

**Revista de la**  
*Universidad Politécnica*  
**de Puerto Rico**

Publicado semestralmente por la Universidad Politécnica de Puerto Rico para difundir los hallazgos de la investigación científica que en ella se hace.

VÓL. 4

DICIEMBRE 1994

NÚM. 2

**Análisis del sistema de protección de  
IPR Pharmaceuticals, Inc**

*Ramón H. Flores Nieves*

*Luis A. Pérez Dumeng*

Candidatos a graduación en ingeniería eléctrica, UPPR

**Sinopsis**

Este estudio se basa en el sistema de distribución eléctrica de una farmacéutica. El objetivo del estudio es aclarar y entender porqué el disyuntor de 800A del circuito de bajo voltaje en los equipos de distribución ("switchgear") que alimenta el centro de control de motores (MCC) abrió para despejar una falla que ocurrió en el poste de alumbrado

de 277V. También interesamos determinar porqué el disyuntor de 20A del circuito ramal y el disyuntor principal de 60A del panel de distribución no abrieron para despejar la falla. Como consecuencia de esta falla se disparó la caldera de vapor de la planta. Se muestra el diagrama monolineal del sistema eléctrico de la planta y la conexión secuencial de los disyuntores.

Para verificar el problema existente en la coordinación graficamos las curvas características de tiempo-corriente, de los disyuntores envueltos y verificamos que no hubiese sobreposición entre las curvas de los disyuntores adyacentes. Si hubiera alguna sobreposición entre las curvas de los disyuntores significaría que cualquiera de los disyuntores o todos a la vez abrirían para despejar la falla.

Después de estudiar y analizar la avería en el poste de alumbrado sugerimos dos alternativas para resolver este problema de coordinación. Una de ellas es cambiar al máximo los ajustes de los disyuntores; y la otra es reemplazar un disyuntor por uno que tenga la opción de un relé de protección a tierra. Sin embargo, tendríamos que cambiar los ajustes de los restantes disyuntores.

### **Abstract**

#### **Analysis of the electrical protection system of IPR Pharmaceuticals**

This study is based on the electrical distribution system of a pharmaceutical plant. The purpose of the study is to investigate why the low voltage switchgear 800A circuit breaker feeding a motor control center (MCC) tripped to clear a fault that occurred at a 277V street light pole. We also want to know why the preceding 20A branch circuit breaker and the 60A main breaker feeding the panel board did not trip. As a consequence of this fault the steam boiler was shut down. The one-line diagram of the electrical system of the plant and the circuit breakers sequence connections are shown.



To verify the existing coordination problem we plotted the time-current characteristic curves of the circuit breakers involved and made sure there was no overlapping between the breaker's curves. An overlapping means that either breaker or all of them will trip at the same time when a fault occurs.

After studying and analyzing the fault we suggest two alternatives to solve this breaker coordination problem: changing the settings of the breakers to their maximum, and to replace one breaker for another with the ground fault protection option; however, we would have to change settings to the remainder breakers.

### Introducción

IPR es una farmacéutica de Guayama, cuya planta comprende una extensión de 150 cuerdas, 50 de las cuales se desarrollaron para procesos químicos. En esta planta se procesa el ingrediente activo para una pastilla para enfermedades del corazón ( Zestril & Atenolol & Tenormin ). Esta farmacéutica tiene un sistema eléctrico con un alimentador principal de 38 kV que sale vía aérea desde el centro de transmisión Jobos en Guayama. La figura 1 muestra la distribución de esta planta y sus diferentes transformaciones de 38kV - 4.16kV, 4.16kV - 480V, 480V - 120/208V, todas trifásicas.

Durante la construcción de IPR Pharmaceuticals, específicamente del alumbrado de la calle, el alambrado (277V) de fase y neutral se intercambió y se ocasionó una falla a tierra. El disyuntor de bajo voltaje (480V, 800A) que alimenta el centro de control de motores #MCC 70A3 en el edificio de utilidades abrió para despejar la falla. Sin embargo, el disyuntor de 20A del circuito ramal y el disyuntor principal de 60A del panel de distribución para las luces de la calle no abrieron para despejar la falla. Se supone que estos disyuntores actuaran antes que el disyuntor del #MCC 70A3.

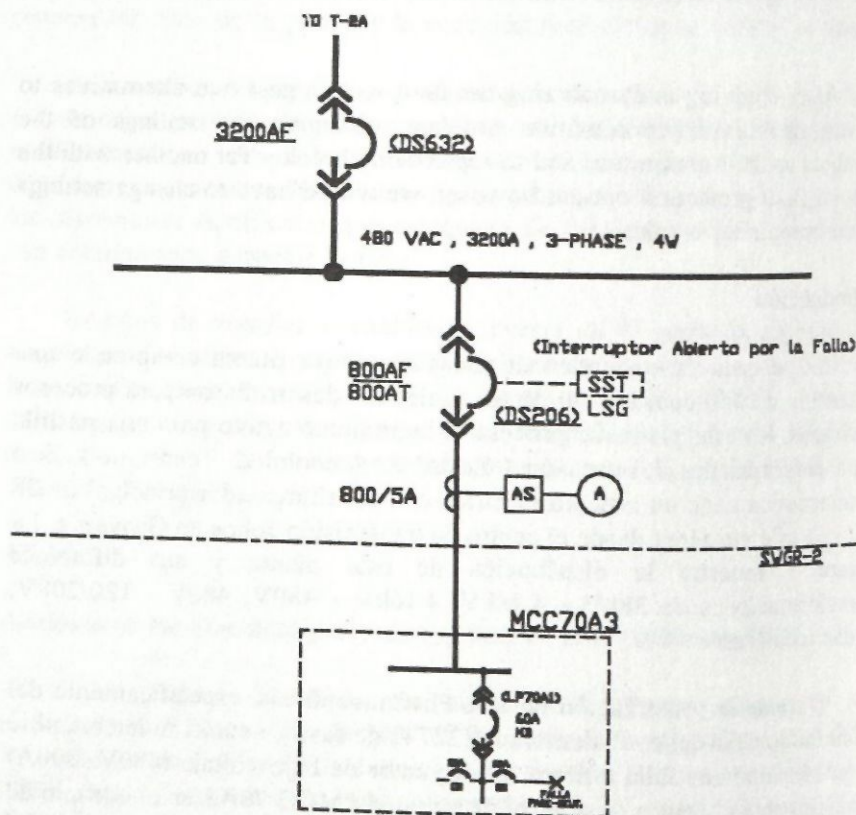


Figura 11  
Diagrama Monolineal Para la Falla

Figura 1. Sistema eléctrico de la planta

En nuestro trabajo logramos los siguientes objetivos:

- Analizar la coordinación de la protección del circuito de referencia para ver la confiabilidad del sistema.
- Determinar si hubo o no mal funcionamiento del sistema de protección.
- Confirmar si la información de campo es correcta y si concuerda con el estudio de coordinación original.
- Investigar las consecuencias que trae esta falla al proceso de la planta.

