

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE  
CON CURVAS DE TIEMPO NO CONVENCIONALES EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES

---

**TESIS**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

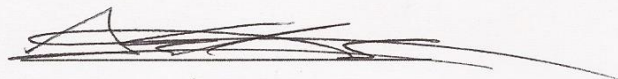
**PRESENTA**  
**Oscar Arreola Soria**

**San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México**  
**2014**

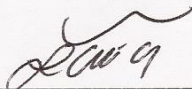
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis COORDINACIÓN DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE CON CURVAS DE TIEMPO NO CONVENCIONALES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES realizada por el M.C. Oscar Arreola Soria que sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica.

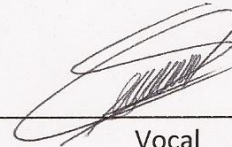
El Comité de Tesis



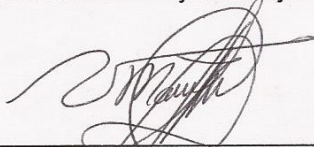
Asesor  
Dr. Arturo Conde Enríquez



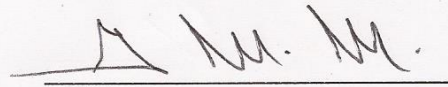
Secretario  
Dr. Luis Alonso Trujillo Guajardo



Vocal  
Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez



Vocal  
Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos



Vocal  
Dr. Gerardo Maximiliano Méndez

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L., Julio del 2014

## *Agradecimiento*

*Con mucho cariño dedico esta Tesis  
A mi esposa María del Socorro*

*Y a mis hijos Brenda Marlen, Oscar Manuel y Pamela Socorro.*

*Y también a mis hijos políticos Pedro Noé, Carmen Edith y Gabriel*

*Agradezco a mis padres Juan y María Concepción*

*Por su amor y su enseñanza que me dieron, para ser un hijo de bien,  
responsable y tenaz en las metas alcanzada en mi vida y en mi familia*

*Agradezco a mis nietos Franco, Pedro Israel, Natalia, Isabella y Bebe. Porque  
me dan ánimo, alegría y amor*

*Agradezco a mis hermanos y hermanas por su apoyo, su amor y su vida que me  
han compartido. Los quiero a cada uno*

*Héctor, María Concepción, Ma. Lucinda, José Ramón, Juan, María Luisa,  
María Librada, María Romana Guadalupe, Jesús Salvador y Alma Yesenia*

*Agradezco y le reconozco el apoyo incondicional al  
Dr. Arturo Conde Enríquez que me brindó para  
Llevar a cabo este trabajo de Tesis de Doctorado.*

*También les agradezco sus comentarios y sugerencias que dieron a esta tesis y  
que fueron muy oportunos para mejorar y concluir este trabajo.*

*A los doctores:*

*Arturo Conde Enríquez*

*Luis Alonso Trujillo Guajardo*

*Francisco Sergio Sellschopp Sánchez*

*Víctor Manuel Cabrera Morelos*

*Gerardo Maximiliano Méndez*

## RESUMEN

### **Coordinación de relevadores de sobrecorriente con curvas de tiempo no convencionales en sistemas eléctricos industriales**

Publicación No. \_\_\_\_\_

Oscar Arreola Soria, Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014

Profesor Asesor: Dr. Arturo Conde Enríquez

Las condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia industriales exigen el cumplimiento de coordinación con curvas de daño diversas y coordinación con otros dispositivos como relevadores de sobrecorriente, fusibles e interruptores de bajo voltaje, con la minimización de los tiempos de operación para reducir los esfuerzos de equipos primarios y la reducción de las depresiones de voltaje de la red eléctrica. Se han presentado diversos trabajos que proponen el uso de canales de comunicación entre relevadores para mejorar el desempeño de la protección, se requiere por tanto una computadora central de proceso para al fin. El uso de curvas conformadas por segmentos independientes de curvas de tiempo ha sido propuesto. Otra solución es incorporar esquemas de protección con nuevos modelos de curvas no convencionales de relevadores de sobrecorriente que cumplan adecuadamente los requerimientos de coordinación. Una alternativa para mejorar el desempeño de la protección es mediante alteraciones en los modelos actuales de relevadores a fin de modificar su respuesta a corrientes de falla y mejorar la coordinación. Esta alternativa es la presentada en este trabajo.

Este documento presenta una formulación generalizada de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso que puede generar curvas de tiempo inverso no convencionales. El modelo propuesto considera la posición del dial variable como una función de la corriente de falla; con la interacción de dos dinámicas, la representación

digital del movimiento del disco de inducción (como los relevadores convencionales) y el dial de tiempo variable resulta en curvas de tiempo inverso que pueden ser diseñadas para cualquier problema de coordinación de protección en particular. El relevador propuesto no requiere más datos de entrada que el relevador convencional, sólo la corriente de falla en la ubicación del relevador es requerida. Así se obtiene una variante económica y simple de implementar.

