinámica.....	29
Tabla 4 Datos de los transformadores para el sistema monofásico.....	34
Tabla 5 Valores pico de los parámetros monofásicos.....	39
Tabla 6 Límites permitidos del Pst y el Plt (IEC 61000-4-7, IEC 61000-2-14).....	41
Tabla 7 Datos del Pst sin el soldador conectado a la red.....	42
Tabla 8 Datos del Pst con el soldador conectado a la red.....	43
Tabla 9 Datos del Pst retirando el alimentador de las cargas lineales.....	44
Tabla 10 Datos de los transformadores para el sistema trifásico.....	45
Tabla 11 Valores pico de los parámetros trifásicos.....	51
Tabla 12 Datos del Pst con la carga perturbadora desconectada del sistema trifásico.....	54
Tabla 13 Datos del Pst con la carga perturbadora conectada a la red.....	55
Tabla 14 Datos del Pst sin el transformador de alimentación de las cargas lineales.....	56



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Definición del problema

Las características (amplitud, forma, frecuencia y simetría) de la onda de tensión producida por las centrales generadoras pueden verse alteradas por diversas causas. Estas desviaciones de alguno de los parámetros de la onda sinusoidal ideal se conocen como perturbaciones.

Las perturbaciones pueden ser generadas por varias causas, una de las cuales es la conexión a la red de energía eléctrica de ciertos tipos de cargas (cargas perturbadoras) de posible utilización por los clientes de la empresa.

La conexión de una carga importante a una red de distribución, requiere de un estudio preliminar para evitar inconvenientes al resto de las cargas conectadas al mismo punto de conexión. Cuando la naturaleza de la carga es constante, o bien tiene variaciones lentas, por lo general no es necesario el estudio previo.

Entre los temas que más preocupan en calidad de energía o suministro eléctrico son los armónicos y el flicker de tensión. El flicker es el fenómeno de variación de la intensidad luminosa que afecta a la visión humana generado por fluctuaciones en la tensión de red. Las principales causas son las conexiones de grandes motores de inducción, compresores, trenes laminadores, bancos de capacitores, soldadoras y hornos de arco (cargas no lineales) entre otras, a redes eléctricas deficientes o sin sistemas de control que inhiban de transitorios en los casos de arranques y paradas de motores. Estas componentes no causan variación de amplitud de tensión, sino que hacen oscilar la tensión en el entorno del régimen estable.

Las variaciones de tensión son uno de los peores eventos de calidad de energía debido a sus efectos perjudiciales sobre sistemas de control y electrónicos sensibles a la calidad de onda de tensión.

Es un hecho conocido que el comportamiento como carga eléctrica de las máquinas de soldadura por resistencia se caracteriza por cambios extremadamente rápidos, bruscos ("picos") de potencia total. Esas fluctuaciones rápidas de la carga son la causa de caídas de voltaje y provocan además niveles altos de parpadeo (flicker) los cuales con frecuencia no están en conformidad con los límites recomendados por IEEE é IEC, y generalmente exigidos por las empresas proveedoras del servicio de suministro de energía eléctrica. Esos problemas de calidad de energía son frecuentemente la fuente de una baja confiabilidad del proceso de soldadura y de una baja calidad de la misma así como un factor limitante de la producción y los servicios ofrecidos por la planta donde se realiza dicho proceso.

Este proyecto describe los aspectos de calidad de energía eléctrica y tensiones tomadas durante la simulación en el Punto de Conexión Común (PCC) donde se encuentra conectado un soldador de punto.

## 1.2 Justificación

Lo que se busca con este proyecto es realizar un diagnostico del flicker y analizar la transferencia del mismo causado por el soldador de punto y ver su comportamiento como carga perturbadora dentro de una red de distribución con la ayuda de un entorno de simulación.

Debido a la creciente utilización de equipos electrónicos altamente sensibles a perturbaciones electromagnéticas, ha aumentado la preocupación de los usuarios, en cuanto a que tan buena es la calidad de las señales de tensión y de corriente de la red eléctrica, ya que estos equipos pueden presentar perturbaciones en los sistemas de distribución que afecta la calidad de potencia.

Desde hace ya algunos años se ha incrementado el interés en el área de la calidad de energía, debido entre otras razones, a las pérdidas industriales que se presentan cuando la calidad de esta es deficiente para los usuarios del sistema de potencia. Hoy en día para las empresas de distribución y comercialización de energía eléctrica, una de las prioridades es ofrecer un servicio con alto nivel de calidad, confiabilidad y continuidad, para así poder garantizar a los usuarios un correcto desempeño de sus equipos y procesos.

Uno de los principales actores que impactan en el deterioro de la calidad de la energía eléctrica es el uso de las cargas no lineales como por ejemplo el soldador de punto.

Para entender cómo el soldador de punto influye en el deterioro de la calidad de la energía se parte del funcionamiento básico de la máquina. Esta hace pasar una corriente eléctrica de gran intensidad a través de los metales que se van a unir. Como en la unión de los mismos la resistencia es mayor que en el resto de sus cuerpos, se genera el aumento de temperatura en la juntura (efecto Joule). Aprovechando esta energía y con un poco de presión se logra la unión. La alimentación eléctrica pasa por un transformador en el que se reduce la tensión y se eleva considerablemente la corriente para aumentar la temperatura. El aumento rápido en la corriente produce en la red una perturbación de tensión llamada flicker. Este fenómeno consiste en la variación del valor eficaz o amplitud de la tensión en un rango menor al 10% del valor nominal.

Esta variación de la amplitud de la tensión produce fluctuación del flujo luminoso en lámparas, induciendo a su vez la impresión de inestabilidad en la sensación visual (efecto parpadeo visual).

El flicker depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las variaciones de la tensión y se expresa como el cambio de la tensión rms dividido por la tensión promedio rms.

Ocurre en un rango de frecuencias que va desde 0.5 a 25Hz; demostrándose a través de pruebas, que el ojo humano es muy sensible a frecuencias moduladoras en el rango de 8 a 10 Hz con variaciones de tensión en el rango de 0.3 a 0.4% de magnitud a estas frecuencias.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Analizar el flicker producido por una máquina soldadora de punto usando un paquete de simulación.

### 1.3.2 Objetivo específicos

- Modelar el soldador de punto.
- Implementar el modelo del soldador de punto en PSCAD.
- Para estimar el nivel de flicker producido por la operación del soldador de punto se utilizará el flicker meter herramienta en MATLAB
- Cuantificar los efectos del flicker causados por un soldador de punto sobre la red. Por ejemplo caída de tensión, transferencia de flicker entre otros.



## 2. CONCEPTOS BASICOS

### 2.1 ¿Que es un soldador de punto?

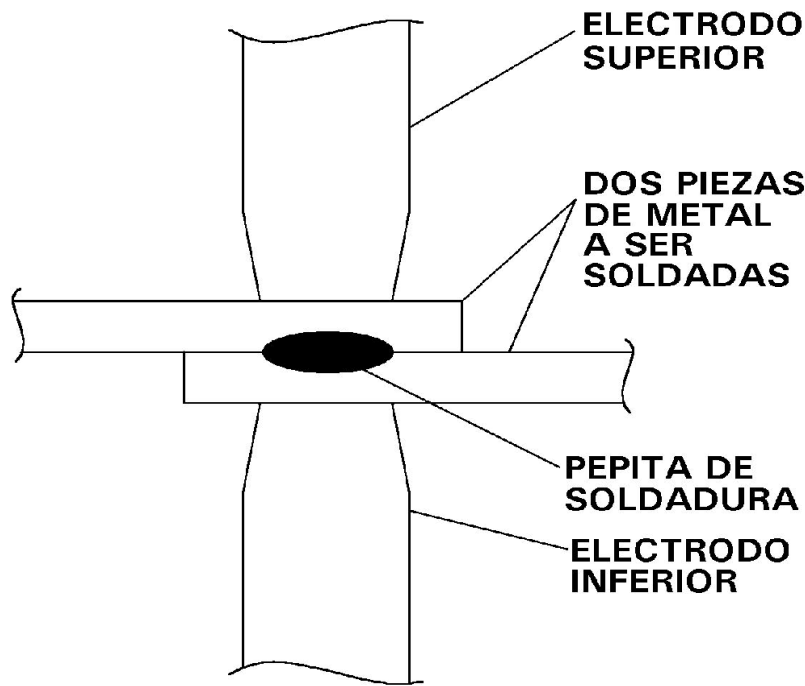
Un soldador de punto es una máquina eléctrica que permite hacer la unión de dos o más metales mediante la combinación de fuerza mecánica y un elevado nivel de corriente eléctrica, para lograr un aumento en la temperatura del material que se desea soldar.

*Figura 1. Soldador de punto*



### 2.1.1 ¿Como se hace un soldadura por resistencia?

*Figura 2. Electrodo del soldador de punto [1]*



Se presionan las dos piezas de metal que se desean soldar para conseguir un contacto eléctrico eficiente. Luego se inicia el paso de la corriente eléctrica a través de ellos, se eleva la temperatura hasta que se funden en el punto de contacto de los metales. El material fundido permite la unión de las dos piezas, después la corriente deja de pasar a través de los metales y el material fundido se solidifica, lo que permite una unión fuerte entre las dos piezas de metal. La palabra “soldadura por resistencia” se debe a que lo que permite que se presente un aumento en la temperatura de los elementos a ser soldados es la resistencia eléctrica de los metales cuando fluye a través de ellos una corriente. [1]

El método de soldadura por resistencia involucra el paso de una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales para lograr un aumento en el calor debido a la resistencia generada por la superficie de contacto de los metales. Cuando fluye la corriente de un valor elevado (1000 a 100000A) a través de la unión de los metales se forman pequeños charcos de material fundido. La soldadura por resistencia es en términos generales un método limpio y eficiente pero con aplicaciones limitadas y equipos de alto costo. [1]

Uno de los métodos más populares de la soldadura por resistencia es la soldadura por puntos que se utiliza para unir láminas de metal de hasta 3mm de grosor. Para este método se utilizan dos electrodos para sostener las hojas de metal unidas y pasar corriente eléctrica a través de las láminas. Algunas ventajas de este método son la poca

deformación en la pieza de trabajo, fácil automatización, grandes velocidades de producción, utilización eficiente de la energía, y la no necesidad de material adicional para soldar. La resistencia de este tipo de soldadura es menor que la ofrecida por otros métodos de soldadura por lo que el método se ve limitado a ciertas aplicaciones específicas. Este método de soldadura es utilizado popularmente en la industria automotriz, por lo que un automóvil común puede poseer varios miles de puntos de soldadura realizados por robots automatizados. [1]

### **2.1.2 ¿Cuales son los factores importantes al hacer una soldadura?**

Lo más importante para la formación del área fundida entre dos piezas es la magnitud y el tiempo en que fluye la corriente, también la fuerza al presionar las piezas. El valor apropiado para estos parámetros oscila con el tipo de metal y grosor. Para el acero bajo en carbón es utilizado 1/16" de grosor, un valor apropiado de corriente es de 10.000 amperios, por un tiempo de 1/4 de segundo, con una fuerza en los electrodos de 600 libras. Programas de soldadura por resistencia están disponibles a través de la Sociedad Americana de Soldadura, Asociación de Fabricantes de Soldadura de Resistencia y la mayoría de los fabricantes de máquinas soldadoras. [1]

### **2.1.3 ¿Cómo se obtiene la corriente adecuada?**

Una corriente del orden de Kilo amperios no es disponible en cualquier tomacorriente. La máxima corriente disponible en los tomacorrientes residenciales es de 15 amperios. Aun en las grandes fábricas se utilizan 200 amperios en los circuitos de distribución eléctrica. Sin embargo, para encontrar 10.000 amperios necesarios para la soldadura por resistencia, se debe usar un transformador para aumentar la corriente desde un nivel relativamente bajo de la línea de energía. Los transformadores son variadores ya sea para aumentar o disminuir tensión y corriente. Un transformador contiene dos bobinas de alambre, primaria y secundaria respectivamente, enrolladas en un núcleo de hierro. La energía es transferida entre bobinas por medio de las propiedades magnéticas del hierro. El factor causante del aumento o disminución de la corriente o voltaje esta expresado, como el cociente del número de vueltas del embobinado primario y secundario del transformador. En el ejemplo siguiente se necesitan 10.000 amperios. Un transformador tiene 100 vueltas en el primario y 2 en el secundario, cuyo cociente vuelta es de 50. Una corriente de 200 amperios es transformada en  $200 \times 50$  o 10000 amperios en el secundario, perfecta para el proceso de soldadura. [1]

### **2.1.4 ¿Cómo es controlado el tiempo?**

Para controlar la duración del tiempo que la corriente de soldadura fluye a través de las dos piezas de metal se consideran dos dispositivos: El tubo de ignitrón, y el rectificador controlado con silicón (SCR). Ambos operan en virtud del hecho de que una pequeña señal eléctrica aplicada al aparato le permite a éste conectar en una pequeña fracción de segundo y conducir una gran cantidad de corriente. Removiendo la señal eléctrica se permitirá al dispositivo desconectarse nuevamente. La rapidez en conectarse y desconectarse es posible porque no hay partes mecánicas en movimiento. Los tubos de ignitrón operan con el principio de ionización del vapor de mercurio, mientras los rectificadores controlados de silicón operan en el principio de los semiconductores de estado sólido similar a los transistores. [1]

### **2.1.5 ¿Cómo se obtiene la fuerza en los electrodos?**

Otro factor crítico en la soldadura de resistencia es la Fuerza de Electrodo (presión sobre los metales juntos). Esta fuerza es necesaria para asegurar un buen contacto eléctrico entre las partes que van a ser soldadas, y para mantener las partes fijas hasta que el metal derretido tenga tiempo de solidificarse.

Se usan varios métodos de desarrollo de los electrodos dependiendo del tamaño y tipo de máquina soldadora, pero el más común es usar aire comprimido: En un cilindro con un pistón, en el cual el cilindro va rígidamente unido al marco de la máquina soldadora y el pistón movable está conectado al electrodo superior. El aire comprimido introducido en el cilindro desarrolla una fuerza en el pistón que, a su tiempo, empuja hacia abajo el electrodo contra el metal a ser fundido. La cantidad de fuerza aplicada depende del área del pistón y de la presión del aire comprimido. [1]

### **2.1.6 ¿Qué es un control de soldadura por resistencia?**

La función del control de soldadura es aplicar la corriente de soldar en el momento apropiado durante la operación de la máquina soldadora (coordinar la aplicación de la corriente de soldadura con el movimiento mecánico de la máquina soldadora), es decir, el control cierra y abre los electrodos y también arranca y detiene la corriente de soldadura. [1]

### **2.1.7 ¿Como está conectado el control de soldadura a la máquina de soldar?**

Este control produce dos señales: una para encender y apagar los SCR o ignitrones (para la corriente del control) y otra para encender y apagar una válvula eléctrica operada con aire (para el control de la máquina). Los SCR y los ignitrones realizan una función básicamente de cambio de manera, son conectados en serie con su carga en el circuito primario ya que los requisitos de corriente son más bajos. [1]

Figura 3. Cilindro y pistón del soldador de punto

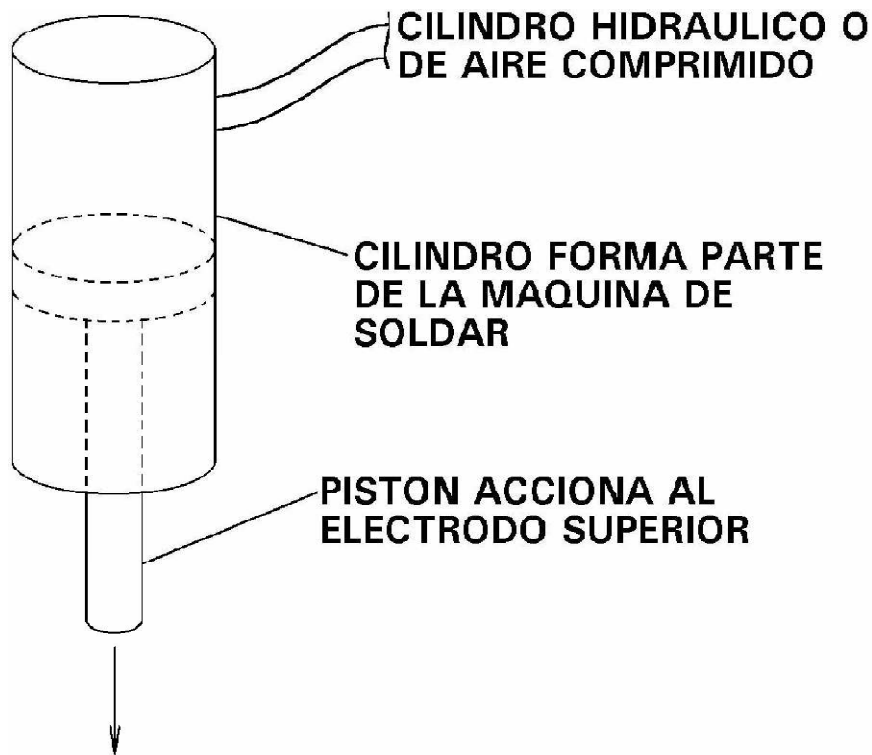
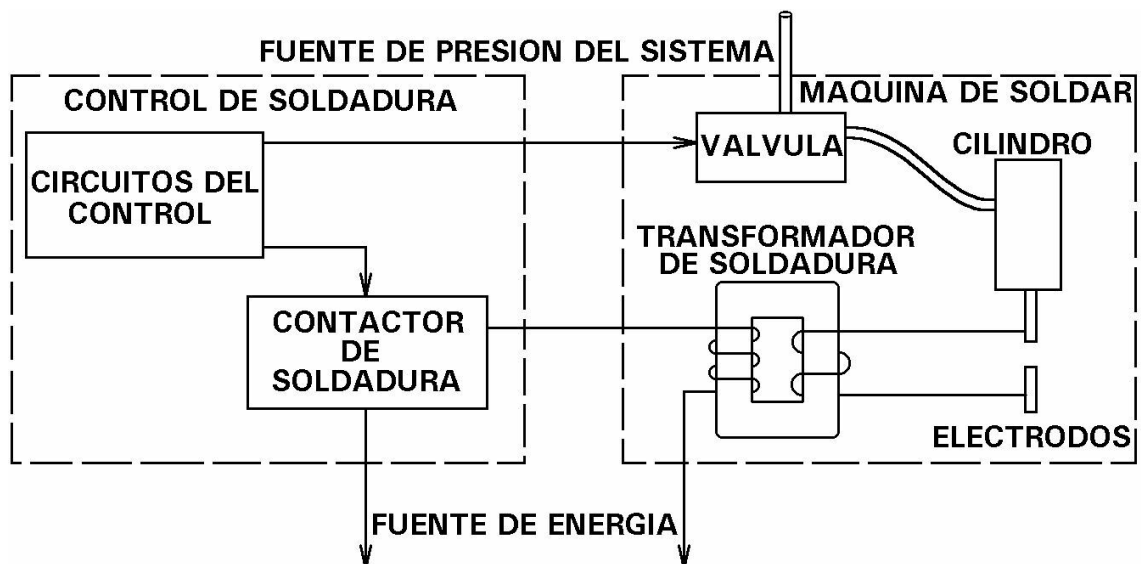


Figura 4. Forma de conectar el control de soldadura a la máquina de soldar

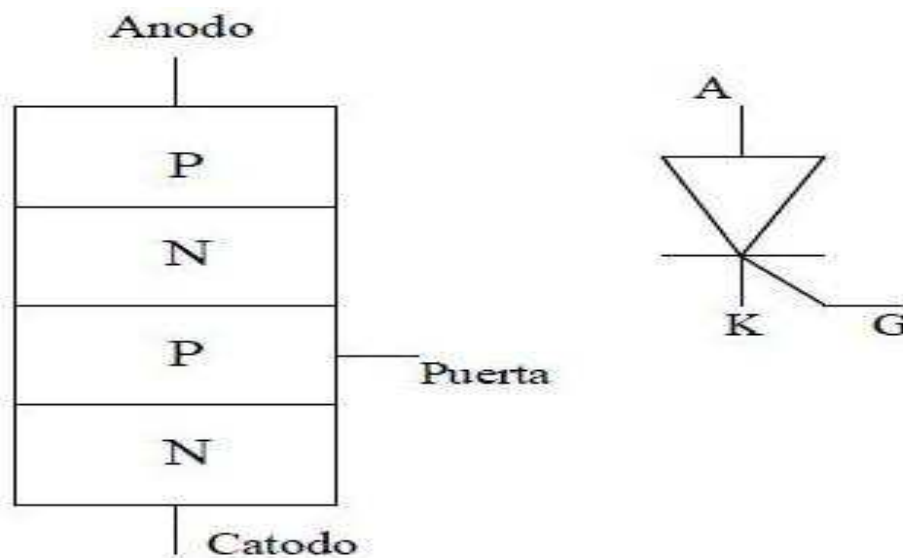


### 2.2 Rectificador controlado de silicio (S.C.R.)

El S.C.R. es un dispositivo semiconductor biestable de cuatro capas (PNPN) está formado por 3 terminales que son ánodo, cátodo y puerta. Posee cualidades como rectificador y amplificador a la vez, es un conmutador casi ideal, soporta grandes niveles de tensión, puede controlar grandes potencias. Todas estas ventajas lo ubican como uno de los dispositivos de mayor aplicación. Su estructura interna y símbolo son mostrados en la figura 5. [2]

*“El símbolo es similar al de un diodo convencional con la diferencia de poseer un terminal adicional, llamado de puerta o de control. La operación básica del S.C.R. es diferente a la del diodo convencional por el hecho de que el tercer terminal, el de puerta, determina cuando pasa del estado de corte a conducción.” [2]*

Figura 5 Estructura y símbolo del SCR



#### 2.2.1 Características del SCR

*“La figura 6 muestra la curva característica estática del tiristor. Si se le aplica un voltaje inverso fluye una pequeña corriente inversa de fuga; si el voltaje inverso se sigue incrementando, la corriente inversa sigue creciendo hasta que se presenta la ruptura por avalancha; se observa que la operación en el tercer cuadrante es similar a la del diodo convencional. Se definen a continuación los parámetros que aparecen señalados en la curva de la figura 6:” [2]*

$V_{BO}$  = Voltaje de ruptura; Voltaje que permite la conducción del tiristor con  $I_G = 0$ .