Para desarrollar este proyecto investigamos porqué los disyuntores no abrieron cuando sucedió la falla y analizamos la coordinación del sistema de protección de la parte afectada para determinar su confiabilidad.

### **Análisis**

#### *Método de componentes simétricos*

El método de componentes simétricos provee una tecnología práctica para entender y analizar un sistema de potencia en operación durante condiciones de desbalance. Las condiciones de desbalance pueden surgir por fallas de fase a fase o fallas de fase a tierra. Para estos sistemas hay tres distintos componentes para corriente y voltaje: secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero. A través de esta discusión los valores para cada secuencia siempre son de línea a neutral o línea a tierra, según sea apropiado. Se excluye el voltaje de línea a línea, ya que éste comúnmente se indica.

Es bien importante que todos los valores se especifiquen relativos a una base común. En la práctica se usa la base de 100 MVA para un nivel de voltaje en particular. En nuestro caso los cálculos se basan en 100 MVA a 38 kV. La figura 2 muestra el sistema a estudiarse.



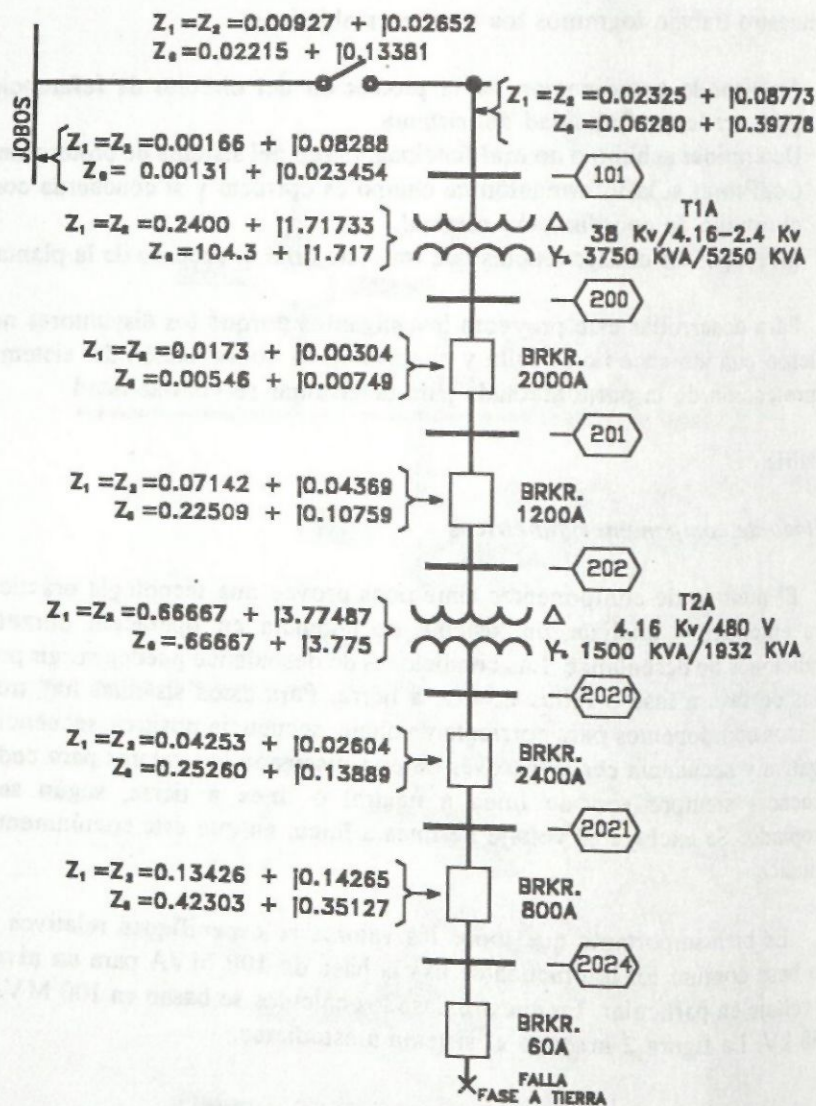


Figura 2. Circuito a estudiarse

Para el estudio de fallas en sistemas de protección la práctica casi universal es usar la reactancia subtransitoria de las máquinas de rotación (motores, generadores) para los circuitos de secuencia positiva. Esto nos da un valor máximo de corriente de falla que es bien útil para coordinar los relés de protección de alta velocidad. En la práctica la protección se ajusta a su nivel más sensitivo posible, pero sin afectar el punto de operación máximo de carga (equipo de fase). El sistema debe proveer una protección sensitiva en el período de reactancia transitoria.

En la mayoría de los casos los motores de inducción no se consideran como fuentes de corriente de falla para el propósito de protección. Sin embargo, hay que considerar los motores de inducción en la aplicación de disyuntores de circuitos bajo los estándares de ANSI/IEE. Sin fuente de campo, el voltaje desarrollado por los motores de inducción decae drásticamente durante los primeros cuatro ciclos. Por tal razón, su efecto no se considera en la protección de sobrecorriente de tiempo, pero sí en el caso de protección de sobrecorriente instantánea.

#### Circuito secuencia positiva

El circuito de secuencia positiva es generalmente el diagrama del sistema de línea a neutral para una de las tres fases simétricas modificada de acuerdo a la condición de la falla. La figura 3 ilustra el circuito de secuencia positiva para el sistema de la figura 2.

El flujo de corriente convencional se presume para que sea desde la barra neutral  $N_1$  hacia el área o punto de desbalance. La caída de voltaje  $V_{ix}$  en cualquier punto en el circuito es siempre

$$V_{ix} = V - \sum I_1 Z_1 \quad (1)$$

donde  $V$  es el voltaje de la fuente y  $\sum I_1 Z_1$  es la suma de las caídas de voltaje a lo largo de cualquier paso de la barra neutral  $N_1$  al punto de medida.