El modelo propuesto tiene una mayor flexibilidad para la creación de curvas de tiempo que los modelos de relevadores convencionales debido a que permite la incorporación de funciones independientes de la palanca de tiempo que dará como resultado en diversas curvas de tiempo dependiendo de los criterios de aplicación definidos. Las nuevas curvas de tiempo no convencionales son diseñadas para cada problema específico de coordinación, resultando en la reducción de tiempo de operación, esfuerzos mecánicos y efectos térmicos, disminuyendo la calidad de voltaje e incrementando el tiempo de vida útil del equipo primario de la red eléctrica.

# Índice

---

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
<b>Capítulo 1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Consideraciones.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Estado del arte.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Propuesta .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Estructura de la tesis.....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 2 Desarrollo tecnológico de los relevadores de sobrecorriente.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Introducción. ....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Relevador Electromecánico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 Modelo general de dispositivos electromecánicos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2 Relevador sobrecorriente de atracción electromagnética .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Relevador sobrecorriente de disco de inducción .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 Relevador Electrónico de Estado Sólido.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.1 Unidades lógicas de estado sólido. ....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.2 Relevador de sobrecorriente estático. ....</b>	<b>35</b>
<b>2.4 Relevador Digital .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.1 Señales para procesamiento en el relevador. ....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.2 Filtro pasabajas (filtro anti-aliasing) .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.3 Muestreo.....</b>	<b>45</b>
<b>2.4.4 Convertidor Analógico/Digital (ADC).....</b>	<b>46</b>
<b>2.4.5 Filtro digital.....</b>	<b>47</b>
<b>2.4.6 Memoria.....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.7 Modelo del relevador digital.....</b>	<b>50</b>

## Capítulo 3 Limitaciones de la protección de sobrecorriente convencional en redes de distribución ..... 52

3.1	Fundamentos de la operación del relevador de sobrecorriente 51.....	52
3.2	Coordinación en sistemas industriales.....	55
3.3	Limitaciones de funcionamiento .....	61
3.4	Oportunidad de mejorar .....	69
3.4.1	<i>Protección en acometida de una planta industrial.....</i>	69
3.4.2	<i>Protección en la curva de daño de los transformadores categoría II y III. ....</i>	70
3.4.3	<i>Protección en ramal transformador-cable-carga. ....</i>	80
3.4.4	<i>Protección de motores de inducción usando diferentes características y ajustes del relevador.....</i>	82
3.4.5	<i>Coordinación entre curvas seccionadas de interruptor automático y relevador. ..</i>	84
3.4.6	<i>Coordinación cuando se incrementa la capacidad de carga y generación.....</i>	90
3.4.7	<i>Limitación del relevador electromecánico y mejora con relevador estático. ....</i>	92
3.4.8	<i>Mejora de coordinación convencional y característica estándar. ....</i>	94

## Capítulo 4 Diseño de un nuevo algoritmo al relevador de sobrecorriente..... 98

4.1	Introducción .....	98
4.2	Modelo matemático de la característica .....	99
4.2.1	<i>Modelo definido por el estándar IEEE Std C37.112-1996.....</i>	100
4.2.2	<i>La característica de reposición .....</i>	102
4.2.3	<i>Curvas formadas por saturación.....</i>	103
4.2.4	<i>Definición de las asíntotas de la curva inversa tiempo-corriente.....</i>	106
4.3	Modelo propuesto con curva característica flexible no convencional .....	110
4.3.1	<i>Evaluación de diferentes formas del numerador <math>A(I)</math> y selección de la nueva función del relevador.....</i>	116
4.4	Metodología para el diseño de un nuevo algoritmo al relevador de sobrecorriente .....	117
4.4.1	<i>Función no convencional del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso. ....</i>	118
4.4.2	<i>Estimación de los parámetros de la forma propuesta <math>T(I)</math>.....</i>	120