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

$V_{DSM}$  = Voltaje máximo no repetitivo; Se especifica para un pulso de voltaje de cierta duración. (Usualmente  $< 10$  seg.).

$V_{DRM}$  = Voltaje máximo de bloqueo directo; Valor pico del  $V_{AK}$  en sentido directo.

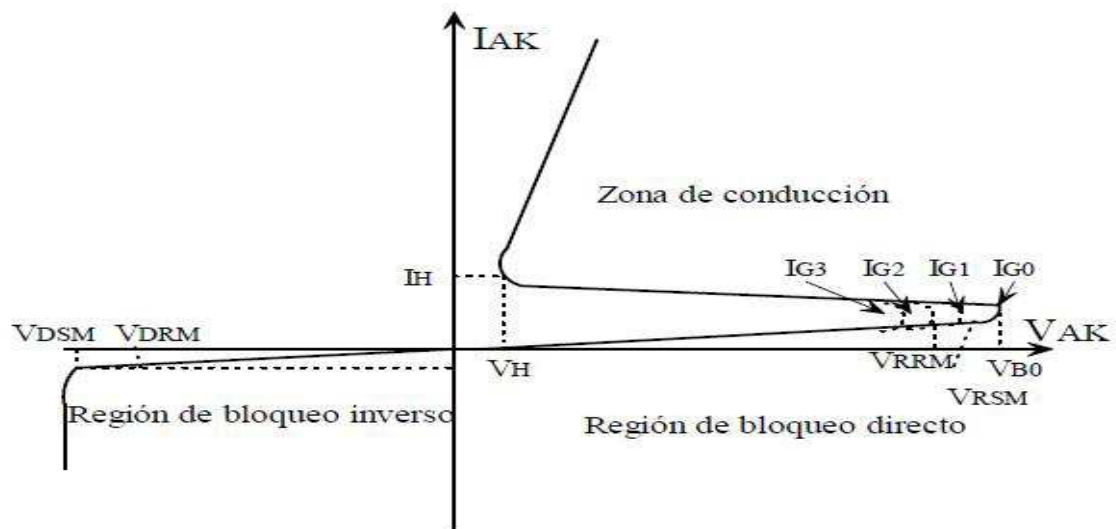
$V_{RRM}$  = Voltaje inverso máximo; Voltaje inverso que puede soportar sin entrar en avalancha.

$V_{RSM}$  = Voltaje de pico inverso de cualquier transitorio no repetitivo. Es el voltaje transitorio máximo no repetitivo de sentido inverso que puede soportar.

Corriente de sostenimiento; Corriente mínima que garantiza el estado de conducción. Si  $I_{AK} < I_H$  el S.C.R se bloquea.

“Corriente de enganche; Es la mínima corriente que debe alcanzar  $I_{AK}$  para que el S.C.R. alcance el estado de conducción, inmediatamente después del proceso de conmutación del estado de bloqueo al de conducción y de que la señal de compuerta ha sido removida.  $I_H < I_L$ .” [2]

Figura 6 característica estática del SCR



### 2.2.2 Factores que provocan el encendido del SCR

Hacer cambiar el S.C.R del estado de no conducción (apagado) al de conducción (encendido) es lo que se llama activarlo. Los métodos deseados de activación y que admiten que se realice un control adecuado de la corriente entre ánodo - cátodo,  $I_{AK}$ , son aquellos que manipulan el terminal de puerta para esos propósitos, o sea que al aplicar una corriente de puerta  $I_G > I_{GMIN}$  provocan el mecanismo regenerativo de corriente

hasta que el S.C.R. conduzca. Los criterios utilizados para el disparo adecuado del tiristor a través del terminal de puerta serán analizados más adelante. [2]

Cualquier otro método de encendido empleado en el SCR, no es recomendable, ya que puede influir en la vida útil del dispositivo y también provocar la pérdida de la capacidad de controlar la corriente  $I_{AK}$  a través de la puerta. [2]

Existen diversos agentes que pueden provocar disparos indeseados en el dispositivo como tensión, tasa de cambio del voltaje ( $dv/dt$ ) y temperatura; por lo tanto deben emplearse los métodos adecuados para evitarlos. [2]

### 2.3 NTC 818 Norma Técnica Colombiana

#### **Electrotecnia.**

#### **Transformadores. Transformadores Monofásicos Autorrefrigerados y Sumergidos en líquido.**

*“Estas tablas se utilizan para encontrar las pérdidas de los transformadores en vacío y con carga. Reemplazando en la formula la potencia requerida. [3]*

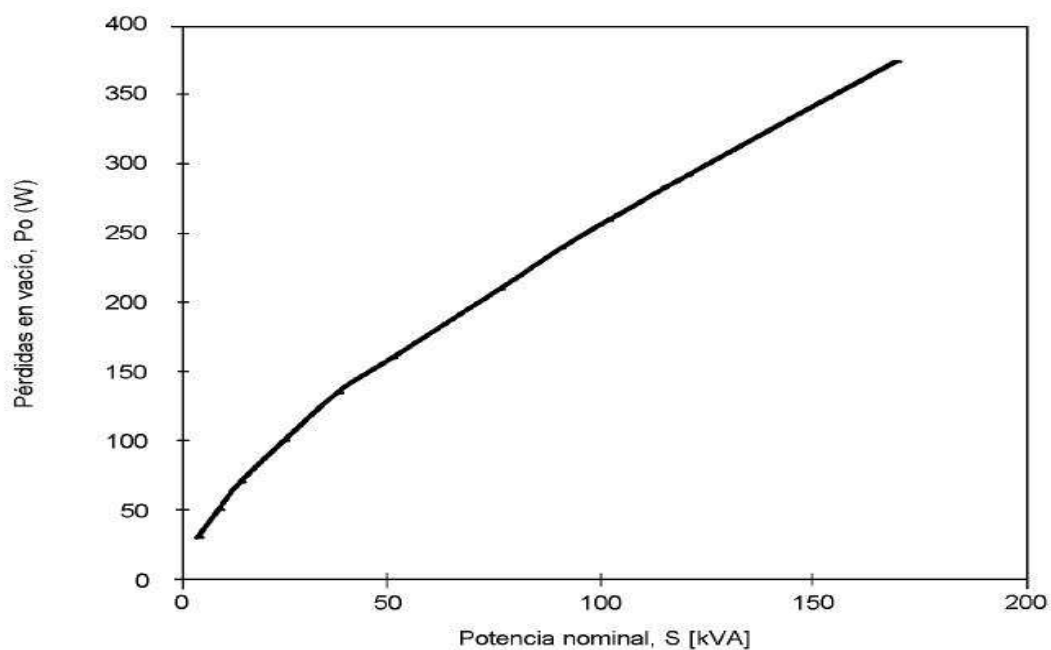
*Los efectos de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos son:*

- *Distorsión de voltaje en el sistema eléctrico.*
- *Interrupción de procesos productivos.*
- *Excesivas corrientes de retorno en el neutro.*
- *Altos niveles de voltaje de neutro a tierra.*
- *Sobrecalentamientos en los transformadores y elevados campos electromagnéticos.*
- *Disminución en la capacidad de los equipos de distribución.*
- *Penalizaciones tarifarias debido al bajo factor de potencia.” [3]*

*Transformadores monofásicos entre 5 y 165.5KVA  
Serie A.T.  $\leq 15KV$  / serie B.T.  $\leq 1.2KV$ .*

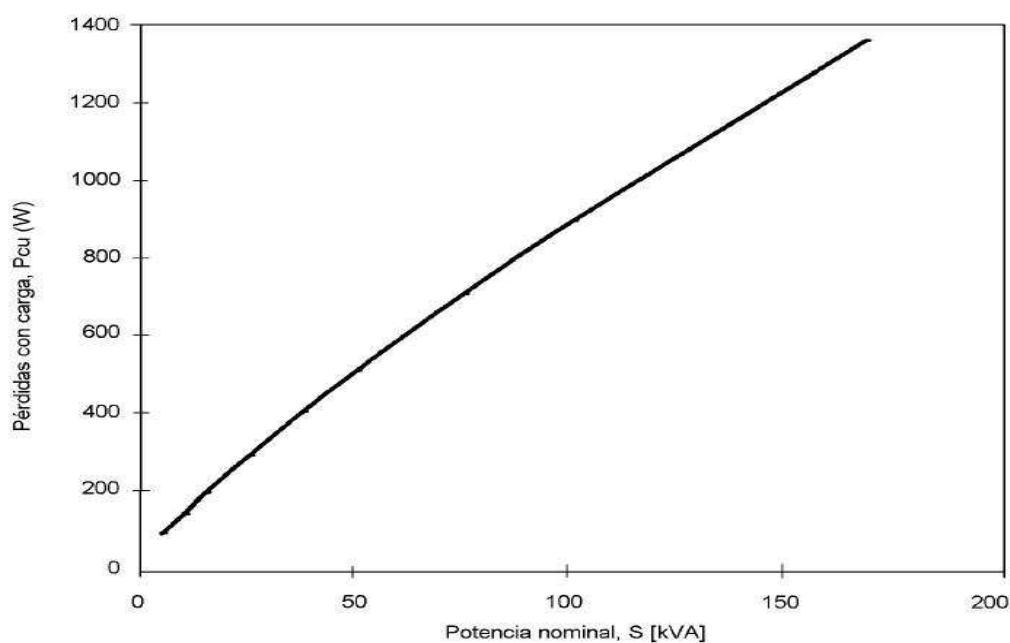


Figura 7. Curva de perdidas en vacío



a) Pérdidas en vacío  
$$P_o = 9.8033 \cdot (P_n)^{0.7141} \quad (2.1)$$

Figura 8. Curva de pérdidas con carga



b) *Perdidas con carga*

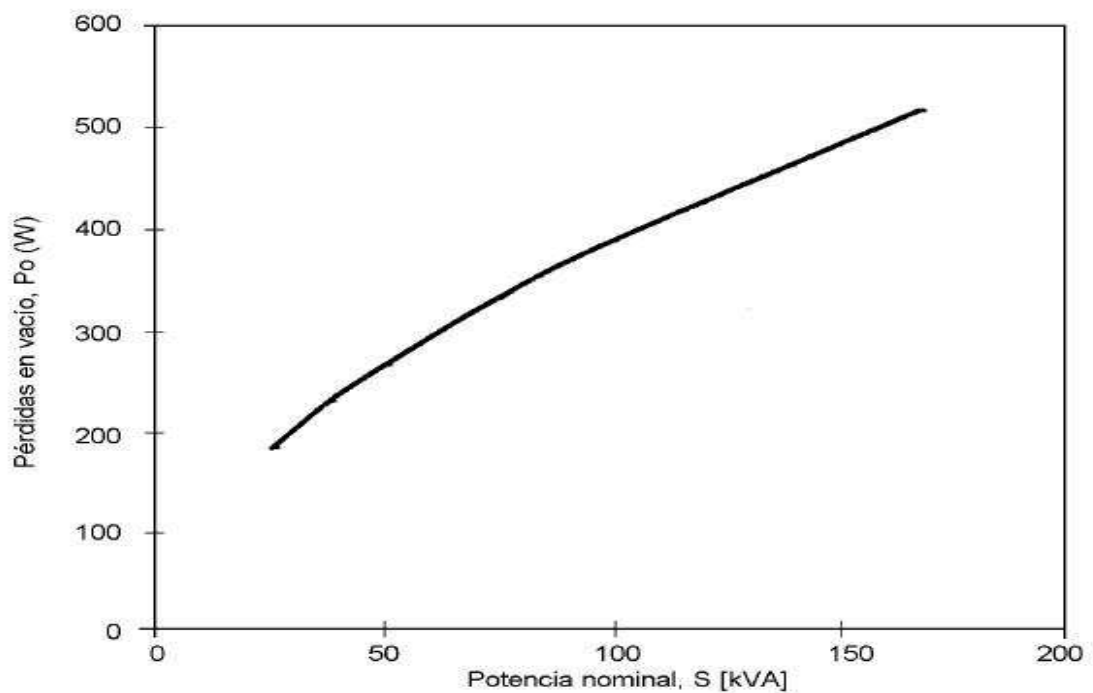
*Temperatura de referencia = 85C°*

$$P_o = 0.000063*(P_n)^3 - 0.02695*(P_n)^2 + 10.657*(P_n) + 38.267 \quad (2.2)$$

*Transformadores monofásicos entre 25 y 167.5KVA a 167.5KVA*

*15KV < Serie A.T. ≤ 36KV / serie B.T. ≤ 1.2KV. [3]*

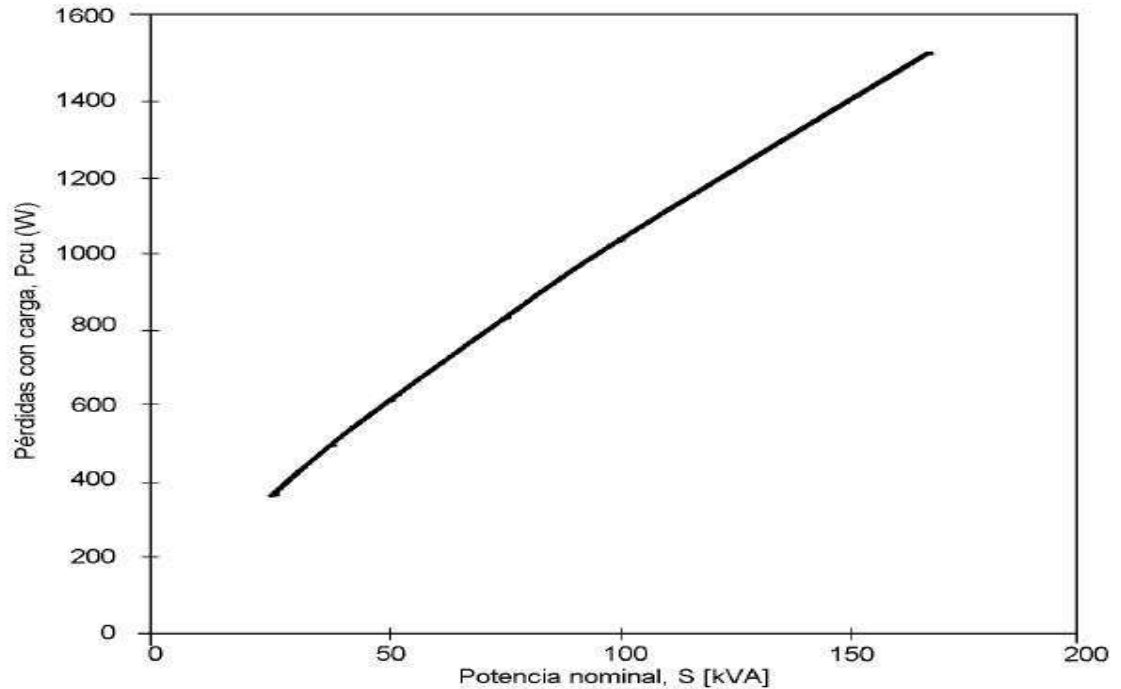
*Figura 9. Curva de pérdidas en vacío*



a) *Perdidas en vacío*

$$P_o = 33.2967*(P_n)^{0.532} \quad (2.3)$$

Figura 10. Curva perdidas con carga



b) Pérdidas con carga      Temperatura de referencia 85°C°

$$P_c = 32.2692 * (P_n)^{0.74967} \quad [3] \quad (2.4)$$

## 2.4 NTC 819 Norma Técnica Colombiana

### Electrotecnia.

**Transformadores trifásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito**

*“Esta norma establece los valores máximos declarados admisibles de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga ( $P_c$ ) y tensión de cortocircuito, a 85 °C ( $U_z$ ), para transformadores trifásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido refrigerante.” [4]*

*Se aplica transformadores de potencia:*

*a) Desde 15 kVA hasta 3 750 kVA , con tensión serie A.T. menor o igual a 15 kV y tensión serie B.T. menor o igual a 1,2 kV.*

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

b) Desde 75 kVA hasta 10 000 kVA , con tensión serie A.T. mayor que 15 kV y menor o igual a 46 kV y tensión serie B.T. menor o igual a 15 kV.

La curva característica de las pérdidas sin carga se debe establecer de acuerdo al valor de la potencia nominal del transformador, de la siguiente manera: [4]

Desde 15 kVA hasta 150 kVA ,

$$P_o = 10,514 \times P_n^{0,7486} \quad (2.5)$$

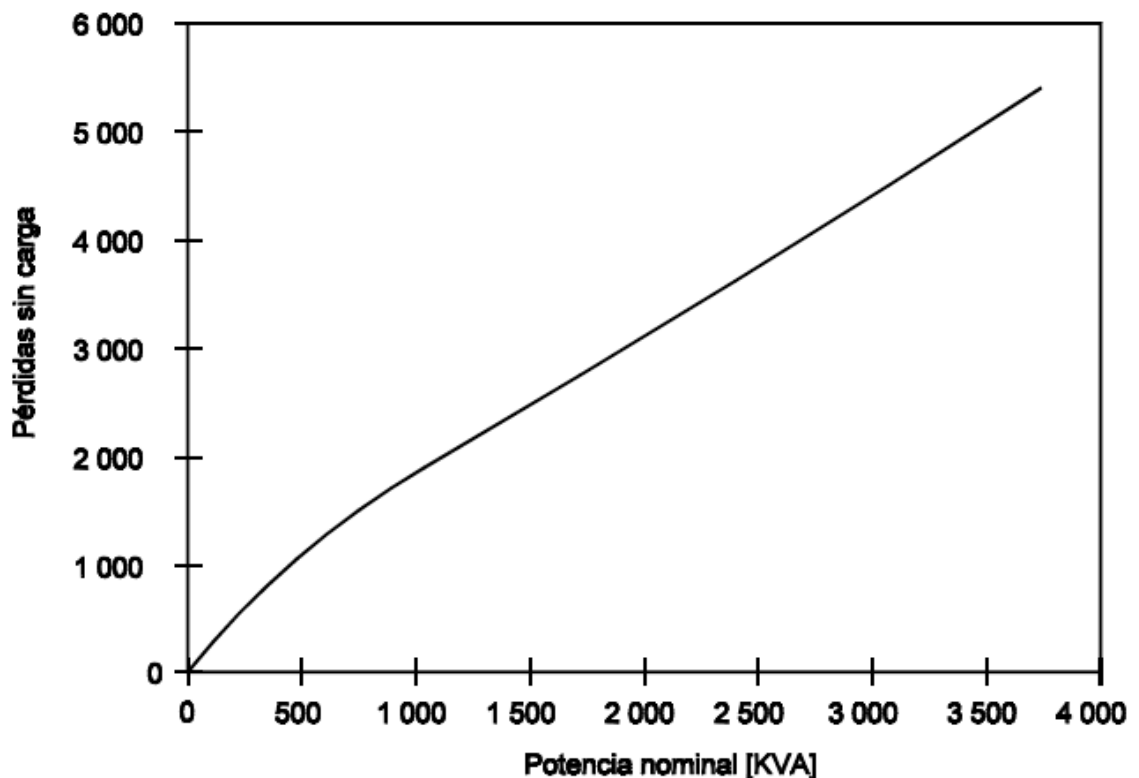
Mayores de 150 kVA hasta 800 kVA ,

$$P_o = 13,27 P_n^{0,7093} \quad (2.6)$$

Mayores de 800 kVA hasta 3 750 kVA ,

$$P_o = 1,227 \times P_n + 554,59 \quad (2.7)$$

Figura 11. Curva característica de las pérdidas sin carga ( $P_o$ )



“La curva característica de las pérdidas con carga se debe establecer de acuerdo al valor de la potencia nominal del transformador, de la siguiente manera:” [4]

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

Desde 15 KVA hasta 150 kVA ,

$$P_c = -0,0103 P_n^2 + 13,892 P_n + 106,65 \quad (2.8)$$

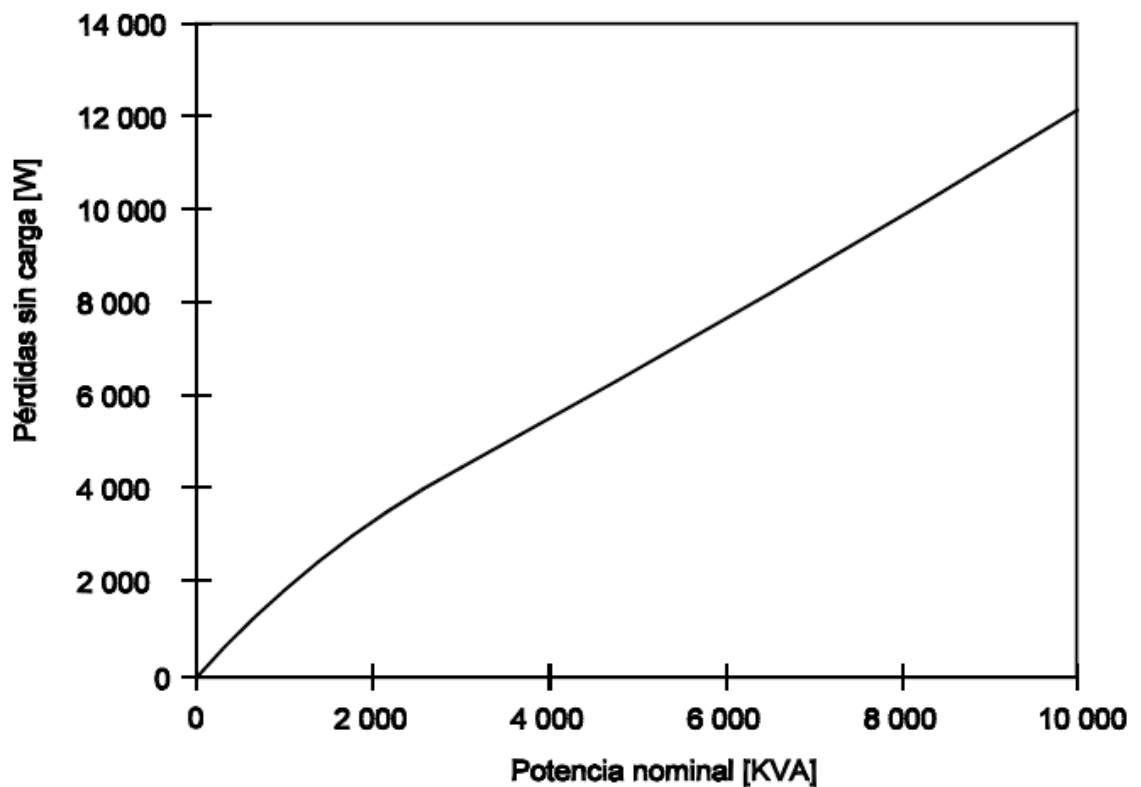
Mayores de 150 kVA hasta 800 kVA ,

$$P_c = 10,465 \times P_n + 537 \quad (2.9)$$

Mayores de 800 kVA hasta 3 750 kVA ,

$$P_c = 9,2632 \times P_n + 1875,2 \quad (2.10)$$

Figura 12. Curva característica de las Pérdidas con carga ( $P_c$ )