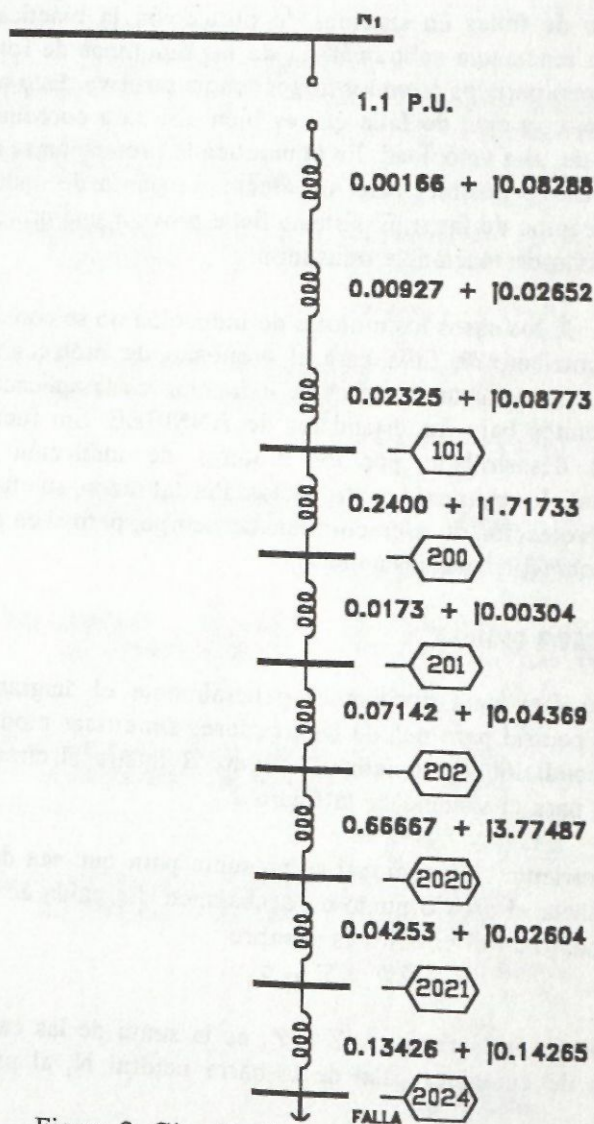


Figura 3. Circuito de secuencia positiva



### Circuito secuencia negativa

El circuito de secuencia negativa define el flujo de las corrientes de secuencia negativa. Los generadores no producen corrientes de secuencia negativa, pero la corriente de secuencia negativa del circuito puede fluir a través de sus embobinados. Por esta razón, los generadores y las fuentes de voltaje se representan como una impedancia sin voltaje, según lo ilustra la figura 4. Para transformadores, líneas y otros, la secuencia de fase de la corriente no cambia la impedancia que encuentran, así que los mismos valores de secuencia positiva se usan para la secuencia negativa.

Una expresión común para la impedancia de secuencia negativa de una máquina sincrónica es

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_d'' + X_q'') \quad (2)$$

Para máquinas de rotor redondo,  $X_d'' = X_q''$ , así que  $X_2 = X_d''$ . Cuando  $X_2 = X_d''$ , el circuito de secuencia negativa es equivalente al circuito de secuencia positiva, excepto por la omisión de voltajes. Se presume un flujo de corriente convencional, desde la barra neutral  $N_2$  hacia el área o punto de desbalance. Entonces la caída de voltaje  $V_{2x}$  en cualquier punto del circuito es siempre

$$V_{2x} = 0 - \sum I_2 Z_2 \quad (3)$$

El parámetro  $\sum I_2 Z_2$  es la suma de las caídas de voltaje desde la barra neutral  $N_2$  hasta el punto de medida.

### Circuito secuencia cero

El circuito secuencia cero siempre es diferente; no es un sistema trifásico y las corrientes de fase y voltajes son iguales en magnitud y en fase. Esto constituye un sistema monofásico con iguales corrientes y voltajes en cada una de las fases y en todos los puntos de un sistema trifásico. La figura 5 muestra el diagrama de secuencia cero.

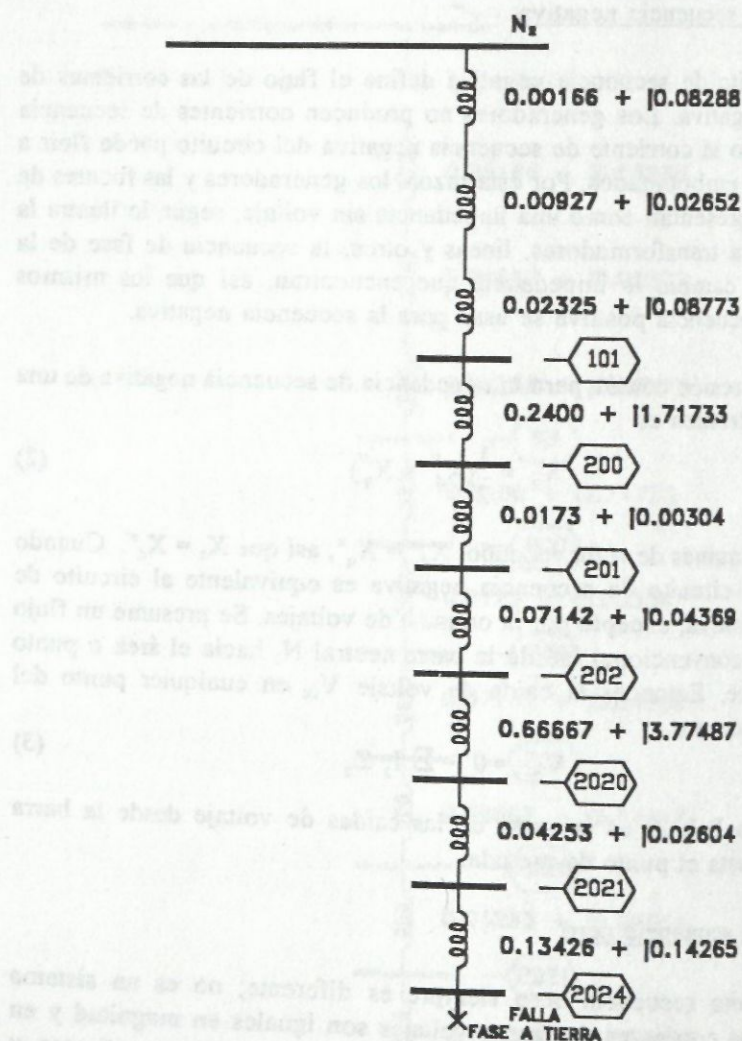


Figura 4. Circuito de secuencia negativa.