*La curva característica de las pérdidas sin carga se debe establecer de acuerdo al valor de la potencia nominal del transformador, de la siguiente manera: [4]*

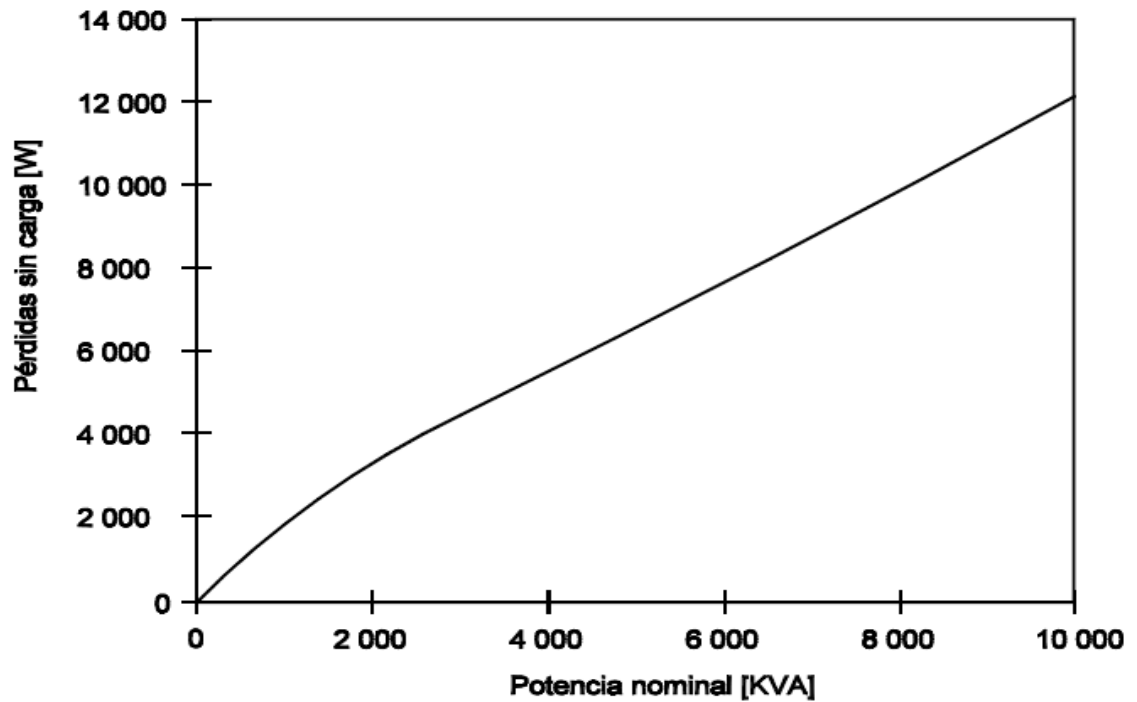
Desde 75 kVA hasta 800 kVA , Mayores de 800 kVA hasta 10 000 kVA ,

$$P_o = 8,3104 \times P_n + 0,7926 \quad (2.11)$$

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

$$P_o = 23,558 \times P_n^{0,6487} \quad (2.12)$$

Figura 13. Curva característica de las pérdidas sin carga ( $P_o$ )



*La curva característica de las pérdidas con carga se debe establecer de acuerdo al valor de la potencia nominal del transformador, de la siguiente manera: [4]*

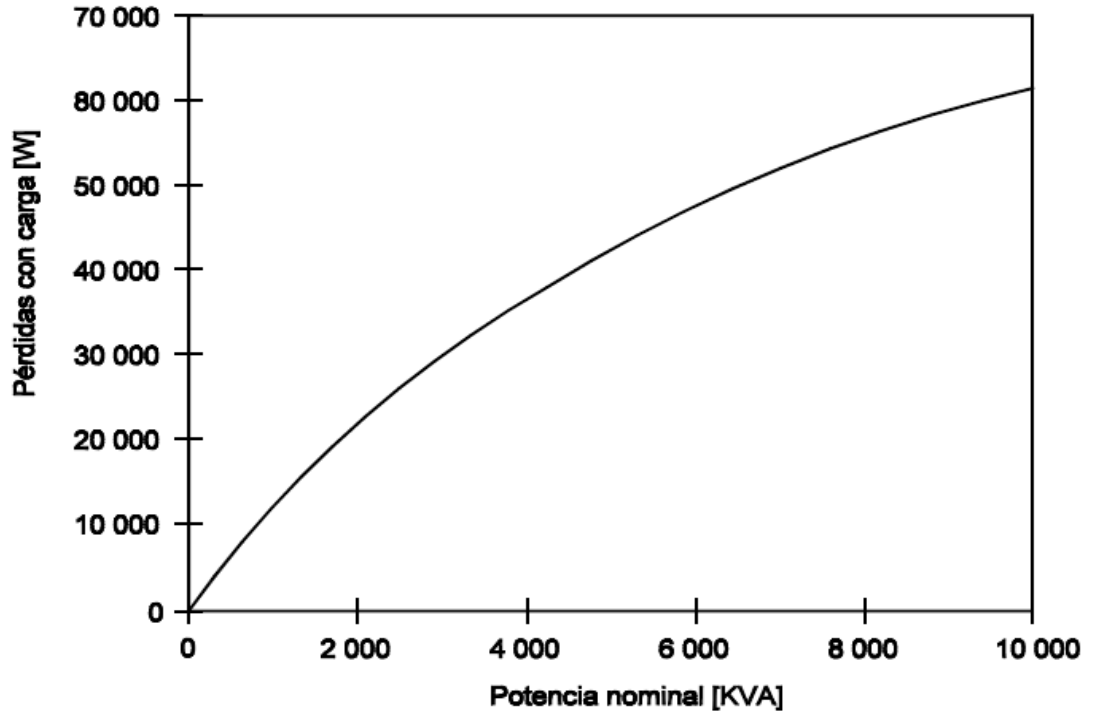
Desde 75 kVA hasta 800 kVA ,

$$P_c = 41,0332 \times P_n^{0,8118} \quad (2.13)$$

Mayores de 800 kVA hasta 10 000,

$$P_c = -0,0004 \times P_n^2 + 9,9981 \times P_n + 2447,5 \quad (2.14)$$

Figura 14. Curva característica de las pérdidas con carga (Pc)



## 2.5 Control integral. on-off

Este tipo de control aplica un determinado número de ciclos completos de la fuente de alimentación a la carga. El control se hace cambiando el número de ciclos aplicados (ON) comparados con el número de ciclos cuando la alimentación es desconectada (OFF).

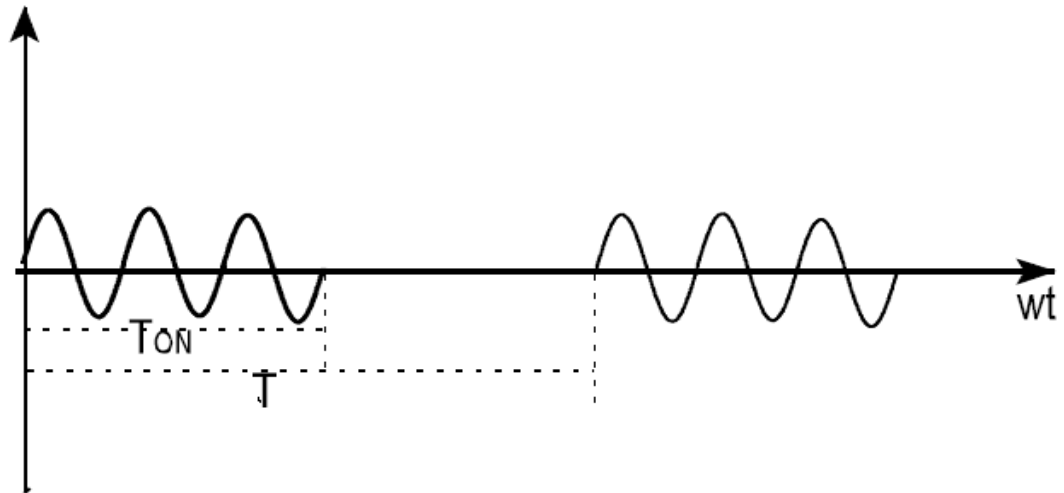
La principal ventaja de éste método es que fluye corriente sinusoidal durante los ciclos ON, evitando los armónicos de frecuencias altas.

El problema de este tipo de control es que se presentan sub armónicas, es decir frecuencias por debajo de la fundamental en este caso la de la red, 60 ciclos.

Si  $v(wt) = V_p \sin(wt)$ , y la carga se conecta durante N ciclos y se desconecta durante M, la tensión RMS en la carga es: [2]

$$v_o(wt) = \left[ \frac{N}{2\pi T} \int_0^{2\pi} (V_p \sin(wt))^2 d(wt) \right] = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{N}{T}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \sqrt{k} \quad (2.15)$$

Figura 15. Control de ciclo integral ON OFF



Existen diversas formas de variar la potencia aplicada a la carga:

1.  $T$  constante y  $N$  variable.
2.  $N$  constante y  $T$  variable.
3.  $T$  y  $N$  pueden variar para obtener condiciones de control óptimas. [2]

### 2.6 Calidad de la energía

La energía eléctrica debe ser suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes. [5]

Cuatro parámetros pueden servir para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía:

- Variaciones de frecuencia, comúnmente se encuentran en sistemas aislados de motor-generator en los que las variaciones de carga provocan variaciones de frecuencia.
- Variaciones de amplitud que van desde transitorios de muy corta duración hasta condiciones de estado estable.
- Variaciones en la forma de onda de voltaje o corriente producidos por cargas no lineales (distorsión armónica).
- Desbalance entre las fases de un sistema polifásico por la operación de cargas monofásicas desiguales en máquinas rotatorias y circuitos rectificadores trifásicos [5]



## 3. EFECTOS DE UN SOLDADOR DE PUNTO EN LA RED

### 3.1 Perturbación de la tensión (flicker)

El flicker se conoce como la variación de Voltaje en el tiempo, que es menor al 10% del Voltaje nominal (también son fluctuaciones de luminosidad en los sistemas de iluminación). Puede ser Sistemático o periódico y aleatorio o no periódico. El flicker es generado por la alimentación de cargas no lineales como hornos de arco eléctrico, máquinas soldadoras, trenes laminadores, arranques de motores asíncronos, compresores, bancos de capacitores, lámparas fluorescentes, computadoras, fotocopadoras, conexión a Redes Eléctricas deficientes que no posean sistemas de control para inhibir los desbalances en la Tensión por arranque y paro de motores etc. El efecto flicker depende de la variación de la Amplitud del Voltaje, Frecuencia y de la duración de la perturbación. Las Frecuencias de flicker van desde 0.05 a 35 Hz para tensiones de 230 Voltios nominales y Frecuencia de Red de 50 Hz; y de 0.05 a 42 Hz para tensiones de 120 Voltios nominales y Frecuencia de Red de 60 Hz. [6]

### 3.2 Flicker sistemático o periódico

*El flicker sistemático o periódico es aquel, que varia por las grandes cargas repetitivas que se encuentran en la Red Eléctrica como es el caso de los soldadores de punto. [6]*

#### 3.2.1 Modelo matemático de flicker periódico

*Las variaciones de Tensión de flujo luminoso que tienen la misma naturaleza, pueden expresarse según la siguiente fórmula:*

$$u(t) = U * (1 + m(t)) * \text{Sen}(\omega t) \quad (3.1)$$

$U$  = Amplitud máxima del Voltaje

$m(t)$  = Función matemática que modula la Amplitud

$\omega$  = Pulsación angular de la Red.

$\omega = 2\pi f$  [6]

#### 3.2.2 Fórmula Matemática general para determinar el Flicker

*El flicker se define como el cambio de la Tensión rms dividido por la Tensión promedio rms:*

$$d(t) = \frac{\Delta V}{V} = \left( \frac{\Delta S(t)}{S_c(t)} \right) * \cos(\Psi - \Phi) \quad (3.2)$$

$\Delta V$  = Cambio de Tensión rms  
 $V$  = Cambio promedio de Tensión rms  
 $d(t)$  = Cambio relativo de Tensión  
 $\Delta S(t)$  = Cambio de la carga  
 $S_c(t)$  = Capacidad de Cortocircuito  
 $\Psi$  = Ángulo de  $S_c$   
 $\Phi$  = Ángulo del cambio de carga [6]

### 3.3 Medición del parpadeo

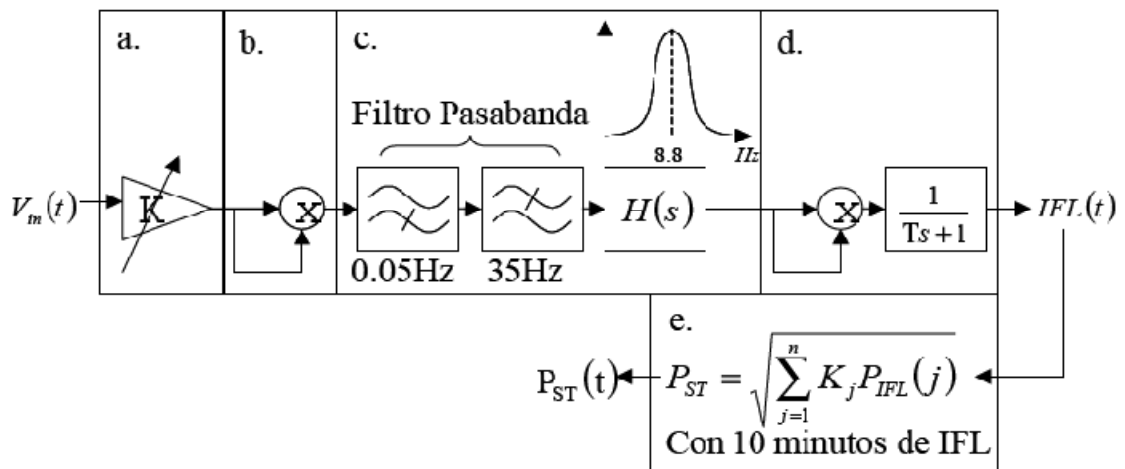
Las mediciones de fluctuaciones de tensión son convenientes cuando se requiere conocer los valores reales de emisión de la carga y realizar la comparación con los valores límite que están establecidos en las normas de compatibilidad electromagnética (EMC). [7]

Los propósitos principales para realizar las mediciones de las fluctuaciones de tensión son dos. El primero busca realizar la medición del nivel de la calidad de un sistema eléctrico, es decir, hacer una comparación del nivel de flicker en un punto determinado de medición con las recomendaciones indicadas en las normas existentes. El otro propósito, es para observar las cantidades de flicker de los equipos nuevos o prototipos, para lograr certificación de los mismos y poderlos vender con un respaldo de calidad.[7]

#### 3.3.1 Diseño del flickermeter

La norma internacional IEC 61000-4-15 proporciona las especificaciones funcionales y de diseños para medidores de flicker.

Figura 16. Partes principales del medidor de fluctuaciones de Tensión



- a. Adaptador de Entrada: Bloque de ganancia usado, para ajustar la magnitud de la señal de entrada.
- b. Demodulador Cuadrático: Bloque cuya función es que el medidor no dependa de la Frecuencia fundamental de (50 o 60Hz).
- c. Filtro de Ponderación: Limitan el ancho de banda de las perturbaciones muestreadas. Consideran la sensibilidad en relación con las diferentes Frecuencias de la perturbación.
- d. Estimador No Lineal de la Varianza: Modela la sensibilidad cuadrática, en relación con la Amplitud de la perturbación y la retención posterior de cada evento. A la salida de este bloque se obtiene la señal IFL.
- e. Tratamiento Estadístico: Mediante la raíz cuadrada de la suma ponderada (los coeficientes  $K_j$ ) de percentiles (PIFL ( $j$ )), calculados sobre una muestra de 10 minutos de IFL, se calcula el Pst. [8]

### 3.3.2 Flicker provocado por un soldador de punto

La carga variable que manejan los soldadores de punto, varía entre vacío y plena carga en forma brusca y repetitiva, provocando caídas de tensión en el alimentador de baja tensión que alimenta al equipo, como consecuencia de la corriente tomada por la carga y la impedancia de la red. [9]

El entorpecimiento en el buen funcionamiento de los equipos electrónicos puede ser una de las consecuencias de las variaciones de tensión, pero el principal efecto provocado por estas fluctuaciones variables en la tensión es la molestia visual causada a las personas debido a los equipos de iluminación que están conectados al mismo alimentador de las cargas perturbadoras. Las características de la red, la potencia del alimentador, la potencia de cortocircuito en el punto de conexión común (PCC), y la configuración de las líneas son elementos que tienen relación directa con el flicker producido en un sistema eléctrico. [9]

La Unión Internacional de Electrotecnología (UIE) a finales de la década de 1980 estuvo a cargo de la coordinación de trabajos más formales acerca de la evaluación de los efectos del flicker también llamada severidad del parpadeo. [7]

La descripción de los efectos del flicker en terminales de las cargas y en los sistemas eléctricos se realizaban hasta hace poco tiempo mediante el uso de factores relacionados con la variación de tensión pico a pico del sistema eléctrico. Para efectuar la estimación de las fluctuaciones de tensión se debían tener en cuenta aspectos como la energía de las fluctuaciones de tensión, su duración y el espectro de frecuencia de las mismas. [7]

El índice de severidad del parpadeo de corta duración PST y el índice de severidad del parpadeo de larga duración PLT en la actualidad son los factores utilizados para definir la severidad del parpadeo provocado por cargas perturbadoras. Estos factores son un indicativo de la influencia de los efectos de las fluctuaciones de tensión en los sistemas de iluminación y de los efectos provocados en los seres humanos. [7]

El flicker es un fenómeno que tiene relación directa con la potencia del soldador y la potencia de corto circuito del sistema. Por esta razón una solución al flicker puede lograrse aumentando la potencia de cortocircuito con relación a la potencia de carga en el punto de conexión al cual está acoplado el soldador. Pero esta solución no es la más adecuada debido a que el aumento de la potencia de corto circuito del sistema requiere aumentar su robustez y esto puede ser demasiado costoso; por otro lado disminuir la potencia de carga del soldador requiere que la máquina trabaje con una exigencia menor para la que se diseñó lo que disminuye su producción. [10]

Algunos de los elementos usados para reducir el flicker son los compensadores estáticos (SVC) controlados por tiristores, que son ampliamente usados en la industria como medio de compensación de factor de potencia en los soldadores de punto y otros componentes en sistemas de potencia. También cumplen con la función de regular el voltaje, compensar desbalances e incrementar la estabilidad del sistema. Además de esto, este tipo de reactores inyectan corrientes armónicas. [10]

### 3.4 Severidad de corta duración (Pst)

La contaminación por ruido existente en la red eléctrica provoca que las fluctuaciones de tensión hablando en términos prácticos no presenten la misma amplitud y forma de onda, debido a lo anterior los elementos utilizados para la medición de flicker almacenan los datos tomados en un intervalo de tiempo determinado. [6]

El periodo de medición de la severidad de corta duración PST es de 10 minutos, mediante el almacenamiento y procesamiento estadístico de las fluctuaciones en un aparato de medida para la evaluación de la irritabilidad provocada por el flicker, las probabilidades de que se presente un PST corresponden al 0.1, 1.0, 3, 10 y 50% del tiempo que dura el periodo de observación (10 minutos), según la Norma IEC 868 y se define por la siguiente expresión. [6]

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (3.3)$$

En donde:  $P_{0.1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  son los niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10% y 50% del intervalo de tiempo de observación.

Las siguientes ecuaciones, definen a las funciones probabilísticas acumuladas, en donde la (s) significa smoothened que quiere decir aislado. [6]

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \quad (3.4)$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \quad (3.5)$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2.2} + P_3 + P_4}{3} \quad (3.6)$$

$$P_{1s} = \frac{P_{0.7} + P_1 + P_{1.5}}{3} \quad (3.7)$$

### 3.5 Límites permitidos del flicker

Controlar las fluctuaciones de tensión que se presentan en los sistemas eléctricos es necesario para atenuar la influencia de estas perturbaciones sobre las redes domésticas y comerciales del sistema. Las máquinas como los soldadores de punto provocan fluctuaciones en la tensión (flicker) en aparatos electrónicos y en especial en las luminarias eléctricas, este fenómeno en dichas luminarias puede provocar irritabilidad visual en las personas. [10]

El operador de red es el responsable según la normatividad existente actualmente de garantizar la compatibilidad electromagnética del sistema y de los equipos que se conecten a él. Debido a lo anterior todos los niveles de tensión en el sistema y la cantidad de flicker producida en él, son valores importantes al momento de realizar la coordinación de todos los equipos conectados a la red eléctrica. En resumen los niveles de flicker y la planificación de los niveles de BT, MT y de las redes alta tensión se presentan en la tabla 1. [10]

**Tabla 1 Niveles de compatibilidad de la severidad de “flicker” en redes de distribución**

<i>Nivel</i>	<i>Pst ( p.u.)</i>	<i>Plt (p.u.)</i>
<i>Baja tensión</i>	<i>1</i>	<i>0.8</i>
<i>Media tensión</i>	<i>1</i>	<i>0.8</i>
<i>Alta tensión</i>	<i>0.8 a 0.9</i>	<i>0.65 a 0.8</i>

### 3.6 Transferencia del flicker

Las cargas que presentan variaciones continuas y rápidas en su corriente pueden causar fluctuaciones de voltaje generalmente relacionadas con el flicker. Un buen ejemplo de este tipo de cargas son los soldadores de punto que generalmente son alimentados por transformadores dedicados conectados a los barrajes de alta y media tensión. El flicker generado por este tipo de cargas se propaga hacia el punto de acople común (PCC) y desde allí hacia aguas abajo a través de las líneas de transmisión y sub transmisión del sistema. [11]

Las perturbaciones que se originan en un punto se pueden propagar en el sistema de potencia de acuerdo a las impedancias del mismo. En los sistemas radiales la transferencia de flicker desde aguas abajo hacia aguas arriba es pequeña en comparación con la transferencia de flicker desde aguas arriba hacia aguas abajo. Esto es debido al hecho de que las impedancias en alta tensión son mucho menores que las

de baja tensión y por lo tanto da lugar a caídas de voltaje mucho más pequeñas aguas arriba. El nivel de atenuación de flicker en un punto (B) con respecto a un punto (A) está determinado por el coeficiente de transferencia de flicker, TPst(AB), y se define como el cociente entre el valor del Pst medido simultáneamente en dos lugares. [11]

$$T_{PstAB} = \frac{P_{stB}}{P_{stA}} \quad (3.8)$$

### 3.7 Desbalance de tensión en sistemas trifásicos

Los sistemas trifásicos balanceados son casi imposibles de lograr en la práctica, esto es debido principalmente al comportamiento dinámico de la carga. En este trabajo toma un modelo trifásico de un sistema de distribución que tiene en una fase una carga de comportamiento variable y en las dos fases restantes cargas constantes. La carga variable se analiza para ver como esta afecta el comportamiento de las cargas conectadas en las dos fases restantes. El análisis se efectúa mediante las componentes de secuencia. [12]

Cuando en un sistema trifásico las tensiones y ángulos entre las fases no son iguales es debido a un fenómeno que se llama desbalance trifásico de tensión. Por razones técnicas inherentes a los sistemas de potencia el balance ideal de las tensiones es imposible de conseguir. [12]

Los sistemas trifásicos están sometidos a la conexión de cargas residenciales de tipo monofásico lo que provoca un desequilibrio entre las fases, esto ocasiona que las caídas de tensión en todo el sistema sufran un desequilibrio que trae como consecuencia un desbalance de tensión general. [12]

Se debe recordar que para que un sistema de generación trifásico se considere totalmente simétrico, sus tensiones deben poseer magnitudes iguales y una separación angular de 120°. Para que una carga trifásica se considere simétrica debe tener tres corrientes de magnitudes y ángulos de fase iguales respecto a la tensión. [12]

#### 3.7.1 Medición de desbalance de tensión

Cuando se relacionan las tensiones de secuencia negativa con las tensiones de secuencia positiva, de esta relación se obtiene el concepto para la medición del desbalance de tensión en sistemas trifásicos. Para efectos prácticos la relación mencionada anteriormente puede expresarse de varios modos. Para evitar la influencia de la componente de secuencia cero en la medición del desbalance de tensión se utilizan comúnmente las tensiones de línea. [12]

De acuerdo a la norma IEC 61000-4-30, el grado de desequilibrio se expresa usualmente como (3.9), donde  $V_{neg}$  corresponde a la componente de secuencia negativa de la tensión

de línea y  $V_{pos}$  corresponde a la componente de secuencia positiva de la tensión de línea. [13]

$$\%desbalance = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} \times 100\% \quad (3.9)$$

En la ingeniería eléctrica el teorema de fostescue o teorema de las componentes simétricas es considerado uno de los teoremas más importantes. Este teorema es utilizado para la simplificación del análisis de sistemas trifásicos desequilibrados, ya que permite la generalización en la descripción de un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición. [12]

$$V_{pos} = \frac{1}{3}(V_{AB} + V_{BC} \times 1 < 120^\circ + V_{CA} \times 1 < -120^\circ) \quad (3.10)$$

$$V_{neg} = \frac{1}{3}(V_{AB} + V_{BC} \times 1 < -120^\circ + V_{CA} \times 1 < 120^\circ) \quad (3.11)$$

Al parecer conocer las tres componentes de fase y los ángulos de desfase de las tensiones parecen ser condiciones necesarias para determinar las componentes de secuencia de las tensiones del sistema trifásico. Debido a lo anterior en un sistema donde exista la necesidad de controlar el desbalance de tensión, se hace necesaria la instalación de un equipo de medida con la capacidad de registrar los seis parámetros anteriormente mencionados. [13]

### 3.7.2 Límites admisibles para el desbalance en la red

Desde el lado de las normativas vigentes vemos algunas de las más reconocidas

- IEC 61000-2-5

Dos clases se definen: Grado 1:  $uN \leq 2\%$  y Grado 2:  $uN \leq 3\%$

- IEC 61000-2-12

$uN \leq 2\%$  y bajo especiales condiciones:  $uN \leq 3\%$  Septiembre 2009

- EN50160

$uN \leq 2\%$  y bajo especiales condiciones:  $uN \leq 3\%$ , correspondiente al valor percentil 95%, de un registro de 1 semana cada 10 minutos. [12]

## 4. SIMULACIÓN DE UN MODELO DE SOLDADOR DE PUNTO

La conexión y desconexión repentina de carga, causa fluctuaciones de tensión, que originan el fenómeno del flicker; estas son provocadas por el funcionamiento de máquinas como los soldadores de punto.

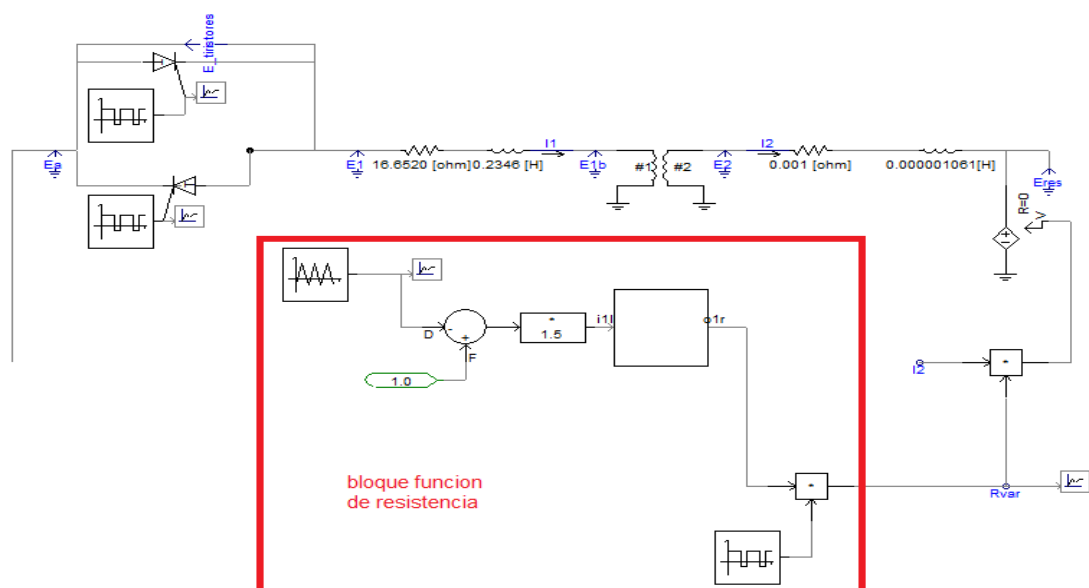
En la figura 17 se muestra el modelo del soldador, en el cual se basa este trabajo para analizar y calcular el índice de severidad del flicker y el desbalance de tensión.

**Tabla 2. Parámetros eléctricos del soldador de punto**

PARAMETROS ELECTRICOS	ECUACIONES Y VALORES
Resistencia de soldadura(Y)	$Y = 0.1429X^3 - 2.8568X^2 + 16.582X + 6.9028$
Valores de la rama dispersión lado primario	$R_1=16.65\Omega$ $L_1=0.2346H$
Valores de la rama dispersión lado secundario	$R_2=0.001\ \Omega$ $L_2=0.000001061H$
Transformador del soldador	12755/11.09 V; 75kVA .

### 4.1 Procedimiento

*Figura 17. Modelo del soldador en PSCAD*





### 4.1.1 Análisis del modelo del soldador

Se realizó el modelado del soldador de punto teniendo como datos conocidos el rango de la corriente de soldadura utilizada para alcanzar la temperatura de soldadura (1000 a 100000 A), la resistencia de soldadura en la ecuación 4.1 y el valor de la impedancia de la rama de dispersión de la tabla 2 del lado secundario del transformador interno del soldador.

El programa de simulación y los parámetros que se emplean para la realización del modelo se enuncian a continuación.

Se ejecuta el montaje en PSCAD del modelo monofásico de un soldador de punto usando control de tensión AC, aplicando un método particular de este tipo de control, llamado control integral (ON-OFF) para efectuar el disparo de los SCR.

Este método consiste en aplicar un número determinado de ciclos completos de la fuente a la carga. Para hacer este tipo de control se debe variar la cantidad de ciclos aplicados a la carga (Ton) confrontados con el número de ciclos en que la carga se encuentra sin alimentación (Toff). Para este caso en particular se utilizan 30 ciclos completos en ON de la fuente de alimentación y 60 ciclos completos en los cuales la carga se encuentra en OFF.

La base de tiempo que se emplea en el trabajo de la máquina de soldadura es de 1.5 segundos (90 ciclos), de los cuales 0.5 segundos (30 ciclos) son para el periodo de trabajo en ON y 1 segundo (60 ciclos) en OFF por lo tanto la frecuencia total de trabajo es de 0.6667 Hz.

Para la configuración de la resistencia de soldadura se utiliza una función cúbica, que se obtiene a partir de la grafica de resistencia dinámica de la figura 19. Se toman puntos de la grafica como se muestra en la tabla 3 y en el software Matlab se encuentra una ecuación aproximada para introducirla en la simulación y hacer la representación de la resistencia variable de soldadura.

El bloque función de resistencia toma la ecuación de la resistencia de soldadura y utilizando una serie de elementos permite utilizar la resistencia durante el tiempo de soldadura y de nuevo retornarla a su estado de reposo cuando el soldador es apagado. Existen dos bloques claves utilizados para lograr el control de reinicio. Lo primero es una función diente de sierra que permite llevar la función al valor inicial (cero) para cada ciclo de trabajo. El segundo bloque es un generador de pulsos que se encarga de controlar el ciclo encendido y apagado de la resistencia dinámica durante el ciclo de trabajo como se muestra en la figura 18. La resistencia de soldadura tiene un valor bastante pequeño debido a que es básicamente la resistencia de la junta de los metales que van a ser unidos. La forma de onda de la resistencia no es lineal, debido al componente inductivo de la máquina de soldadura, esto repercute perceptiblemente en la calidad de la energía en un sistema de distribución.

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

Figura 18. Ciclos de trabajo de la resistencia de soldadura

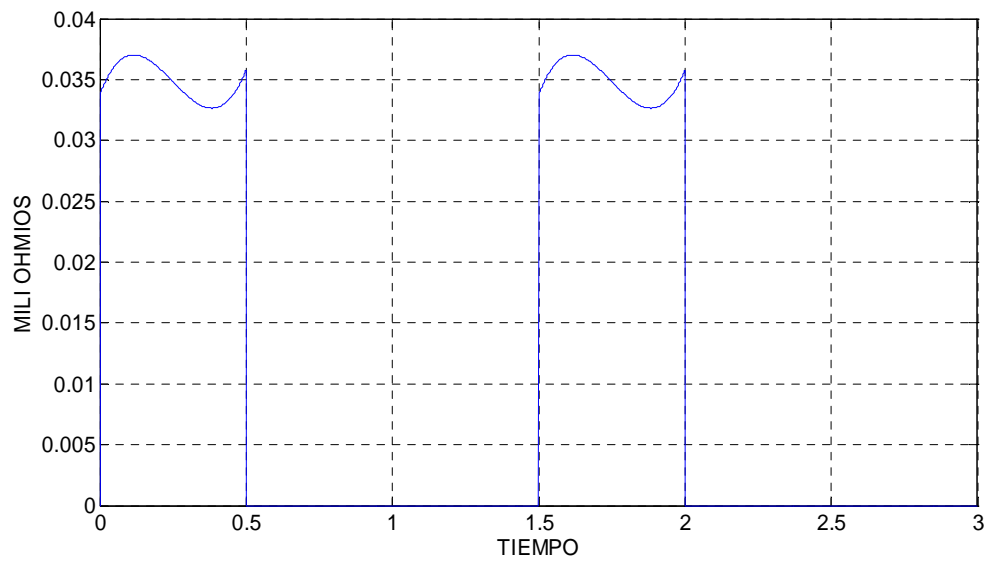
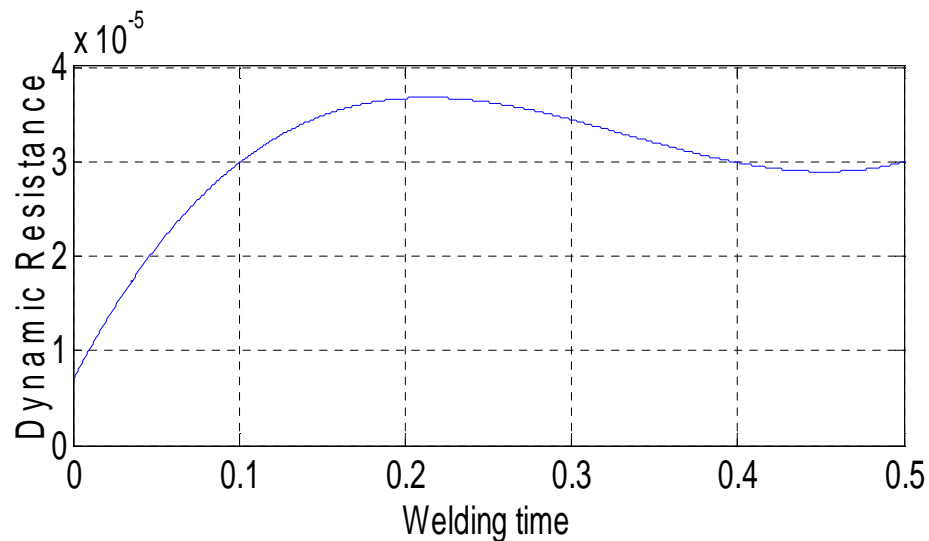


Tabla 3 Datos Tiempo de soldadura VS Resistencia dinámica [14]

welding time	dynamic resistance
1	19
1.9	32
3	34.7
4	36.5
5	35
6	33.5
7	32.5
8	30.5
9	30
10	29

Figura 19. Grafica resistencia soldadura RL



$$y = (150.255X^3 + 236.099X^2 + 112.171X + 6.903) \times 10^{-6} \Omega \quad [14] \quad (4.1)$$

Y : resistencia dinamica (**dynamic resistance**)

X : tiempo de soldadura (**welding time**)

La ecuacion (4.1) es la representacion matemática de la resistencia de soldadura para un periodo de trabajo de 0.5 segundos (30 ciclos).

La función de la resistencia se activa en (Ton) cuando la máquina está operando, para esto se emplea una función diente de sierra que combinada con un bloque generador de pulsos permite reiniciar la ecuación de resistencia en los intervalos de tiempo de encendido de la carga (ON).

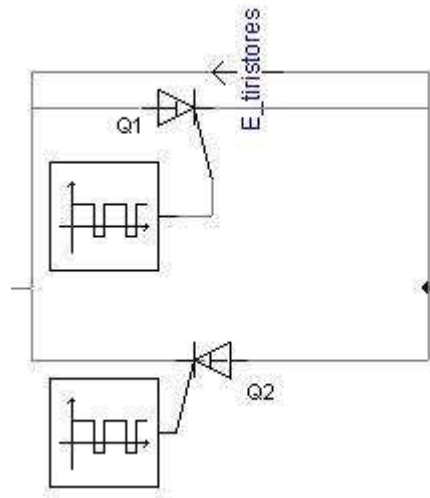
Para realizar el disparo de los SCR se conecta un generador de pulsos en cada terminal de puerta de los tiristores. Los generadores de pulsos se configuran de la siguiente manera: una frecuencia de trabajo de 0.6667 Hz, la fase inicial de la señal es 0 grados. No se utiliza interpolación de pulsos y la duración del pulso es 33.33% de la duración total del ciclo de trabajo. Los SCR están conectados en anti paralelo y su función es permitir el disparo y el bloqueo de la señal de la fuente, esto permite en el bloque grafico de PSCAD mostrar la forma de onda de la resistencia de carga que se muestra en la figura 18.

Q1 cuando se encuentra en conducción permite mostrar el semiciclo positivo de la señal de la fuente de alimentación, mientras que Q2 me permite mostrar el semiciclo negativo de la señal figura 20. Cuando los SCR son excitados con un pulso de corta duración en

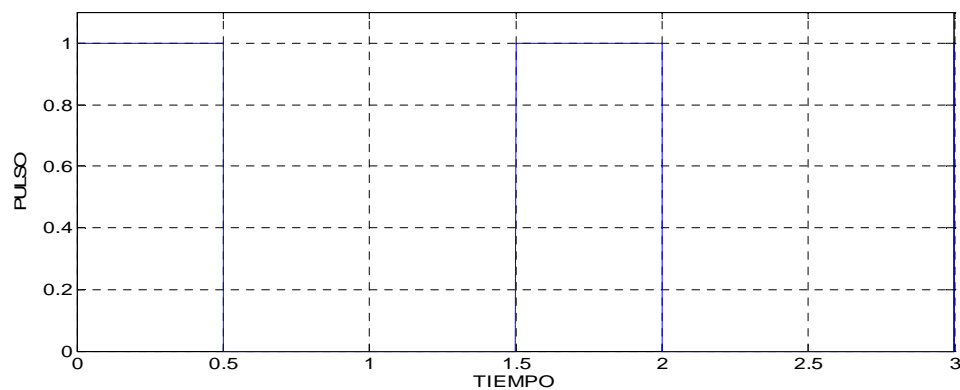
## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

el terminal de puerta entran en conducción; para este caso el consumo de los SCR es de alrededor de 1V. Cuando los SCR se encuentran en el estado de apagado no hay conducción, la tensión que se ve en los terminales de los dispositivos es en este caso 16800V aproximadamente.

*Figura 20. Configuración de dos SCR en anti paralelo*



*Figura 21. Pulsos de los disparos de los SCR*



Para la configuración de los SCR, no se utiliza la resistencia de Snubber ya que el dispositivo trabaja en forma ideal. No se realiza interpolación de los pulsos debido a que esta configuración se usa para control de fase; dependiendo de las especificaciones técnicas del dispositivo la tensión de la compuerta se encuentra entre 0 - 3.5V.

El modelo del soldador de punto posee un transformador reductor de 12755V/11.0913V, 100KVA de potencia nominal. Este transformador entrega en el

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

---

lado secundario corrientes de soldadura del orden de los kilo amperios para el modelo de la simulación es de 9000A (rms) aproximadamente. Corriente que es empleada para producir la temperatura necesaria para efectuar la soldadura de punto.

Se conectan dos cargas lineales de 10 KVA y 100KVA al barraje que se acopla a la red mediante un transformador de distribución de 120 KVA 13.2KV / 240V, se asume un FP 0.9 en atraso.