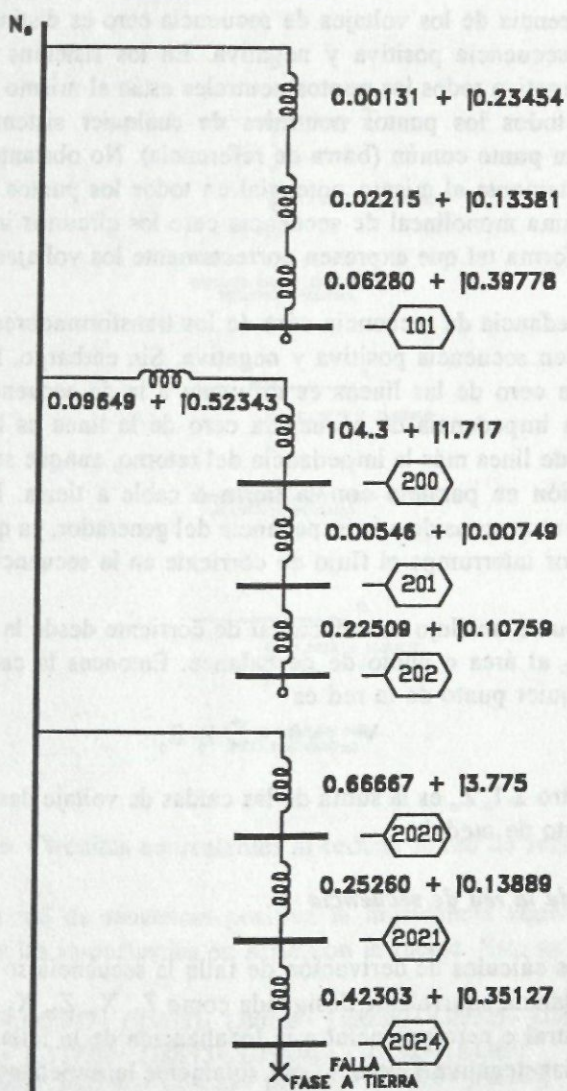


Figura 5. Circuito de secuencia cero



La referencia de los voltajes de secuencia cero es distinta a la de los voltajes de secuencia positiva y negativa. En los sistemas de secuencia positiva y negativa todos los puntos neutrales están al mismo potencial. De esta forma todos los puntos neutrales de cualquier sistema se pueden conectar a un punto común (barra de referencia). No obstante, la tierra no está necesariamente al mismo potencial en todos los puntos. Por lo tanto, en un diagrama monolineal de secuencia cero los circuitos individuales se diseñan de forma tal que expresen correctamente los voltajes a tierra.

La impedancia de secuencia cero de los transformadores es igual a la impedancia en secuencia positiva y negativa. Sin embargo, la impedancia de secuencia cero de las líneas es diferente a la de secuencia positiva y negativa. La impedancia de secuencia cero de la línea es la suma de la impedancia de línea más la impedancia del retorno, aunque sea en la tierra, o combinación en paralelo con la tierra o cable a tierra. El circuito de secuencia cero no considera la impedancia del generador, ya que la delta del transformador interrumpe el flujo de corriente en la secuencia cero.

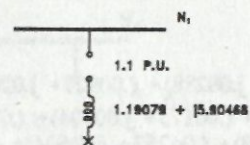
Se presume un flujo convencional de corriente desde la barra de cero potencial  $N_0$  al área o punto de desbalance. Entonces la caída de voltaje  $V_{ox}$  en cualquier punto de la red es

$$V_{ox} = 0 - \sum I_0 Z_0 \quad (4)$$

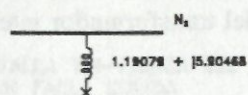
y el parámetro  $\sum I_0 Z_0$  es la suma de las caídas de voltaje desde la barra  $N_0$  hasta el punto de medida.

### *Reducción de la red de secuencia*

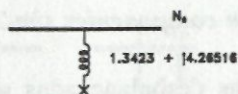
Para los cálculos de derivación de falla la secuencia se puede reducir a una impedancia equivalente designada como  $Z_1$ ,  $X_1$ ,  $Z_2$ ,  $X_2$ ,  $Z_0$  y  $X_0$  desde la barra neutral o cero potencial a la localización de la falla. Esto es, para las secuencias negativa y cero se usa solamente la impedancia equivalente del teorema de Thevenin y para la red de secuencia positiva se usa la impedancia y el voltaje de Thévenin (fig. 6)



CIRCUITO EQUIVALENTE PARA SECUENCIA POSITIVA



CIRCUITO EQUIVALENTE PARA SECUENCIA NEGATIVA



CIRCUITO EQUIVALENTE PARA SECUENCIA CERO

Figura 6. Circuitos equivalentes al reducir la red de secuencia

Para una red de secuencia positiva la impedancia equivalente es la suma de todas las impedancias en serie con la fuente. Esto es

$$\begin{aligned}
 Z_{1eq} &= (.00927 + j.02652) + (.00166 + j.08288) + (.02325 + j.08773) \\
 &+ (.24 + j1.71733) + (.00173 + j.00304) + (.07142 + j.04369) \\
 &+ (.66667 + j3.7748) + (.04253 + j.02604) + (.13426 + j.14265) \\
 &= 1.19079 + j5.90468
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

## Flores y Pérez/Análisis sistema protección

Para la red de secuencia negativa no hay fuente de voltaje y la impedancia equivalente es la combinación en serie de las impedancias envueltas.

$$\begin{aligned} Z_{2eq} &= [(0.00166 + j0.08288) + (0.00927 + j0.02652) + (0.02325 + j0.08773) \\ &+ (0.24 + j1.71733) + (0.00173 + j0.00304) + (0.07142 + j0.04369) \\ &+ (0.66667 + j3.7748) + (0.04253 + j0.02604) + (0.13426 + j0.14265)] \\ &= 1.19079 + j5.90468 \end{aligned} \quad (6)$$

Por último, en el caso de la red de secuencia cero no hay fuente de voltaje ya que la delta del transformador interrumpe el flujo de corriente.

$$\begin{aligned} Z_{0eq} &= [(0.66667 + j3.775) + (0.25260 + j0.13889) + (0.42303 + j0.35127)] \\ &= 1.34230 + j4.26516 \end{aligned} \quad (7)$$

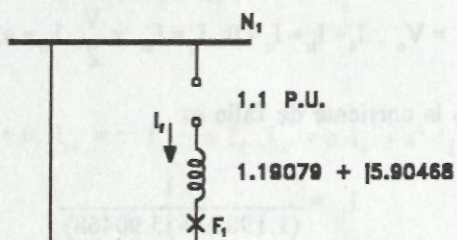
### *Aplicación del método de componentes simétricos*

Las principales fallas desbalanceadas son trifásicas, de fase a fase, doble fase a tierra y de fase a tierra. En esta sección calculamos las principales fallas para el sistema eléctrico de la compañía IPR.