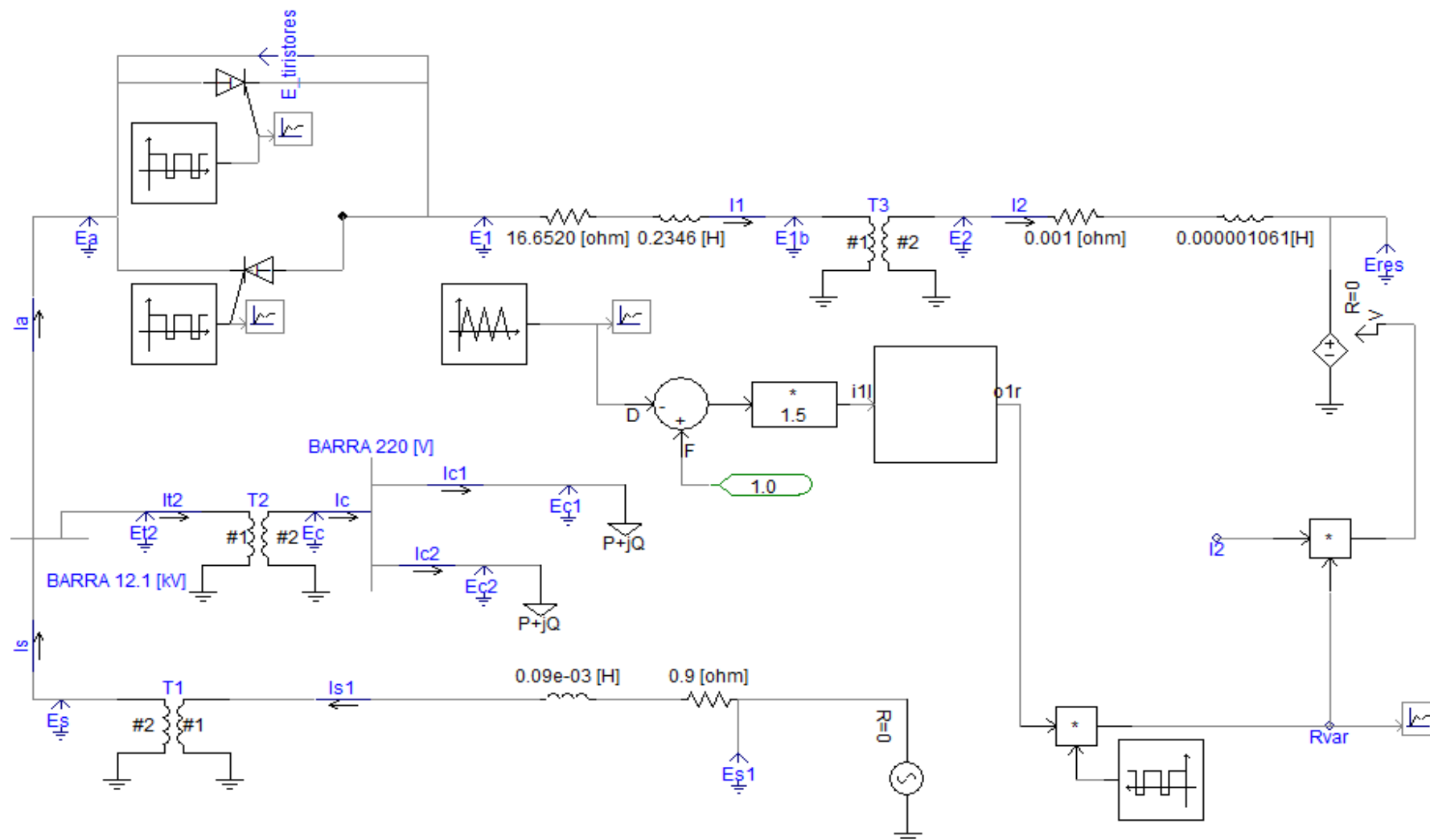
El soldador de punto y las cargas van al mismo barraje lo cual ocasiona un acople eléctrico entre ambos haciendo que los efectos del soldador de punto afecten la carga conectada a la red. Estos elementos van conectados a un transformador principal de 220 KVA 33KV / 13.2KV.

Al conjunto de transformadores monofásicos de distribución se le incluyen las pérdidas en el vacío y pérdidas con carga. Para encontrar estos parámetros se utiliza la norma NTC 818 ELECTROTECNIA TRANSFORMADORES. TRANSFORMADORES MONOFASICOS AUTORREFRIGERADOS Y SUMERGIDOS EN LIQUIDO, esta norma utiliza graficas de Pérdidas VS potencia (kVA) con su respectiva ecuación, en la cual se reemplaza la potencia requerida (kVA) y se encuentran las pérdidas en vacío o bajo carga correspondientes. Para aplicar estas ecuaciones se deben respetar los rangos de alta y baja tensión de la NTC818 para la correcta selección de la tabla de pérdidas.

La norma NTC 819 ELECTROTECNIA TRANSFORMADORES. TRANSFORMADORES TRIFASICOS AUTORREFRIGERADOS Y SUMERGIDOS EN LÍQUIDO es utilizada cuando el alimentador principal del sistema de distribución es un transformador trifásico.

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

*Figura 22. Modelo monofásico del soldador conectado a la red de distribución*



## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

Para la configuración adecuada de los transformadores se debe tener en cuenta la reactancia de los devanados, este parámetro está directamente relacionado con la potencia de cortocircuito y la robustez del alimentador.

Para el cálculo de la reactancia de cortocircuito se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R_{dev} = \frac{P_{cc}}{I_N^2} \quad (4.2)$$

$$Z_{dev} = \frac{V_{cc}}{I_N} \quad (4.3)$$

$$X_{dev} = \sqrt{Z_{dev}^2 - R_{dev}^2} \quad (4.4)$$

A continuación se muestra la tabla de resultados de las reactancias de cortocircuito, pérdidas en vacío y pérdidas en el núcleo encontradas para el alimentador principal T1 y el transformador T2 del barraje de 12.1kV.

**Tabla 4. Datos de los transformadores para el sistema monofásico**

<b>TRANSFORMADOR</b>	<b>X<sub>dev</sub> (PU)</b>	<b>Perdidas en vacío (PU)</b>	<b>Perdidas en el núcleo(PU)</b>	<b>Potencia nominal KVA</b>
T1	0.03892634	0.003191467	0.0092055	220
T2	0.03905372216	0.0025	0.0087	120

### 4.2 Análisis de las graficas de la simulación para el sistema monofásico

A continuación se muestran las figuras obtenidas de la simulación en el software pscad para valores de tensión y de corriente del sistema monofásico

Figura 23. Fluctuaciones de tensión en la alimentación del soldador  $E_a$

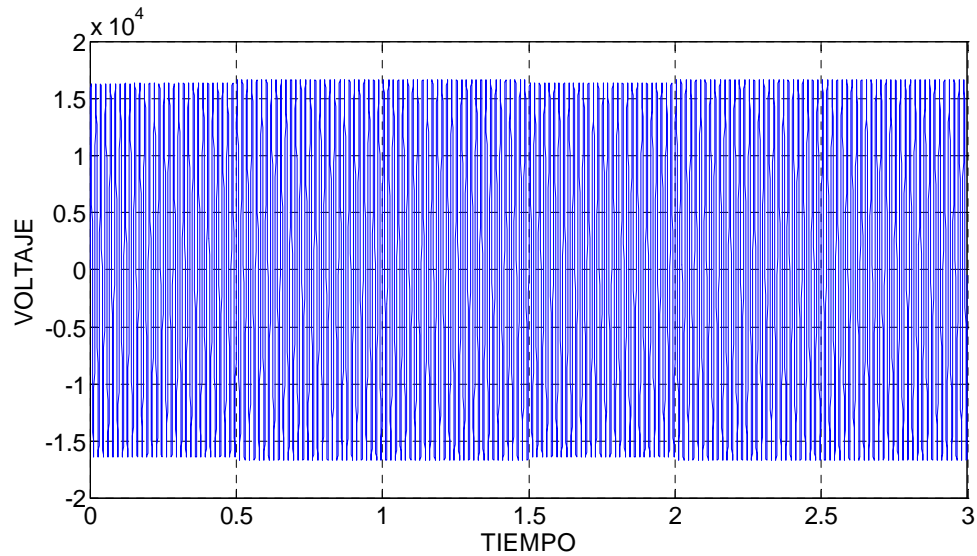
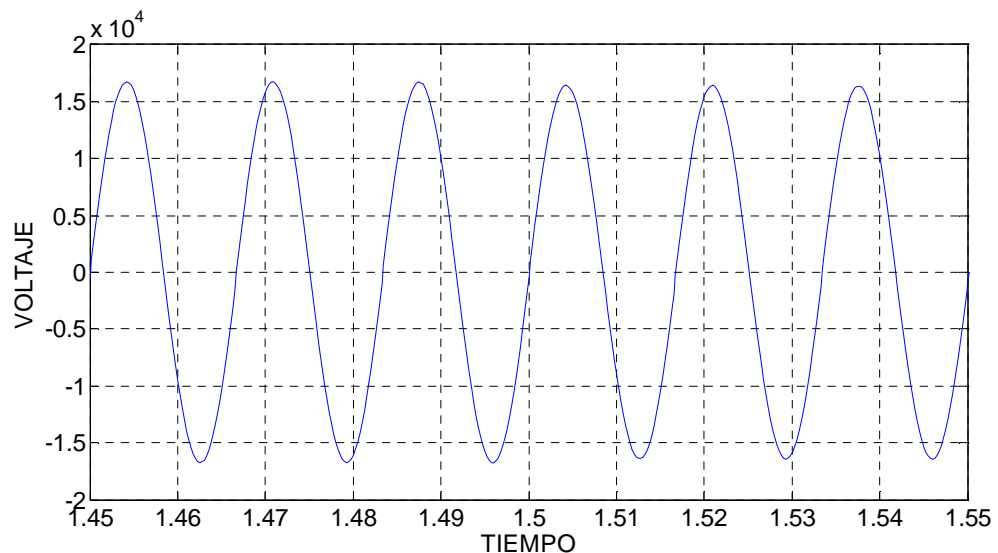


Figura 24. Forma de onda detallada de la tensión de alimentación del soldador  $E_a$

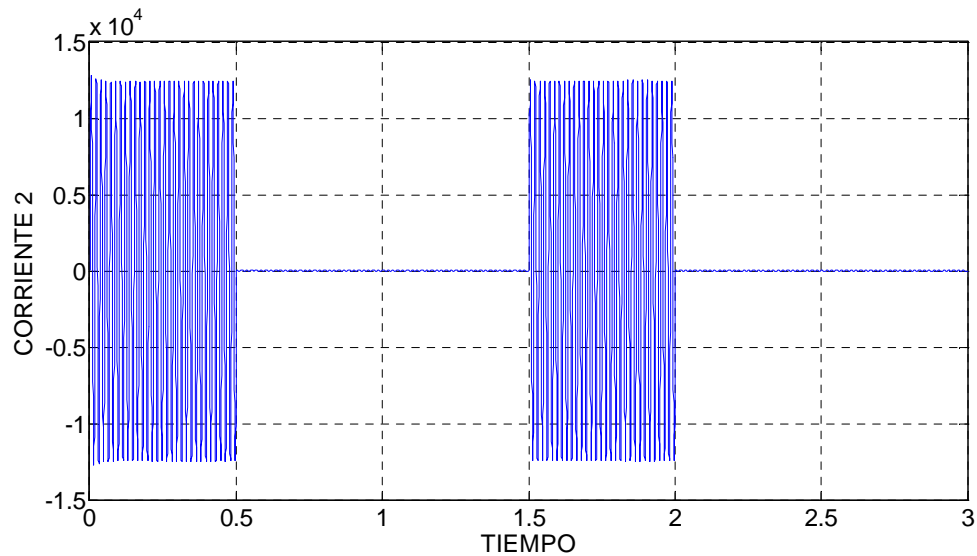


En las figuras 23 y 24, la tensión de la fuente de alimentación  $E_a$  del soldador se ve afectada debido al encendido y el apagado de la máquina, es decir la conexión y desconexión de carga. Esto se debe a que la corriente de soldadura que aparece en los ciclos de trabajo es demasiado grande y afecta en forma importante a los sistemas que no tienen la robustez necesaria para asimilar estos altos niveles de corriente, por esta razón se producen fluctuaciones de tensión.

Los efectos de este tipo fluctuación de tensión influyen en todo el sistema afectando las cargas vecinas a las fuentes de flicker.

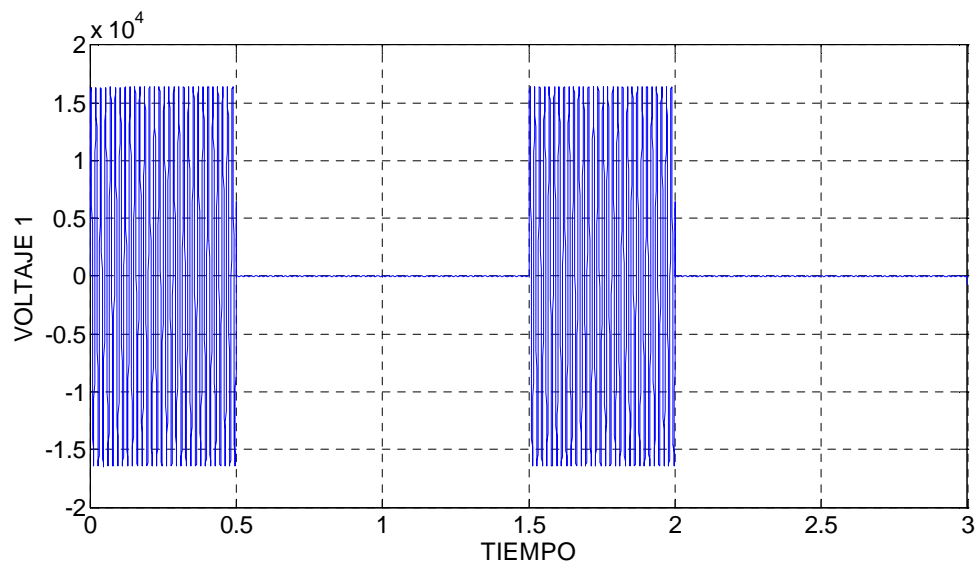


Figura 25. Corriente de soldadura I2



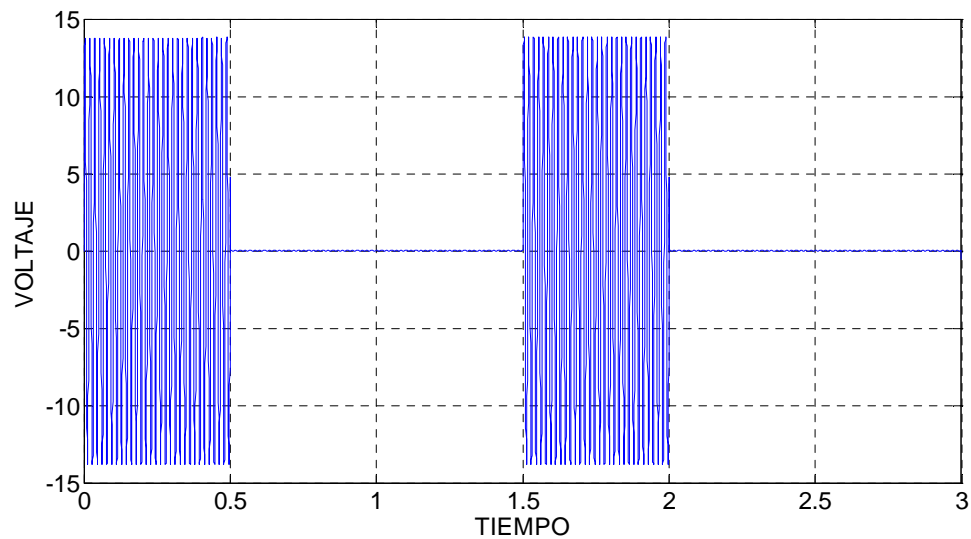
La figura 25 muestra la corriente de soldadura I2, este parámetro es de un valor muy grande y es el que permite realizar el trabajo de aumentar la temperatura en el punto de contacto de los metales que se van a soldar provocando la unión de los elementos. Esta corriente debido a su gran valor, es responsable de afectar seriamente las cargas conectadas al sistema de distribución y de producir las oscilaciones de tensión.

Figura 26. Tensión E1



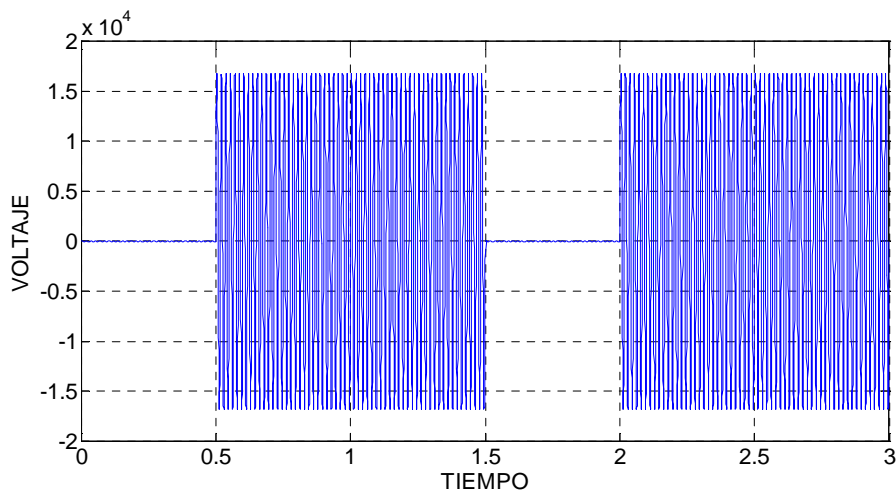
La figura 26 es la tensión en el catodo del SCR Q1, que está conectado a un punto común con el ánodo del SCR Q2, el comportamiento de la grafica obedece al funcionamiento de los SCR configurados para disparo con el método de control integral ON-OFF, utilizando 30 ciclos para el encendido y 60 ciclos para el apagado.

Figura 27. Tensión del lado del secundario del transformador interno del soldador.



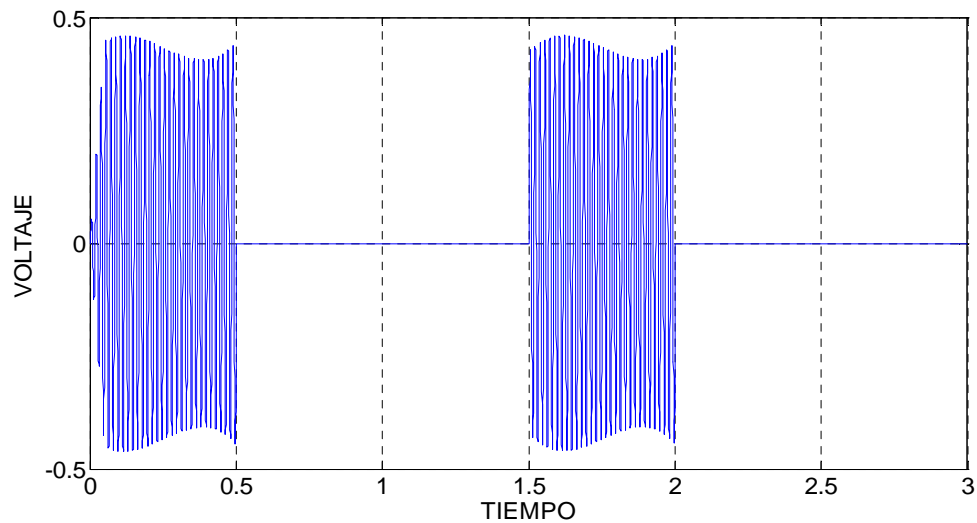
El comportamiento de la tensión en el lado secundario del transformador interno de la máquina de soldar es similar a la tensión del lado primario en su forma de onda y duración figura 27, pero tiene una magnitud mucho menor aproximadamente de 10V(rms). Teniendo en cuenta el principio de funcionamiento fundamental de un transformador y considerando la conservación de la potencia, la corriente de magnitud mayor se presenta en el devanado secundario de la máquina.

Figura 28. Comportamiento de la tensión del antiparalelo de los SCR



Cuando los SCR están en estado de conducción la tensión entre el ánodo y el cátodo está alrededor de 1V y permiten el paso de la corriente de soldadura. Cuando pasa de estado de conducción al estado de bloqueo mediante la conmutación natural del dispositivo, esta tensión aumenta hasta un valor de 11.9KV (rms) y la corriente de trabajo cae a cero. Los SCR controlan el disparo y el bloqueo de la señal de la fuente y permiten el control del ciclo de soldadura.

*Figura 29. Tensión del proceso de soldadura*

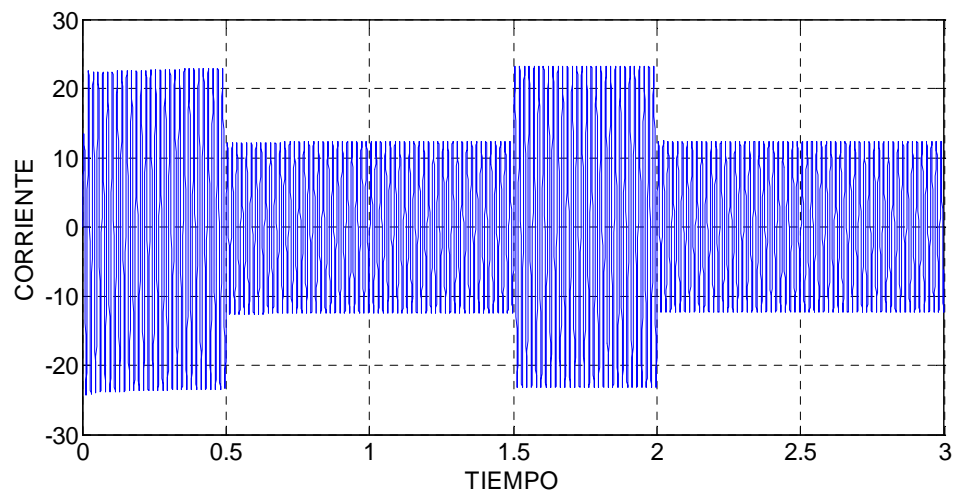


La tensión del proceso de soldadura tiene una forma de onda que se obtiene a partir de la multiplicación de dos parámetros básicos en la soldadura por puntos. El primero es la resistencia de soldadura, que como se explicó anteriormente se obtiene a partir del bloque función de resistencia de la figura 17. El segundo parámetro es la corriente, medida en el lado secundario de la máquina; estos dos parámetros multiplicados dan como resultado la onda característica mostrada en la figura 29.

La tensión de soldadura tiene un valor muy pequeño y una forma de onda cuya envolvente es la resistencia de soldadura, esto permite afirmar que la tensión de soldadura depende del valor de la resistencia de soldadura en cada instante de tiempo.

Lo que se busca con una tensión pequeña y una corriente elevada es lograr un cortocircuito en las uniones de los metales lo que eleva la temperatura y provoca la fusión de los elementos.

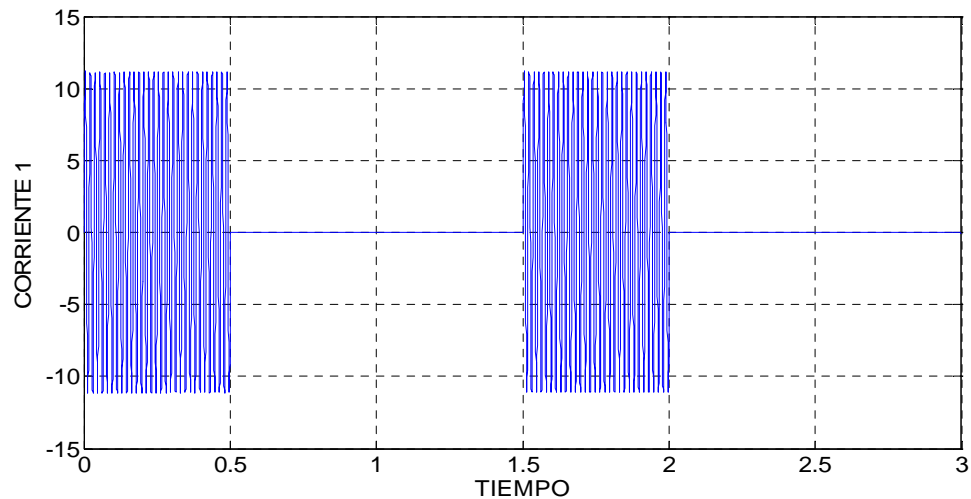
*Figura 30. Corriente del lado secundario del transformador de alimentación*



## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

La corriente del lado secundario del transformador de alimentación presenta un comportamiento fluctuante que se rige por los ciclos de trabajo de la carga. Se observa un efecto mucho más notorio en la forma de onda y contrario al comportamiento de la tensión de la figura 23.

*Figura 31. Corriente del lado primario del transformador interno del soldador*



La corriente I1 del transformador interno del soldador presenta un comportamiento similar a la corriente I2, sin embargo esta corriente es de una magnitud mucho menor, lo cual representa una ventaja en el momento de hacer medidas, y para el montaje de los S.C.R. pues los requerimientos de corriente del lado primario son menores disminuyendo el deterioro y el costo de estos elementos.

**Tabla 5 Valores pico de los parámetros monofásicos**

PARAMETRO	VALOR PICO
Tensión $E_a$	16846.18 V
Corriente $I_2$	12973.19 A
Tensión $E_1$	16635.25 V
Tensión $E_2$	13.97 V
Tensión soldadura $E_{res}$	0.4661 V
Corriente $I_s$	28.78 A
Corriente $I_1$	11.33 A
Tensión SCR	16802.63 V

### 4.3 Análisis del resultado del pst

Para encontrar la cantidad de parpadeo primero se debe realizar la configuración del software PSCAD de la siguiente manera: duración de simulación 60s, solución de paso de tiempo 50  $\mu$ s, canal de paso grafico 250  $\mu$ s. Se corre la simulación y se guardan los datos de la simulación en el computador, que almacena un archivo punto out (.out), luego este se copia en MATLAB cambiando el tipo de archivo de .out a .txt para convertirlo en texto plano. En MATLAB existe un paquete de doce programas que trabajan en conjunto para encontrar el Pst. Se abre el archivo cuyo nombre es Lectura de datos, en este se debe tener mucho cuidado al ubicar las coordenadas del parámetro al que se le desea medir el flicker ya que siempre se guarda en la primera columna el vector de tiempo. Para saber las coordenadas del parámetro de interés, se debe abrir el archivo en block de notas para verificar la posición de este; luego se debe sumar uno a la posición del parámetro al que se desea medir el pst.

#### 4.3.1 Norma IEC 61000-4-15

La norma internacional IEC 6100-4-15 fue elaborada en febrero de 2003 y reemplaza la norma IEC 868, esta norma proporciona las especificaciones funcionales y de diseño para medidores de flicker.

Los medidores de flicker permiten conocer el nivel de molestia que percibiría un observador medio en el punto de la red en el que se conecte el medidor para ello se emplea un algoritmo que traduce las fluctuaciones de voltaje en ese punto de la red de alimentación eléctrica en los niveles de molestia equivalentes que serían percibidos por el sistema ojo-cerebro del observador.

La norma especifica las características de funcionamiento y diseño del instrumento de medición de flicker.

#### 4.3.2 Límites permitidos

- El valor de Pst igual a 1 indica que menos del 50% de los observadores se irritará, el valor de Pst  $>1$  sugiere que mucho más que el 50% de los observadores se irritará. El valor máximo admisible de Pst por la norma es 1.
- La norma IEC 61000-2-12 encontrada en la tabla 6. Muestra los niveles permitidos de Pst y Plt admisibles en un sistema de distribución. Estos resultados se comparan con los resultados obtenidos en simulación.

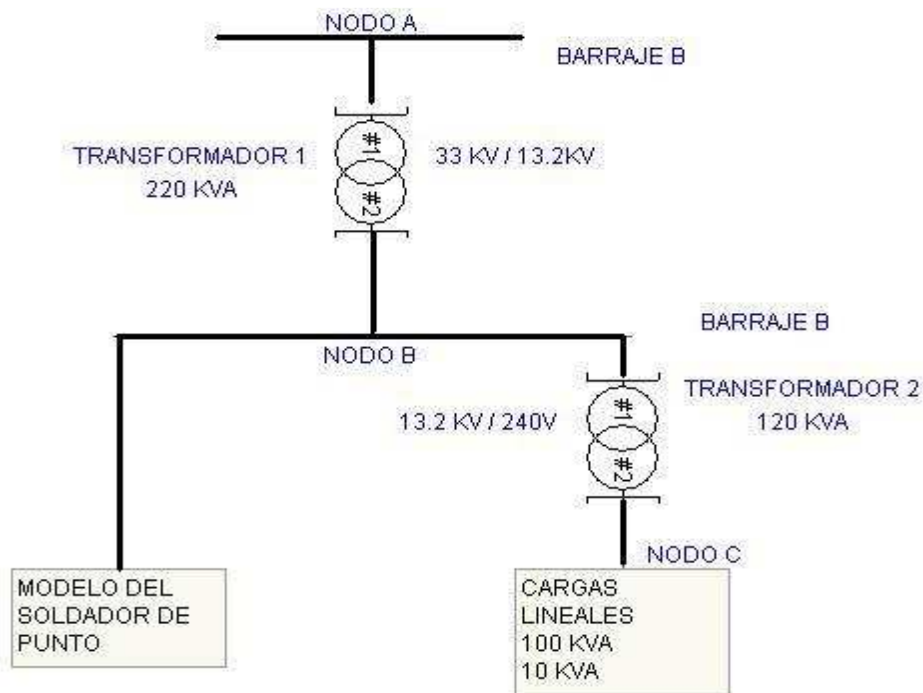
**Tabla 6 Límites permitidos del PST y PLT (IEC 61000-4-7, IEC 61000-2-14)**

Estándares		IEC 61000 – 3 -7	IEC 61000 – 2 - 12
Propósito		Niveles definidos de planificación para el control de las emisiones	Niveles definidos de compatibilidad para redes de media tensión
Objetivos en MV	$P_{st}$	0.9	1
	$P_{lt}$	0.7	0.8
Objetivos en HV - EHV	$P_{st}$	0.8	No aplica
	$p_{lt}$	0.6	No aplica

#### 4.4 Datos del PST medidos en los diferentes nodos del sistema de distribución

En esta sección se realizan las mediciones de los  $P_{st}$  encontrados para los nodos A y B para el caso monofásico, así como también se mide la transferencia de flicker producida por la carga perturbadora hacia el nodo donde se conectan las cargas lineales.

*Figura 32.* Diagrama unifilar del sistema de distribución



## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

En la figura 32 se muestra el sistema de distribución monofásico montado para este trabajo.

Figura 33. Medición del Pst sin el soldador conectado a la red

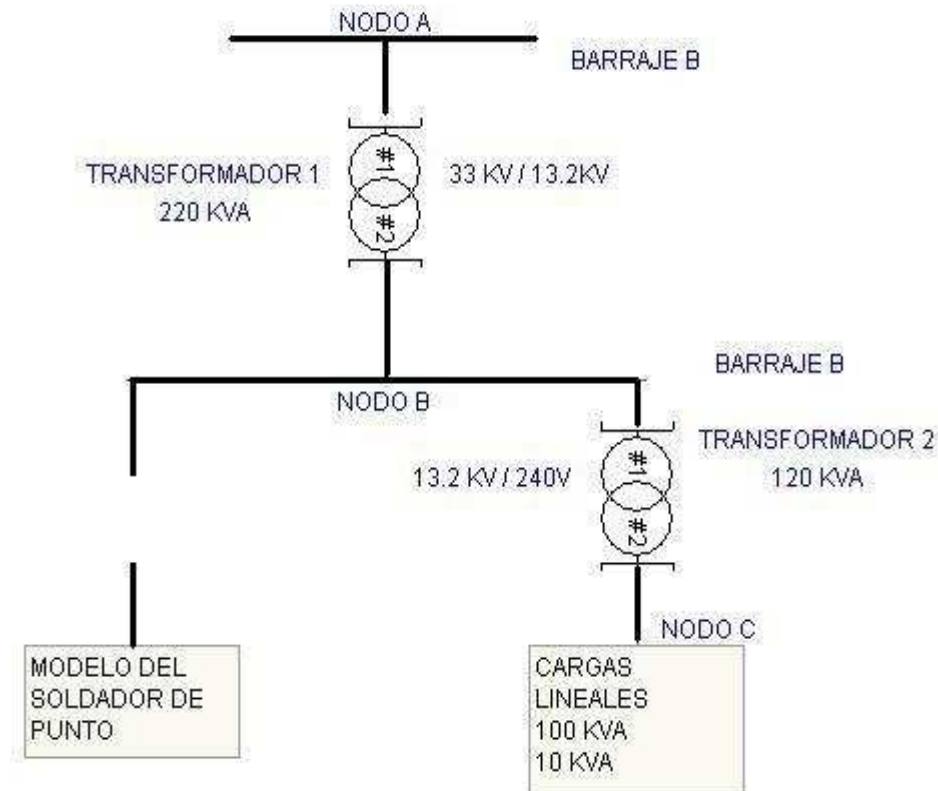


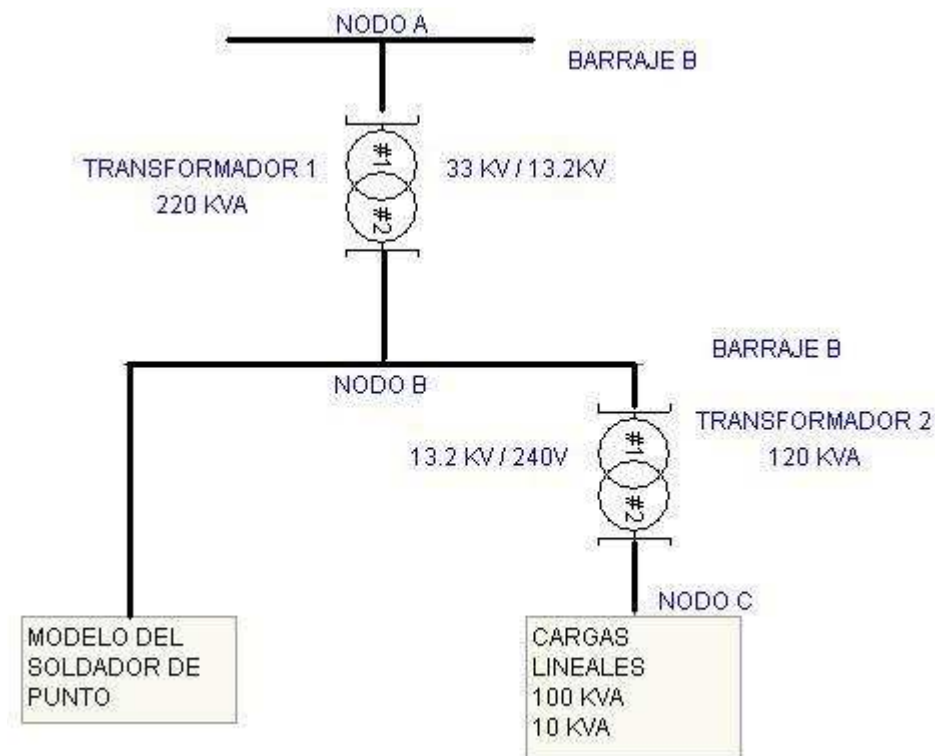
Tabla 7 Datos del Pst sin el soldador conectado a la red

NODO	B	C
PST	0.0149	0.0148

en la tabla anterior cuando la fuente perturbadora en este caso el soldador de punto esta desconectado de la red, el sistema no se ve afectado y trabaja dentro de los límites establecidos por la norma para el Pst.

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

*Figura 34. Medición del Pst con el soldador conectado a la red*



**Tabla 8 Datos del Pst con el soldador conectado a la red**

NODO	B	C
PST	1.4266	1.4252

Se mide la transferencia de flicker a la carga y se encuentra el porcentaje de transferencia:

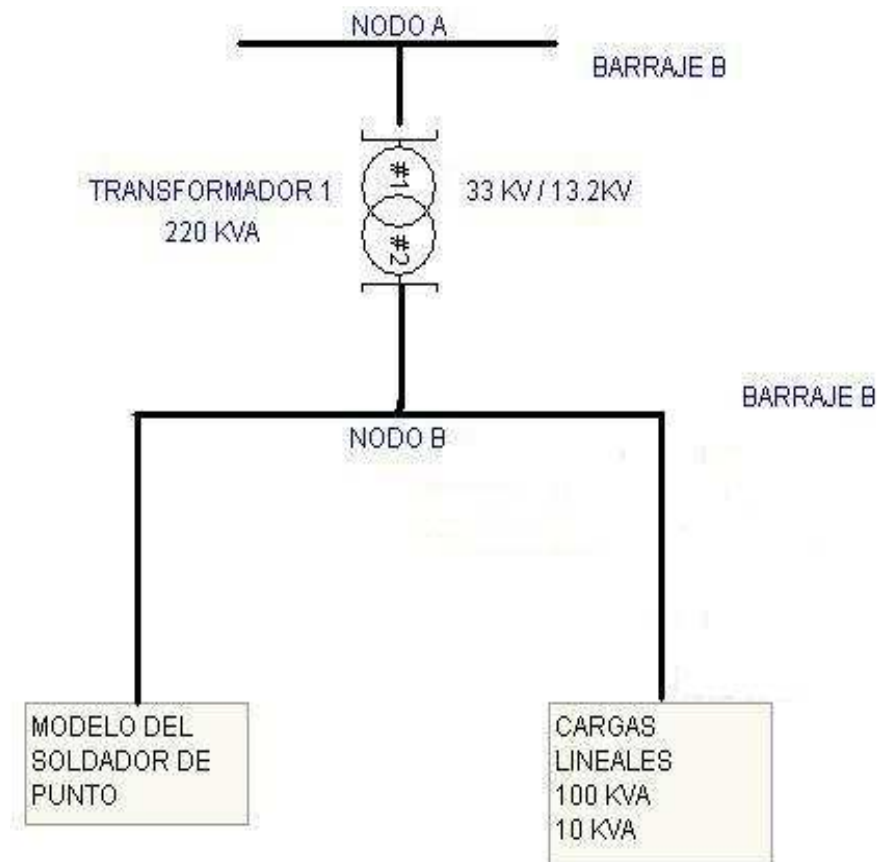
$$T_{PSTBC} = 0.9990$$

$$\% T_{PSTBC} = 99.9\%$$

De la tabla anterior se aprecia que el valor calculado de Pst es superior al valor límite, en ambos nodos del sistema estableciéndose un impacto negativo en las cargas lineales, y demostrándose así que en estos puntos el nivel de flicker es muy alto debido a que en el nodo B es el punto de conexión con el soldador de punto y la perturbación producida en dicho nodo es transmitida hacia el nodo C.



*Figura 35. Medición del Pst retirando el alimentador de las cargas lineales*



**Tabla 9 Datos del Pst retirando el alimentador de las cargas lineales**

NODO	B
PST	1.4288

En la tabla 9 se puede observar que el Pst que se genera en el soldador de punto es de un valor superior al límite dado por la norma y como las cargas lineales están conectadas al mismo nodo del soldador son afectadas totalmente por el flicker generado.

## 4.5 Análisis del modelo del soldador conectado a un sistema trifásico

Se conecta el modelo del soldador de punto a un sistema trifásico, para hacer un diagnostico de los efectos de las perturbaciones vistas en este sistema, con los efectos observados en el sistema monofásico. Los valores del alimentador principal se

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

---

modifican para adaptarse a las nuevas condiciones del sistema. Los parámetros modificados son la potencia nominal, la reactancia de fuga y las pérdidas asociadas al transformador de alimentación como son las pérdidas en vacío y las pérdidas en el núcleo.

También en las fases B y C del alimentador son conectadas dos cargas balanceadas de 150kVA cada una y en la fase A se conecta el soldador de punto que es la carga perturbadora. Los parámetros del soldador no se modifican para la conexión al sistema trifásico.

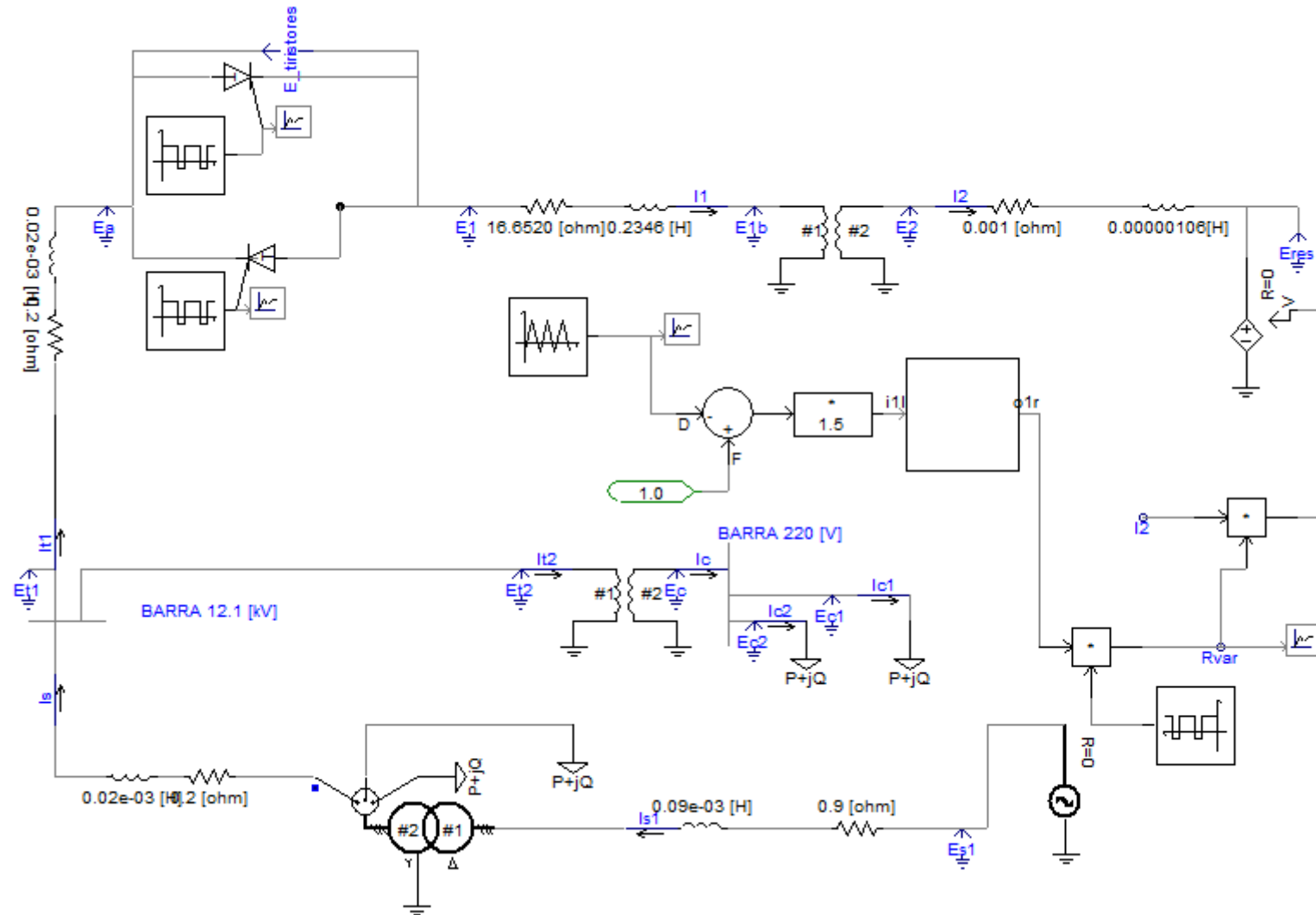
A continuación se muestra en la tabla 10 todos los datos del alimentador principal para el montaje del sistema trifásico.