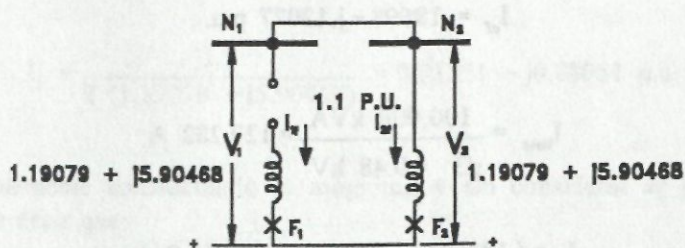
#### 1. Cálculos para una falla trifásica

Se presume que una falla trifásica es simétrica, por lo que no se requiere el cálculo de su componente simétrico. En este caso se usa la red de secuencia positiva, que es el diagrama de balance normal para un sistema simétrico (fig. 7). Para una falla sólida, el punto de falla F se conecta a la barra neutral





CONEXION PARA FALLA TRI-FASICA DEL SISTEMA  
CON FALLA SOLIDA



CONEXION PARA FALLA FASE-FASE DEL SISTEMA  
CON FALLA SOLIDA

Figura 7. Circuitos equivalentes para una falla trifásica y una falla de fase a fase, respectivamente

## Flores y Pérez/Análisis sistema protección

Condiciones para una falla trifásica:

$$V_a = V_b = V_c, I_a + I_b + I_c = 0, I_1 = I_{af} = \frac{V}{Z}, I_{bf} = a^2 I_1, I_{cf} = a I_1. \quad (8)$$

En nuestro caso la corriente de falla es

$$I_1 = \frac{1.1}{(1.19079 + j5.90468)} \quad (9)$$

$$I_1 = I_{af} = .036101 - j.17901 \text{ p.u.} = 0.18262 \angle -78.60^\circ \quad (10)$$

$$I_{bf} = -17308 + j.12077 \text{ p.u.} \quad (11)$$

$$I_{cf} = .18698 - j.12077 \text{ p.u.} \quad (12)$$

$$I_{base} = \frac{100,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ kV}} = 120,282 \text{ A} \quad (13)$$

$$I_f = (.18262) (120,282) = 21,965.8 \text{ A} \quad (14)$$

### 2. Cálculos para una falla de fase a fase

En la figura 7, el segundo circuito es el diagrama para una falla de doble fase a tierra con una falla sólida a tierra. Las condiciones de falla son las siguientes:

$$I_a = 0, I_b = I_c, V_b = V_c \quad (15)$$

$$I_{af} = I_1 - I_2 = 0, I_{bf} = a^2 I_1 + a I_2, I_{cf} = a I_1 + a^2 I_2 = j\sqrt{3} I_1 \quad (16)$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V}{Z_1 + Z_2} \quad (17)$$

Como es común,  $Z_1 = Z_2$ ; entonces  $I_1 = V/(2Z_1)$ . Por lo tanto, para nuestro sistema tenemos

$$I_1 = \frac{1.1}{2 (1.19079 + j5.90468)} = 0.01851 - j0.08951 \text{ p.u.} \quad (18)$$

Solamente considerando la magnitud y sin considerar  $\pm j$  esto nos permite decir que:

$$I_{\phi\phi} = \frac{\sqrt{3} V}{2Z} = 0.866 I_{3\phi} = (0.866) (21,965.2) = 19,021.86 \text{ A} \quad (19)$$

### 3. Cálculos para falla doble fase a tierra

Para una falla de doble fase a tierra el circuito de conexión es similar al de una falla de fase a tierra. Sin embargo, hay que añadirle la impedancia de la red de secuencia cero para falla sólida (fig. 8).





$$I_0 = I_1 * \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (23)$$

Si dejamos que

$$Z' = \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (24)$$

entonces

$$Z' = \frac{(1.19079 + j5.90468)(1.3423 + j4.26516)}{(1.19079 + j5.90468) + (1.3423 + j4.26516)} = 0.660137 + j2.48364 \quad (25)$$

$$I_1 = \frac{1.1 \angle 0^\circ}{(1.19079 + j5.90468) + (0.660137 + j2.48364)} = .02759 - j.12505 \quad (26)$$

$$I_2 = \frac{(.02759 - j.12505)(1.34230 + j4.26516)}{(1.19079 + j5.90468) + (1.34230 + j4.26516)} = 0.00851 - 0.05397 \quad (27)$$

$$I_0 = \frac{(.02759 - j.12505)(1.19079 + j5.90468)}{(1.19079 + j5.90468) + (1.34230 + j4.26516)} = .019083 - j.07181 \quad (28)$$

$$I_{br} = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 = (-0.1561 - j.04896) \text{ p.u.} = 19,674.44 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{cr} = aI_1 + a^2I_2 + I_0 = (.16870 - j0.00295) \text{ p.u.} \quad (30)$$

$$= 20,294.68\text{A}$$

#### 4. Cálculos para falla fase a tierra

Una falla de fase a tierra se representa por la conexión de las tres redes de secuencia en serie, según muestra la figura 9.

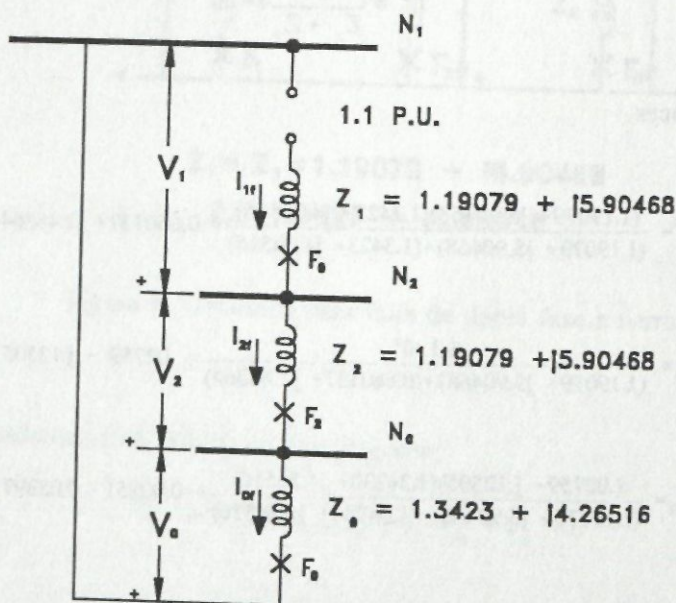


Figura 9. Conexión para falla de fase a tierra.