**Tabla 10 Datos de los transformadores para el sistema trifásico**

<b>TRANSFORMADOR</b>	<b><math>X_{dev}</math> (PU)</b>	<b>Pérdidas en vacío (PU)</b>	<b>Pérdidas en el núcleo(PU)</b>	<b>Potencia nominal KVA</b>
T1	0.0027441121	0.002444444	0.012206349	630
T2	0.03905372216	0.0025	0.0087	120

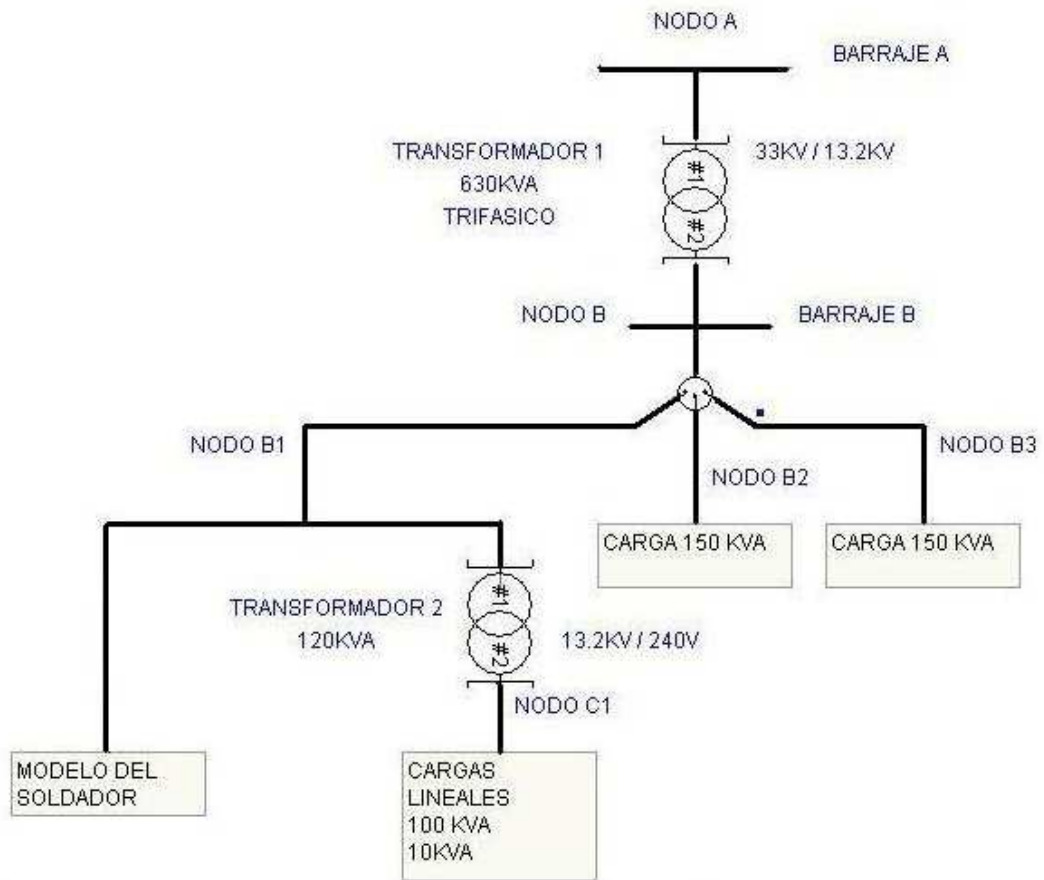
## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

Figura 36 Modelo soldador de punto conectado a una sistema trifásico



## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

Figura 37 diagrama unifilar del modelo conectado al sistema trifásico



A continuación se muestran todas las formas de onda del comportamiento del modelo del soldador cuando este se conecta al sistema trifásico.

Figura 38 Fluctuaciones de tensión en la alimentación del soldador  $E_a$

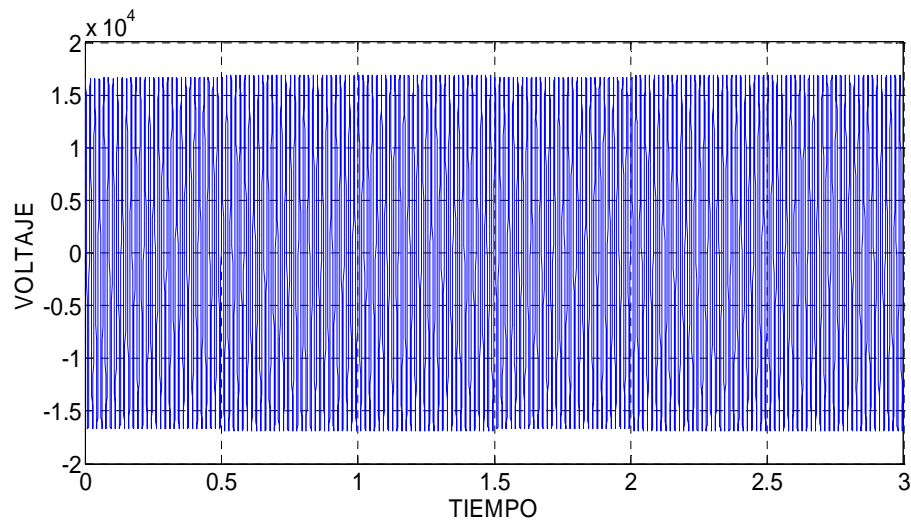


Figura 39 Fluctuaciones de tensión del soldador Ea

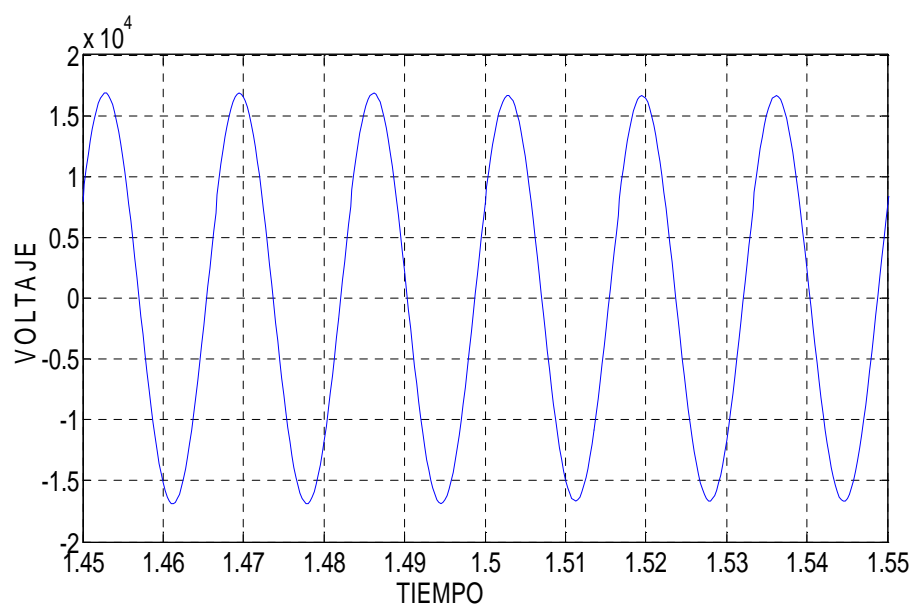
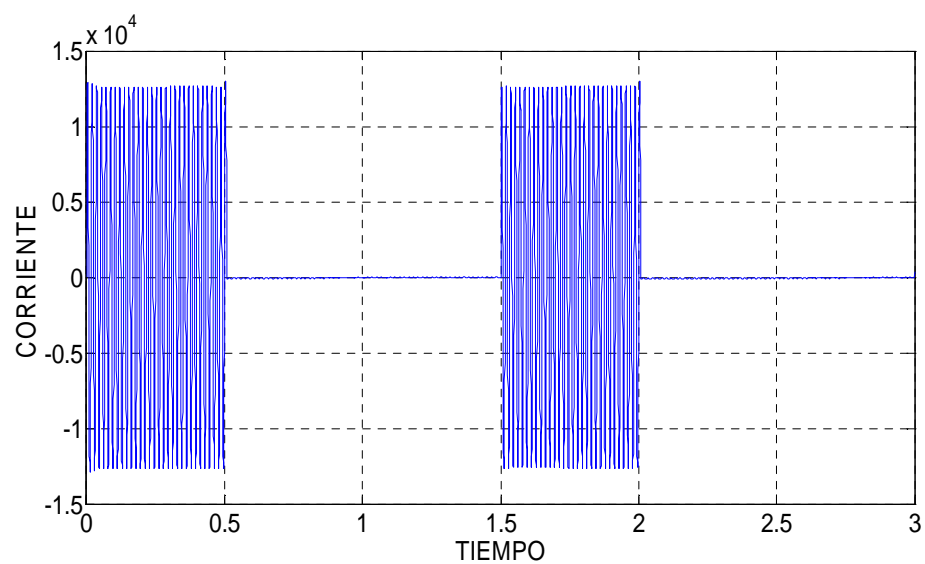
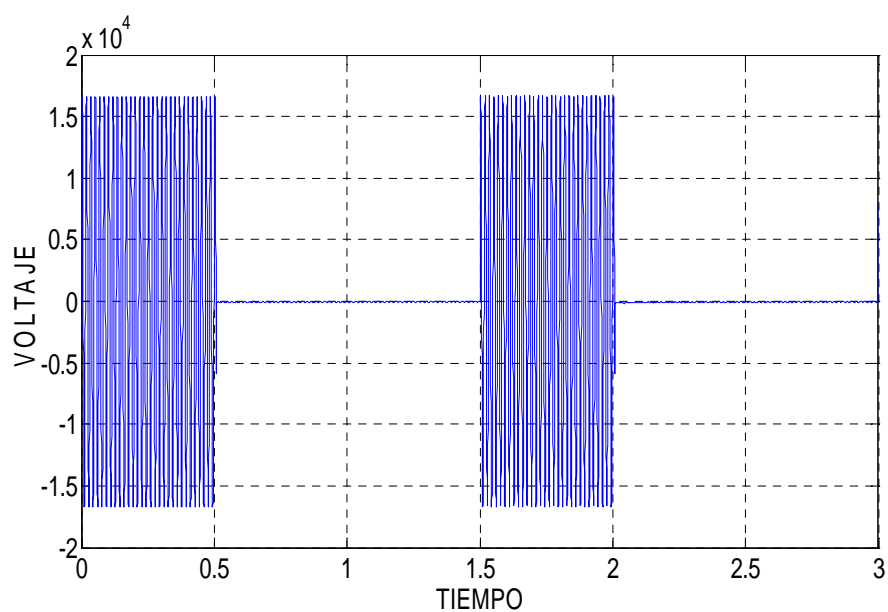


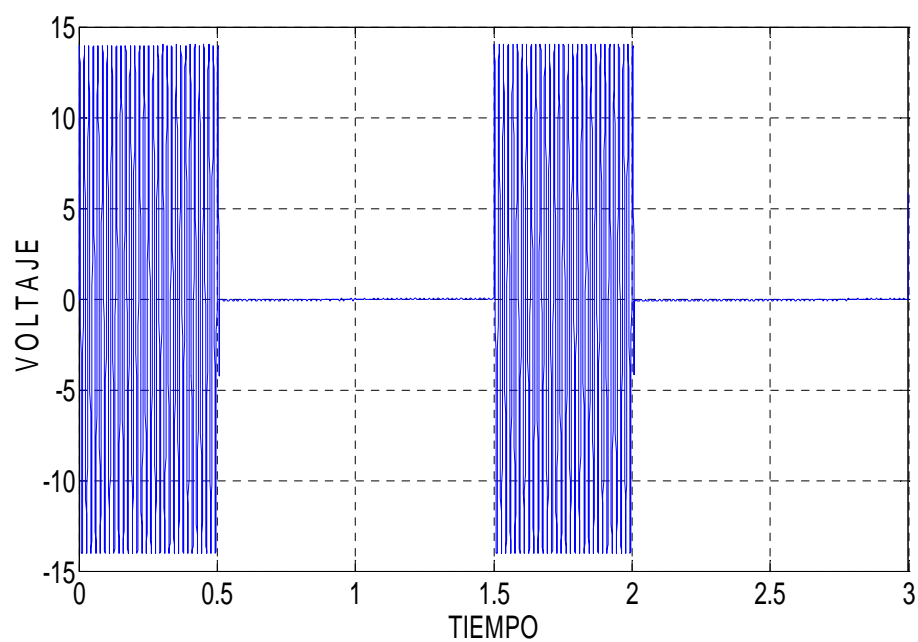
Figura 40 Corriente de soldadura I2.



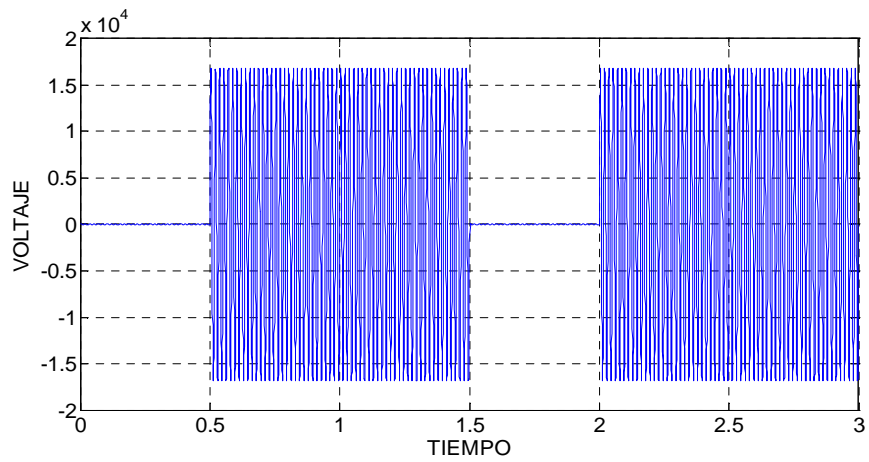
*Figura 41 Tensión E1*



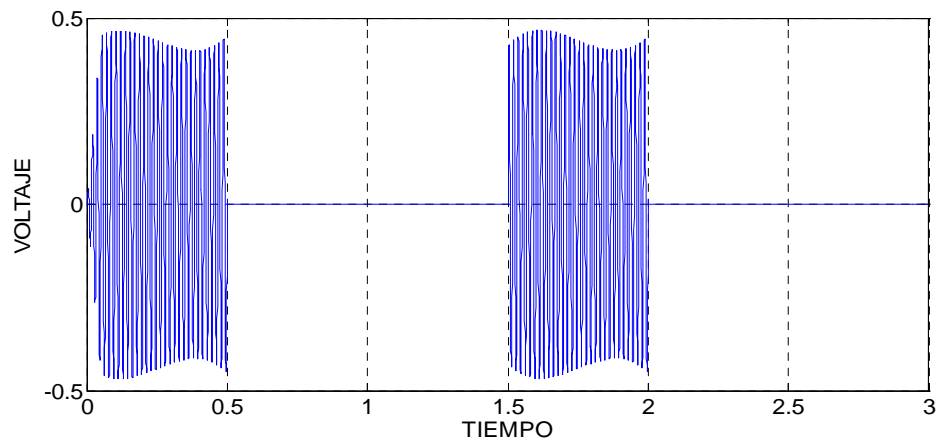
*Figura 42 Tensión del lado del secundario del transformador interno del soldador*



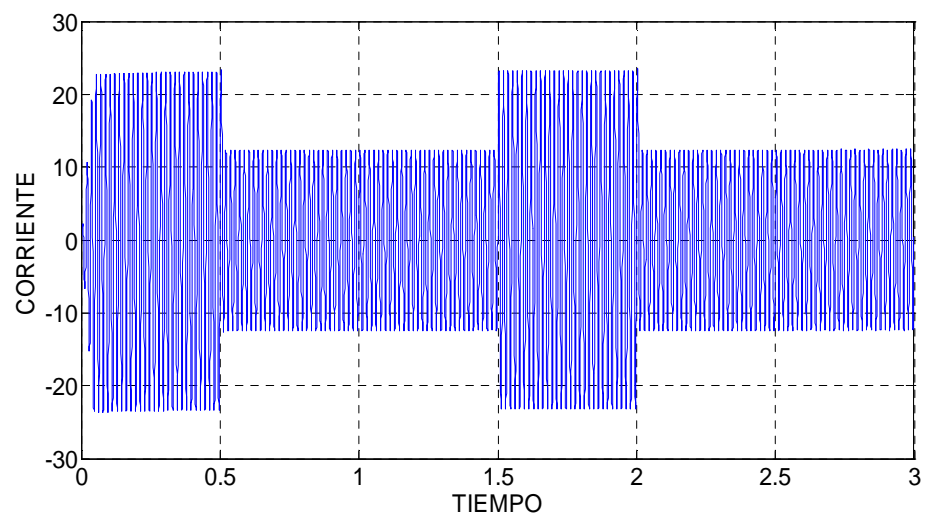
*Figura 43 Tensión del antiparalelo del SCR*



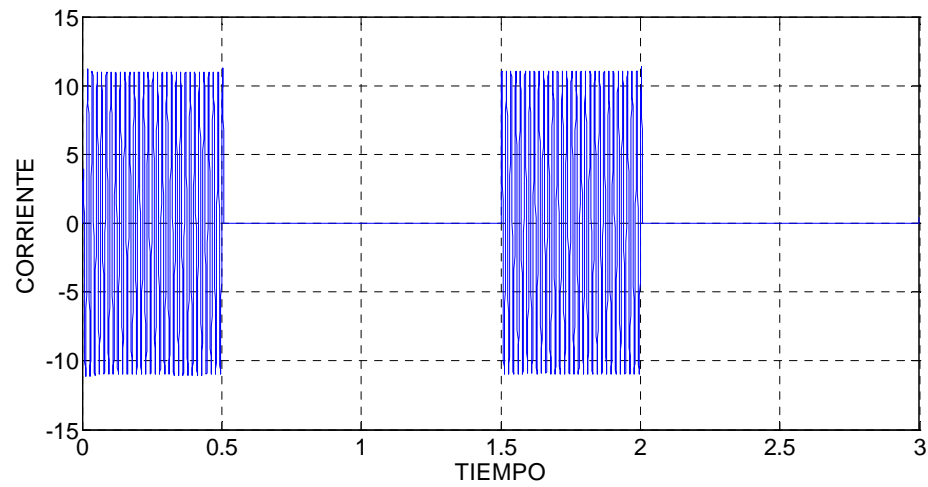
*Figura 44 Tensión del proceso de soldadura*



*Figura 45 Corriente del lado secundario del transformador de la fuente*



*Figura 46 Corriente del lado primario del transformador interno del soldador*



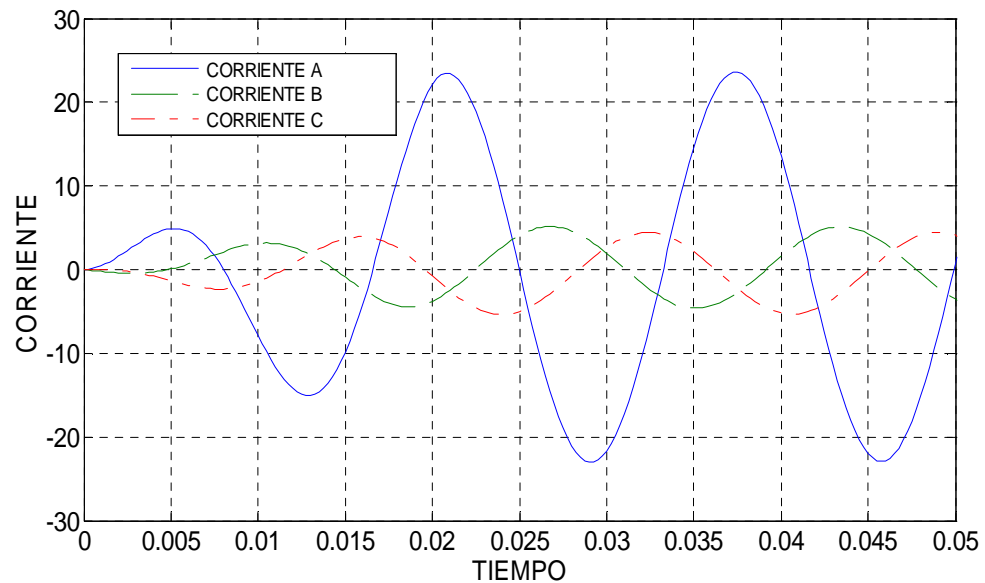
**Tabla 11 Valores pico de los parámetros trifásicos**

PARAMETRO	VALOR PICO
Tensión $E_a$	16858.30V
Corriente $I_2$	12980.63A
Tensión $E_1$	16649.43 V
Tensión $E_2$	14.00 V
Tensión soldadura $E_{res}$	0.4678 V
Corriente $I_s$	27.97 A
Corriente $I_l$	11.35 A
Tensión SCR	16928.63 V

Las formas de onda encontradas para el comportamiento del soldador en el sistema trifásico son similares a las empleadas para el sistema monofásico esto es con el fin de que las mediciones del Pst y la transferencia del flicker sean vistas en un mismo contexto y lograr un análisis comparativo de los dos sistemas tanto el monofásico como el trifásico.

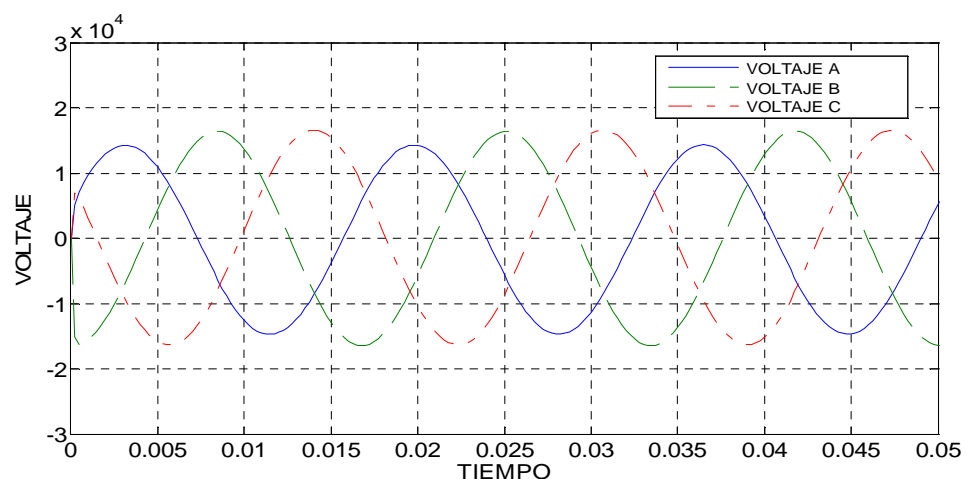


Figura 47 Corrientes de las fases A-B-C

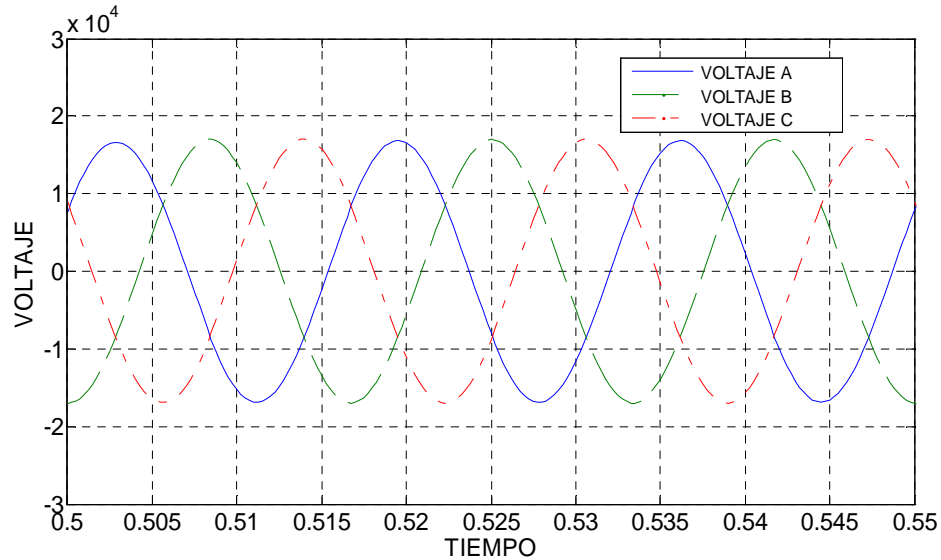


En la figura 47 se observa la forma de onda de las corrientes en las fases A, B, C. En la fase A se conecta el soldador y su componente de corriente es de una magnitud mayor, esto es debido a que el soldador es una carga que requiere de un nivel de corriente grande para trabajar. En las fases B y C se conectan dos cargas similares de 150KVA con el fin de observar el desbalance de tensión provocado por el soldador de punto.