De ahí podemos determinar que

$$I_{af} = I_1 + I_2 + I_0 = 3I_1 = 3I_2 = 3I_0 \quad (31)$$



$$I_{af} = I_1 + I_2 + I_0 = 3I_1 = 3I_2 = 3I_0 \quad (31)$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{V}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (32)$$

$$I_{bf} = I_{cf} = 0, V_{af} = 0 \quad (33)$$

$$I_0 = \frac{1.1}{2(1.19079 + j5.90468) + (1.34230 + j4.26516)} = .015622 - j.064945 \quad (34)$$

$$I_{af} = 3I_0 = .04687 - j0.19484 = 24,514 \text{ A} \quad (35)$$

## Resultados y recomendaciones

### Resultados de la investigación

1. En la barra que se afectó con la falla del circuito de alumbrado también se conecta el alimentador de la caldera que produce vapor para el ciclo térmico del procesamiento y secado del fármaco en su fase final.
2. Los disyuntores de 20A y 60A de los circuitos de alumbrado no coordinan con el ajuste de falla a tierra del disyuntor principal de 800A. Esto se debe a que el disyuntor de 800A actúa más rápido (0.2 seg.) que los disyuntores fijos de 20A y 60A.
3. Los ajustes máximos del disyuntor son los siguientes:  

Corriente nominal ("rated")	800 A
-----------------------------	-------

4. Según el fabricante, las unidades de disparo ("tripping units") no se pueden cambiar en el modelo actual de disyuntor que tiene la planta. En este caso se debe reemplazar el disyuntor por un modelo que provea mejores alternativas de ajustes. Sin embargo, esto no es práctico debido al alto costo de estos disyuntores.
5. El ajuste de tiempo corto ("short time delay") está muy sensible. Se puede ajustar a un nivel más alto sin causar problemas de coordinación.

#### *Recomendaciones de la investigación*

Cuando se considera la protección, el funcionamiento de un disyuntor con respecto a los conductores y a la carga conectada es de gran importancia. Para lograr una buena coordinación hay que considerar también el funcionamiento del disyuntor con respecto a otros aparatos protectores hacia arriba o hacia abajo de éste. Los artefactos de protección se coordinan para hacerlos selectivos en su operación el uno con respecto del otro. De esta forma, el efecto de un corto circuito en el sistema se reduce al mínimo desconectando parte del área afectada del sistema. En otras palabras, solamente el disyuntor más cercano a la falla debe operar; el resto del sistema debe quedar intacto y disponible para suministrar energía a las áreas no afectadas.

Una manera eficiente de demostrar la coordinación de un sistema es graficando las curvas de corriente versus tiempo de los disyuntores bajo estudio. Así nos aseguramos de que ninguna de estas curvas se sobrepongan con las curvas de los disyuntores adyacentes. La sobreposición de las curvas de los disyuntores significa que hay problemas con la coordinación de protección del sistema.

La figura 1 del Apéndice 1 presenta las curvas características de tiempo-corriente de los disyuntores bajo estudio. Las curvas para falla trifásica de los disyuntores DS206 y DS632 no muestran superposición,



pero las curvas de los disyuntores de 20A y 60A están sobrepuestas en una gama de corriente de 60 a 2,000 amperios. Por consiguiente, cualquiera de los disyuntores (20A y 60A) o ambos abren cuando ocurre una falla trifásica para desenergizar el panel alimentador del alumbrado de la calle.

Ahora aplicamos el mismo análisis para los disyuntores para los ajustes para una falla a tierra. La figura 2 del Apéndice 1 muestra la curvas para estos ajustes. Es evidente la sobreposición entre las curvas y que la curva del DS206 está al frente de las curvas restantes. Por lo tanto, el DS206 se dispara primero que los disyuntores de 20A y 60A que en orden lógico están antes. Si comparamos el disyuntor DS206 con los disyuntores de 20A y 60A podemos observar que el disyuntor DS206 se ajustó para dispararse más rápido que los de 20A y 60A.

Después de haber estudiado el evento que ocurrió, sugerimos dos alternativas para resolver este problema de coordinación.

La primera opción consiste de cambiar los ajustes de los disyuntores (tabla 1). Es la alternativa más viable económicamente. Sin embargo, tiene la desventaja de que el ajuste de fallas a tierra del disyuntor DS206H ya está en su máximo. Esta condición aumenta la corriente de desbalance, pero los disyuntores individuales de cada alimentador se encargan de cualquier anomalía. Finalmente los disyuntores de 20A y 60A despejan la falla antes que el disyuntor de 800A (fig. 3, Apéndice 1).

Tabla 1. Ajustes recomendados para los disyuntores

Disyuntor	Tamaño armazón	Tamaño "sensor"	Tiempo largo (s)		Tiempo corto (s)			Fallas a tierra		
			arranque	retraso	arranque	retraso	i <sup>2</sup> t/ft	arranque	retraso	i <sup>2</sup> t/ft
DS206H	800 A	800 A	1	10s	4	.3	flat	K	.3	Pt
DS632	3200 A	2400 A	1	2s	3	.5	flat	C	.5	Pt



La segunda opción consiste en reemplazar el disyuntor de 60A por uno de igual magnitud pero con la opción de un relé de protección de falla a tierra integrado. Esto conlleva una inversión económica más alta que en el caso anterior y, además, cambiar los ajustes de los disyuntores existentes (fig. 4, Apéndice 1). La tabla 2 muestra los ajustes recomendados.

Tabla 2. Ajustes recomendados para la segunda opción

Disyuntor	Tamaño almazón	Tamaño "sensor"	Tiempo largo (s)		Tiempo corto (s)			Fallas a tierra		
			arranque	retraso	arranque	retraso	$i^2t$ /ft	arranque	retraso	$i^2t$ /ft
DS206H	800 A	800 A	1	10s	4	.3	flat	A	.3	Pt
DS632	3200 A	2400 A	1	2s	3	.5	flat	A	.5	Pt
60GFR	100 A	60 A	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	60A	.15	-

En este caso el disyuntor que despeja la falla será el de 60 amp., dejando desenergizado el panel de iluminación el cual alimenta. La tabla 3 muestra una leyenda con los términos usados en las tablas 1 y 2.

Tabla 3. Leyenda

Disyuntor	A	C	K	Corriente de arranque en amperios ("pickup number x sensor value")	
DS206H	200A	280A	800A	1 X 800 = 800 A (LTD)	4 X 800 = 3,200 A (STD)
DS632	600A	1120A	1200A	1 X 2400 = 2400 A (LTD)	3 X 2,400 = 7,200A (STD)

("Flat - less inverse curve, I<sup>2</sup>t - most inverse curve, LTD -long time delay, STD - time delay")

Recomendamos estas opciones debido a que el diseño original no se presta para mejores opciones. Reemplazar los disyuntores actuales equivale a una inversión muy costosa para la compañía.

### Estudio económico

La tabla 4 presenta los datos usados en la evaluación económica del estudio.

Tabla 4. Datos para la evaluación económica

Descripción de los costos	Cantidad
Producto/kg terminado	12,000
Proceso del producto/HR.	40,000
Recalibración y prueba (\$/disyuntor)	640
Instalación de un disyuntor	480
Disyuntor de 60A con relé de tierra integrado	3,200

### Condiciones del proceso

1. Como mencionamos anteriormente el vapor producido por la caldera se usa para calentar el producto durante el proceso y secado del producto en su etapa final.
2. El tiempo que tarda la caldera en obtener o restablecer la temperatura del vapor necesaria para el proceso y secado del producto es una hora.
3. Cada despacho del producto final equivale a 12 kilogramos.

### Análisis

La tabla 5 presenta el análisis del impacto económico para el primer caso cuando una falla en el sistema eléctrico afecta la caldera. En este caso no hay vapor disponible para el producto en la etapa del proceso. En el segundo caso no hay vapor disponible para la etapa del secado del producto final.

Tabla 5. Impacto económico de la pérdida de la caldera

Etapa del producto	Pérdida por falta de vapor	Inversión		10% Gastos generales ("Overhead")		Inversión total	
		ALT. #1	ALT. #2	ALT. #1	ALT. #2	ALT. #1	ALT. #2
Proceso	\$40,000.00	\$1,280.00	\$5,600.00	\$128.00	\$560.00	\$1,408.00	\$6,160.00
Secado*	\$36,000.00	\$1,280.00	\$5,600.00	\$128.00	\$560.00	\$1,408.00	\$6,160.00

\* Para secado presumimos que se arruinó solamente una cuarta parte del despacho total, es decir, 3 kilogramos.



La tabla 5 también nos permite observar claramente que cualquiera de las dos alternativas son viables económicamente al comparar éstas con las pérdidas que tendrá la compañía por falta de vapor, si no se corrige la causa del problema.

### Conclusiones

En la presentación de este trabajo le hemos aplicado a un caso real los conocimientos adquiridos en los cursos de Corto Circuito y Sistemas de Protección. Además tuvimos la oportunidad de aprender el sistema eléctrico de una planta química y cómo se distribuye.

La razón principal al seleccionar este proyecto fue la aplicación práctica del problema y sus consecuencias. La consecuencia principal es que a la barra en la cual surgió la falla se conecta el panel de control de la caldera. El sistema de protección no posee una coordinación adecuada, por lo cual los disyuntores no despejaron la falla eficazmente. Como consecuencia, el proceso del producto se interrumpe y causa atrasos y pérdidas a la compañía. Luego del análisis del sistema es necesario implementar las recomendaciones de nuestro estudio.

Entendemos que este proyecto es de gran utilidad para mejorar la coordinación del sistema de protección de IPR Pharmaceuticals evitando así interrupciones no deseadas y, por supuesto, pérdidas económicas a la compañía. Finalmente recomendamos un estudio detallado de los demás alimentadores del sistema eléctrico de IPR para garantizar la confiabilidad del sistema de protección de estos alimentadores.



Apéndice 1

Curvas características de los disyuntores para:

Ajustes para fallas trifásicas

Ajustes para fallas a tierra

Ajustes para fallas a tierra de acuerdo a la opción 1

Ajustes para fallas a tierra, reemplazando disyuntor de 60A, de acuerdo a la opción 2.

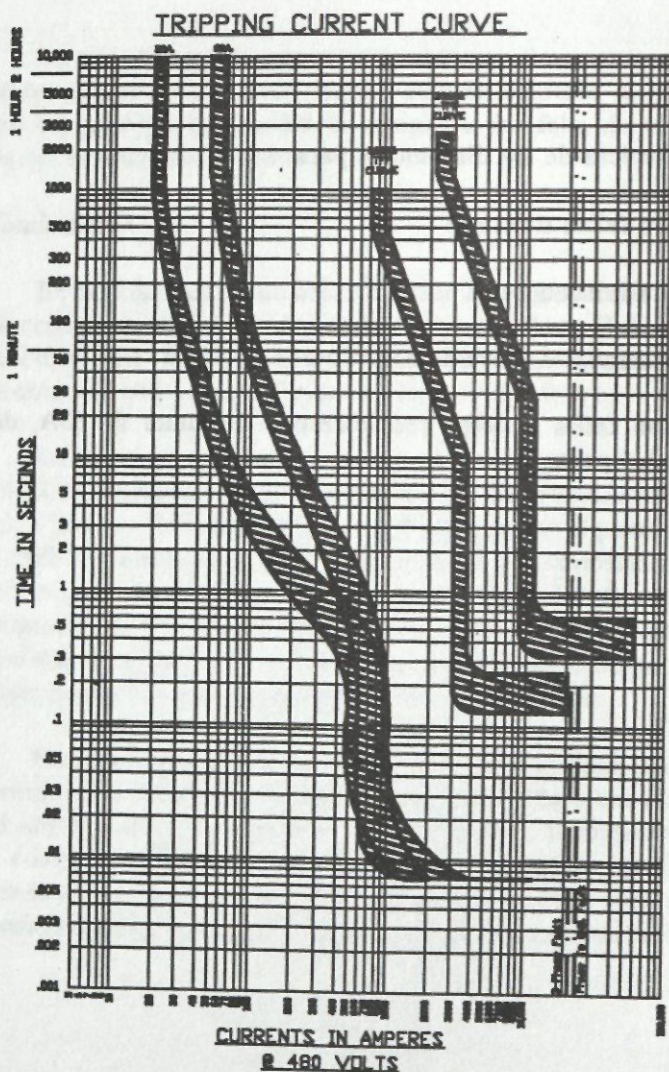


Figura 1. Curvas características de los disyuntores con ajustes para fallas trifásicas