Figura 48 Tensiones de las fases A-B-C en el intervalo de tiempo de la máquina en el estado de encendido (ON)



*Figura 49 Tensiones de las fases A-B-C en el intervalo de tiempo de la máquina en el estado de apagado (OFF)*



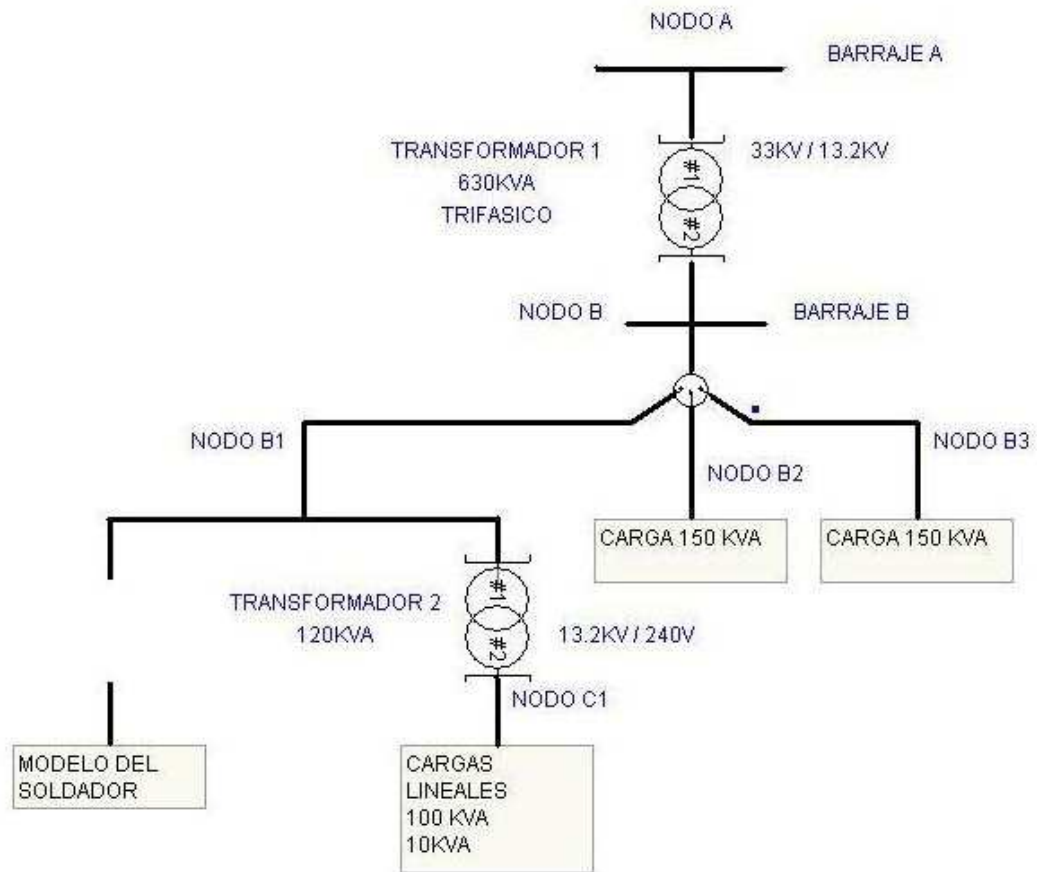
Las figuras 48 y 49 muestran las formas de onda de las tensiones en las fases A-B-C del sistema trifásico.

Las tensiones se encuentran desfasadas  $120^\circ$ . Dependiendo del ciclo de trabajo en el que se encuentre la máquina, la magnitud de la fase A cambia con respecto a las fases B y C. para la figura 48 la máquina se encuentra en el estado de encendido, esto provoca una perturbación en la tensión lo que ocasiona que el voltaje en la fase A sea menor que en las fases B y C.

Cuando la máquina pasa al estado de apagado, la perturbación en la tensión desaparece provocando que la tensión en la fase A se normalice en un valor de voltaje similar al de las fases B y C como se muestra en la figura 49.

## 4.5.1 Análisis comparativo del PST del modelo trifásico y monofásico

*Figura 50 Medición del PST con la carga perturbadora desconectada del sistema trifásico*

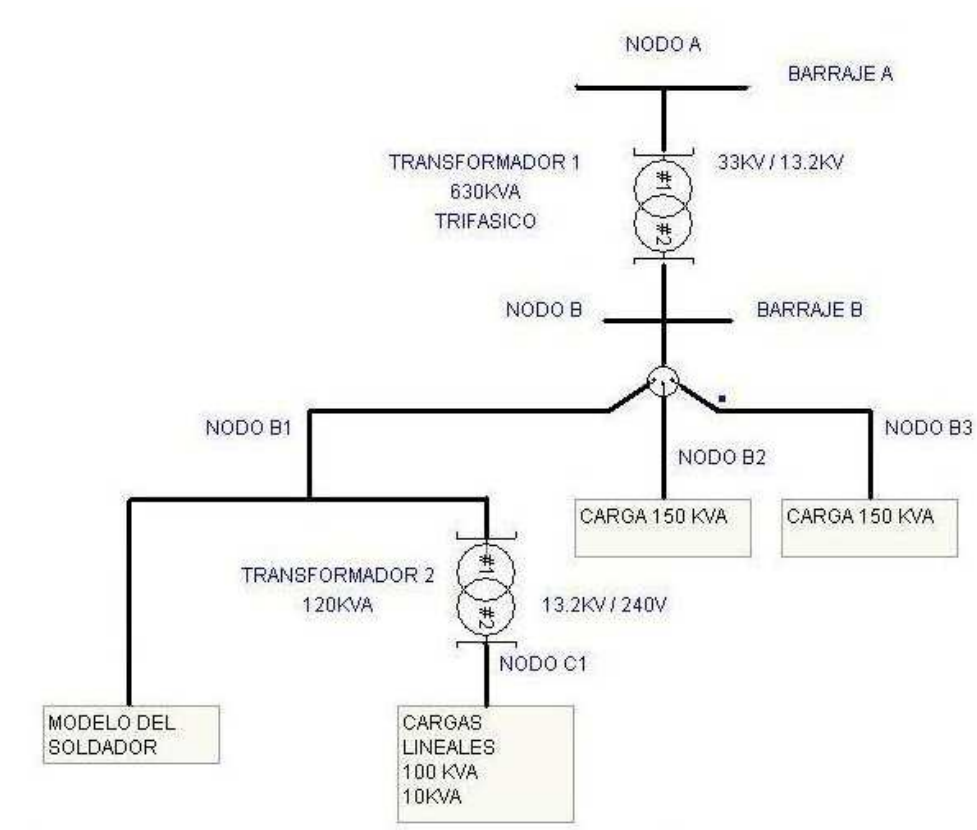


**Tabla 12 Datos del PST con la carga perturbadora desconectada del sistema trifásico**

NODO	B1	B2	B3	C
PST	0.0116	0.0196	0.0083	0.0122

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

*Figura 51 Medición del Pst con la carga perturbadora conectada a la red*



**Tabla 13 Datos del Pst con la carga perturbadora conectada a la red**

NODO	B1	B2	B3	C
PST	1.3615	0.0195	0.0109	1.3604

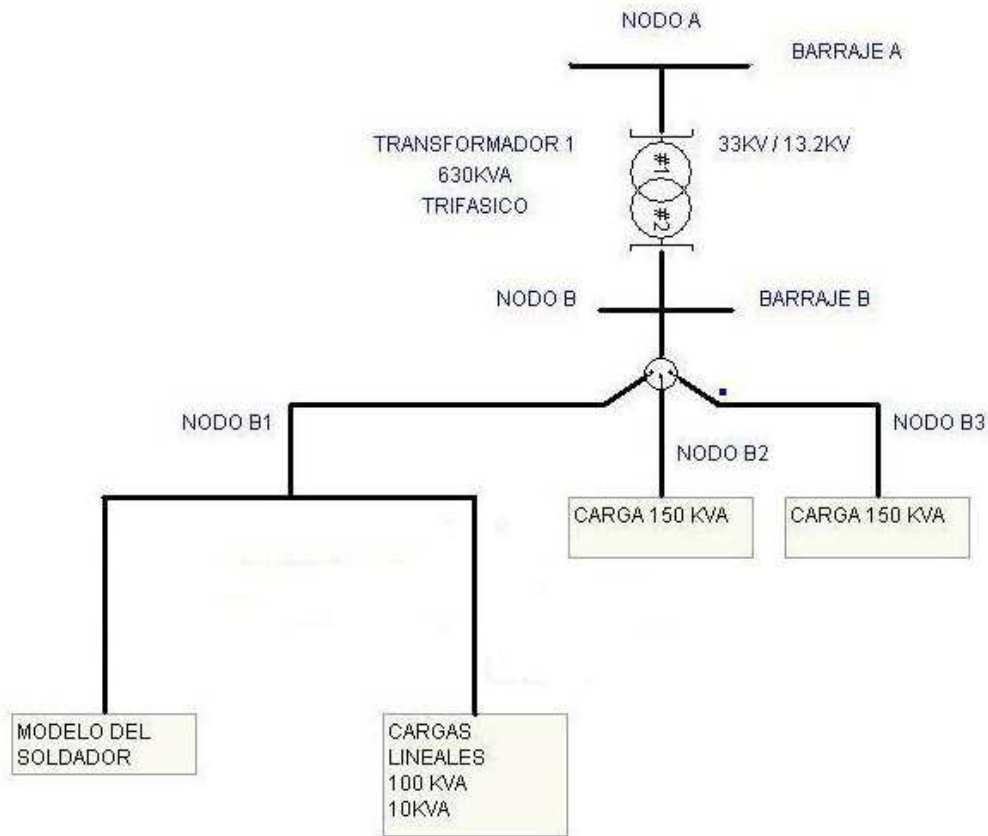
Se mide la transferencia de flicker a la carga y se encuentra el porcentaje de transferencia:

$$T_{PSTB1C1} = 0.988$$

$$\% T_{PSTB1C1} = 98.8\%$$

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

*Figura 52 Medición del Pst sin el transformador de alimentación de las cargas lineales.*



**Tabla 14 Datos del Pst sin el transformador de alimentación de las cargas lineales**

NODO	B1	B2	B3
PST	1.3623	0.0195	0.0109

Cuando se realiza la comparación del Pst medido en el sistema monofásico con el medido para el sistema trifásico se puede observar que todos los valores de Pst trifásico se ven disminuidos figuras 51 y 52, en el punto de conexión común (PCC), para el caso trifásico es el nodo B1 para el caso monofásico es el nodo B. El Pst medido en el nodo C que es el nodo de conexión de las cargas lineales se ve reducido por que la potencia del alimentador principal es aumentada considerablemente en comparación a la potencia que maneja el alimentador principal en el sistema monofásico. Esto quiere decir que la diferencia de potencia en los alimentadores principales trae como consecuencia una disminución en la reactancia de corto circuito del sistema trifásico lo que claramente lo muestra como un sistema mucho más robusto que el sistema monofásico, lo que provoca que el sistema trifásico sea menos sensible a las perturbaciones introducidas por el soldador de punto, ya que la tensión de la fuente es reflejada en la carga cuando la reactancia de corto circuito del alimentador principal es pequeña.

### 4.6 Desbalance de tensión

Se mide el desbalance provocado en las fases B y C, por el soldador de punto que se conecta en la fase A del transformador de alimentación. Para esto se utiliza la formulación matemática mencionada en la sección 3.7.1 que se enfoca en la fórmula general del grado de desequilibrio utilizando los voltajes de secuencia positiva y negativa para el desarrollo de esta parte del documento.

Se toman los siguientes valores para los voltajes de fase:

$$V_{AB} = 29253.83 \angle 59.73^\circ$$

$$V_{BC} = 29443.09 \angle -60.19^\circ$$

$$V_{CA} = 29416.74 \angle 179.45^\circ$$

$$V_{POS} = 29371.11 \angle 59.66^\circ$$

$$V_{NEG} = 114.71 \angle 132.71^\circ$$

Utilizando los datos anteriores se realiza el cálculo del desbalance de tensión:

$$\% \text{ Desbalance} = \frac{114.71}{29371.11} \times 100\% = 0.39\%$$

Se puede observar que el desbalance producido por el soldador de punto está entre el rango indicado en la sección 3.7.2.

### 5 CONCLUSIONES

Se realizó el modelado del soldador de punto teniendo como datos conocidos el rango de la corriente utilizada para alcanzar la temperatura de soldadura, la resistencia asociada al proceso de soldadura la cual se presentó en la ecuación 4.1 y el valor de impedancia de la rama de dispersión en el lado secundario del transformador interno del soldador presentado en la tabla 2. Partiendo de estos valores mediante cálculo circuital se obtuvieron los parámetros de funcionamiento de la máquina soldadora, es decir, impedancia del lado primario del transformador del soldador y la tensión en bornes de su lado secundario. Todos los datos mencionados anteriormente se encuentran en las tablas 4 y 5 del capítulo 4. Y a partir de ellos, se puede concluir que el modelo implementado para este documento es semejante a un soldador de punto comercial, puesto que los valores cumplen con todos los requisitos y estándares de funcionamiento que existen para este tipo de máquinas.

El modelo del soldador de punto fue implementado satisfactoriamente en el software PSCAD verificando que todos los parámetros característicos de operación de la máquina funcionen correctamente en la simulación como se muestra en la tabla 5. Se puede afirmar que el software PSCAD es adecuado para la simulación de máquinas eléctricas conectadas a sistemas de potencia y no presenta ningún problema para el correcto funcionamiento del modelo del soldador de punto al momento de implementarlo mediante diagrama de bloques como se indica en la figura 17, las mediciones realizadas de tensión y corriente se ajustan a los valores enunciados en el capítulo 2. Además, la ecuación de la resistencia de soldadura se implementó mediante diagrama de bloques en el software PSCAD en base a la ecuación 4.1 obteniéndose la forma de onda característica mostrada en la figura 19 y comportamiento de la misma para los ciclos de trabajo de soldadura en la figura 18.

Después de comprobar el correcto funcionamiento del soldador se conectó la máquina a una red de distribución monofásica para estudiar y cuantificar los efectos provocados por la máquina en la red. En el mismo nodo de conexión del soldador se conectó un transformador monofásico de 120kVA para alimentar dos cargas lineales de 10 kVA y 100kVA, se midió el Pst en el nodo B que representa el punto de conexión común del sistema (PCC) cuyo valor fue de 1.4266 que representa un Pst excedido en 0.4266 por encima de los límites permitidos en la norma IEC 61000-2-12 de la tabla 6. Luego se procedió a medir el Pst en el lado secundario del transformador de alimentación de las cargas lineales en el nodo C y se obtuvo un valor de 1.4252 el cual indica un Pst excedido en 0.4252 por encima del límite de la norma anteriormente mencionada. Se puede observar que el soldador de punto es una fuente perturbadora ya que cuando se desconecta del sistema se reduce el Pst aproximadamente a cero cuando es medido en los nodos B y C del sistema de distribución figura 33.

Cuando se retira el transformador de alimentación de las cargas lineales de 10kVA y 100kVA, dichas cargas son conectadas directamente al nodo B donde el Pst medido fue

de 1.4288 correspondiente a la tabla 9, equivale al nodo de conexión de la carga perturbadora de la figura 35, donde el flicker producido por el soldador de punto se transfiere en un 100% a las cargas lineales. Adicionalmente se observa que cuando el transformador de alimentación de 120kVA está de nuevo conectado en el sistema figura 34, la impedancia del transformador de alimentación de las cargas lineales produce una disminución de la transferencia del Pst en un valor de 0.0036 cuando se comparan los resultados obtenidos en las tablas 8 y 9. Esto es un indicativo para valores del Pst superiores a 1 donde la carga perturbadora afecta a más del 50% de los observadores y presentan irritabilidad luminosa como se menciona en la sección 3.5 de este documento.

Las cargas lineales de 10kVA y 100kVA se conectaron a la fase A del sistema trifásico junto con el modelo monofásico del soldador de punto, en las dos fases restantes se conectaron dos cargas equilibradas de 150kVA cada una, esto con el fin de medir el Pst en los nodos B1, C1, B2, B3 como se muestra en la figura 37, y realizar una comparación del Pst de los nodos B1 y C1 con los nodos B y C estudiados en el análisis monofásico. A pesar de que el valor del Pst en el nodo B1 de 1.3615 y de 1.3604 para el nodo C1 supera en 0.3615 y 0.3604 los límites permitidos por la norma IEC 61000-2-12 se produjo una reducción del Pst de 0.0651 y de 0.0648 en comparación a las mediciones en los nodos B y C del caso monofásico. Por otra parte el Pst medido en los nodos B2 y B3 de 0.0195 y 0.0109 de la tabla 13, están dentro del rango permitido por la norma mencionada anteriormente, por lo tanto se puede afirmar que el Pst generado en el soldador de punto no se transfiere a las fases B y C. En conclusión a lo anterior se puede decir que el Pst en el sistema trifásico se ve reducido en comparación al presentado en el sistema monofásico, ya que se utiliza un transformador de alimentación de mayor capacidad nominal (630 KVA) y con una reactancia de cortocircuito menor (0.002744 pu) respecto a los valores calculados para el sistema monofásico con un transformador de potencia nominal de 220KVA y reactancia de cortocircuito de 0.03892 pu.

Por último, se utilizó el sistema trifásico para encontrar el porcentaje de desbalance de tensión provocado por la fase A de conexión de la máquina soldadora hacia las dos fases adyacentes B y C, observándose un valor pico de tensión de 16853.99 Voltios para la fase A, 16586.977 Voltios para la fase B y 16956.19 Voltios para la fase C, las cuales se utilizaron en la ecuación 3.9 mencionada en la sección 3.7.1; mostrando un valor de desbalance de tensión en el sistema de 0.39%. De lo anterior, se puede concluir que el desbalance de tensión producido por el soldador de punto hacia las fases B y C no es un valor importante según límites enunciados en la sección 3.7.2 para el sistema trifásico analizado, debido a que la corriente absorbida por el lado primario del soldador no influye notablemente en el desempeño de las cargas conectadas en la fases adyacentes.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E n t r o n soldadura por resistencia secuencias básicas de soldadura definiciones disposición de la máquina reglas para hacer buenas soldaduras 700081-001<sup>a</sup>. ENTRON Controls, Inc. Miembro de RWMA.
- [2] Alfonso Álzate G. Profesor Titular ingeniería eléctrica. “Libro Electrónica De Potencia”, Universidad Tecnológica De Pereira.
- [3] Norma Técnica Colombiana. NTC 818. Electrotecnia. Transformadores. Transformadores Monofásicos Autorrefrigerados y Sumergidos en liquido.
- [4] Norma Técnica Colombiana NTC 819. Electrotecnia. Transformadores trifásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito.
- [5] ing. Téllez Eugenio Programa de ahorro de energía, calidad de la energía, Automatización, productividad y calidad s.a. de c.v.
- [6] Cruz Castro Arturo Alejandro, Análisis de causas, efectos y métodos para corregir variaciones de voltaje flicker, en puntos aleatorios de carga, en la ciudad capital Guatemala, agosto de 2008.
- [7] Hanzelka Zbigniew & Bien Andrzej. AGH University of Science and Technology Abril 2006. *Perturbaciones de Tensión*. Guía de Calidad de la Energía Eléctrica.
- [8] Cidras J, Carrillo C. El fenómeno del parpadeo. Departamento de Ingeniería eléctrica. Universidad de Vigo.
- [9] Ing. Dimenna Claudio. Flicker. Perturbaciones en redes de baja tensión teoría. Resolución de casos. Departamento de ingeniería eléctrica. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Mar del Plata. u.n.m.d.p. Buenos Aires, Argentina.

## ANALISIS DEL FLICKER CON SOLDADORES DE PUNTO

---

[10] Ceballos Reyes Alejandra “Transferencia del flicker causado por un horno de arco eléctrico en una red de distribución”. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira 2009.

[11] Sankika Tennakoon “Flicker Transfer In Radial Power Systems” Computer and Telecommunications Engineering University of Wollongong, 26-29 September 2004, Brisbane, Australia.

[12] ECAMEC Tecnología. “Desbalance de tensiones en sistemas trifásicos”. Sep 2009.

[13] Casaravilla Gonzalo Instituto de Ingeniería Eléctrica Universidad de la República, Echinope Virginia Instituto de Ingeniería Eléctrica Universidad de la República. Desbalances. Estudio de alternativas para su estimación.

[14] Cho Yongjoon and Rhee Sehun .Quality estimation of resistance spot welding by using pattern recognition with neural networks. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 53, no. 2, april 2004.