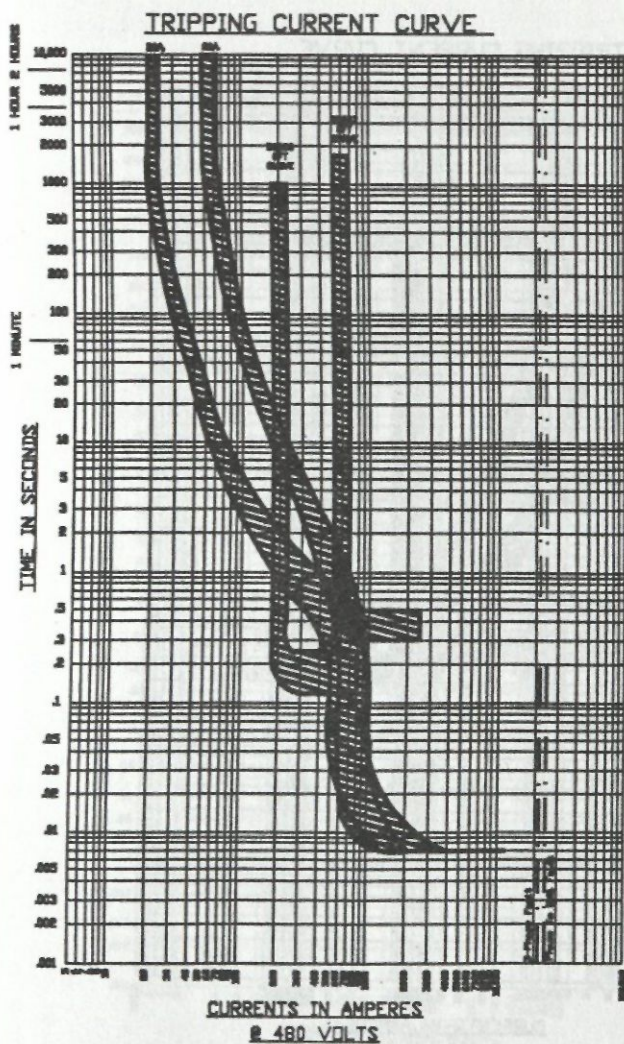


Figura 2. Curvas características de los disyuntores con ajustes para fallas a tierra



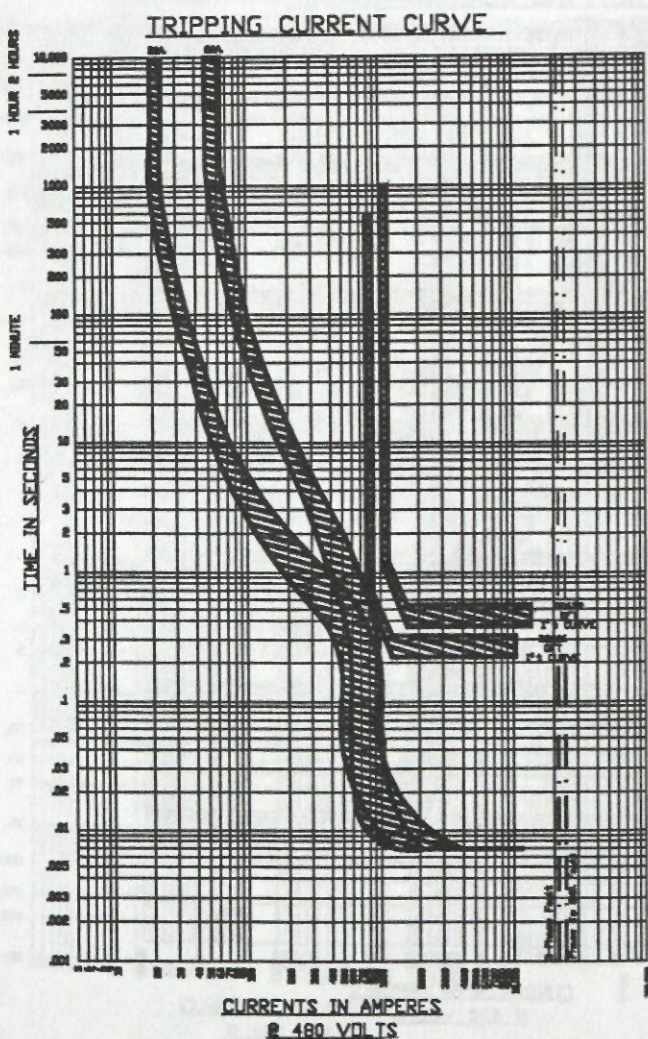


Figura 3. Curvas características de los disyuntores con nuevos ajustes para fallas a tierra

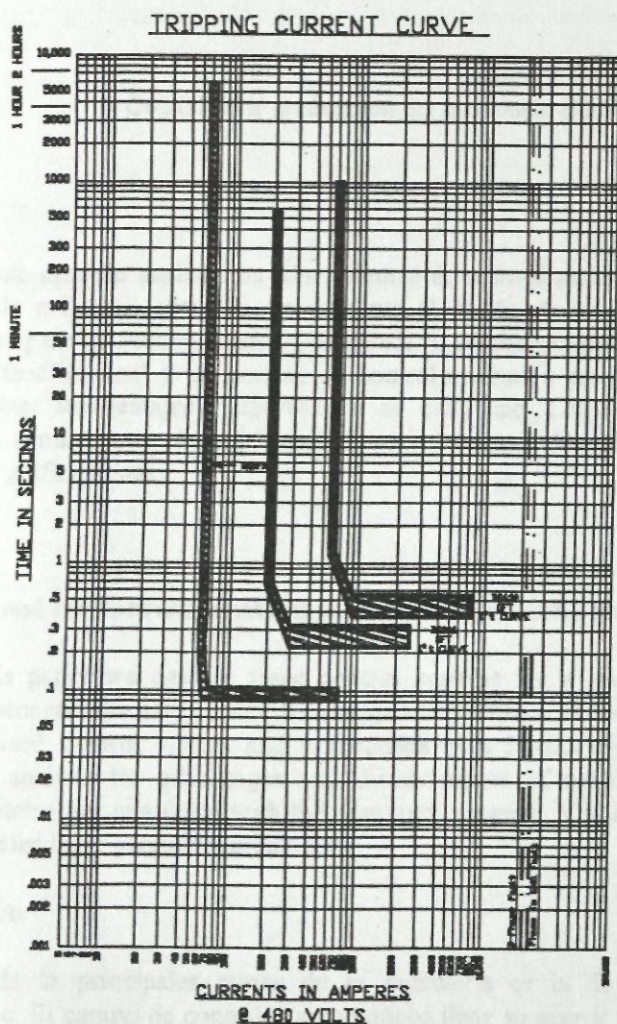


Figura 4. Curvas características de los disyuntores con nuevos ajustes para fallas a tierra, reemplazando disyuntor 60A.