4.5	Evaluación de la curva característica no convencional .....	122
4.5.1	<i>Ajuste de curvas</i> .....	122
4.5.2	<i>Criterio de evaluación sobre desviación de ajuste de curvas</i> .....	124
4.6	Condición de operación del relevador de sobrecorriente .....	129
4.6.1	<i>Evaluación de la operación con palanca constante</i> .....	130
4.6.2	<i>Evaluación de la operación con palanca variable</i> .....	132
<b>Capítulo 5 Coordinación de reveladores propuestos en redes industriales .....</b>		<b>133</b>
5.1	Introducción. ....	133
5.2	Caso I. Protección de transformador categoría III. ....	134
5.2.1	<i>Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares</i> . ....	135
5.2.2	<i>Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales</i> .....	139
5.2.3	<i>Resultados de la coordinación de protecciones con curvas no convencionales</i> ...	140
5.3	Caso II. Alimentador principal transformador-cable-carga .....	143
5.3.1	<i>Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares</i> . ....	144
5.3.2	<i>Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales</i> .....	145
5.3.3	<i>Resultados de la coordinación de protecciones con curvas no convencionales</i> ...	146
5.4	Caso III. Protección en la acometida de un sistema eléctrico industrial .....	151
5.4.1	<i>Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares</i> . ....	151
5.4.2	<i>Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales</i> .....	155
5.4.3	<i>Resultados de la coordinación de protecciones con curva no convencional</i> .....	157
<b>Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones .....</b>		<b>160</b>
6.1	Introducción .....	160
6.2	Conclusiones.....	161
6.3	Aportaciones de los resultados alcanzados .....	162
REFERENCIAS .....		164
APÉNDICE A.....		171
APÉNDICE B.....		188

## ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Descripción	Pág.
2-1	Relevador electromecánico.	11
2-2	(a) Diferentes tipos de los relés estáticos y (b) placa de circuito del relevador estático.	12
2-3	Relevador digital comercial.	13
2-4	Tendencia de los relevadores de protección	14
2-5	Modelo de sistema electromecánico excitado simple.	16
2-6	Relevador de corriente tipo-mazo electromagnético.	23
2-7	Relevador sobrecorriente electromagnético con armadura pivoteada.	25
2-8	Conexiones relevador sobrecorriente con transformador de corriente.	26
2-9	Elemento de inducción polo sombreado.	29
2-10	Vista explorada de una unidad relevador disco de inducción con núcleo magnético tipo-C.	30
2-11	Relevador disco de inducción para características tiempo inverso e instantánea.	31
2-12	Elemento representativo de la acción de funcionamiento del relevador de inducción.	32
2-13	Fuerza actuante total a partir de la suma de dos señales resultantes de la interacción $\phi$ e $i$ .	33
2-14	Ejemplos de símbolos lógicos.	34
2-15	Ejemplo de tabla lógica	35
2-16	Representación en bloques de las etapas de un relevador de sobrecorriente estático	35
2-17	Circuito de entrada y rectificación.	36
2-18	Relevador de sobrecorriente de característica $I t = K$ .	37
2-19	Gráfica de operación del relevador de figura 2-18	37
2-20	Circuito para característica de tiempo inverso con detector de nivel y relevador de disparo.	38

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
2-21	Métodos para lograr características muy inversas.	39
2-22	Detector de falla simple.	40
2-23	Detector de falla de relación reposición/arranque unitaria.	41
2-24	Relevador electrónico de estado sólido Siemens 7SK88: (a) Vista frontal y (b) diagrama de bloques	42
2-25	Característica de corte de frecuencia del filtro ideal pasabajas	43
2-26	Magnitud de respuesta de filtro Butterworth para valores $\omega_c=1$ y valores N de 1 a 10.	44
2-27	Gráfica normalizada de respuesta a la función escalón unitario del filtro Butterworth con $\omega=1$ valores de N de 1 a 10, donde N es orden del filtro	44
2-28	Comparación de la señal continua y la señal cuantizada.	45
2-29	Ejemplo de aliasing causado por muestreo.	46
2-30	Filtro coseno para 8 muestras por ciclo.	48
2-31	Elementos funcionales de un relevador digital de protección.	49
2-32	Modelo del relevador microprocesador.	51
3-1	Gráfica de coordinación donde hay más de cuatro curvas y se presentan cruces.	54
3-2	(a) Sistema radial y (b) su ajuste de coordinación protección primaria-respaldo	59 60
3-3	Relación de corriente máxima de corto circuito y tiempo de respaldo en curva inversa	61
3-4	Preservación de selectividad usando unidades instantáneas	62
3-5	Característica tiempo mínimo definido inverso	63
3-6	Intervalo de ajuste tiempo-sobrecorriente	64
3-7	Influencia sobre el diseño de redes (a) cortas y gordas; (b) largas y flacas	65
3-8	Impacto en configuración del sistema.	66
3-9	Efecto de ajustes	67
3-10	Curvas que no deben de cruzar	68
3-11	Coordinación ideal de ajuste de curvas	68

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
3-12	a) Sistema eléctrico de distribución de 11000 voltios y b) gráfica de coordinación dispositivos de sobrecorriente; fusibles y relevadores con características estándar, en la acometida el nivelado es con diferentes tipos de curvas.	70
3-13	Curvas protección a través de falla del transformadores: (a) Para categoría I fallas frecuentes o infrecuentes y para fallas infrecuentes con categorías II y III. (b) Para fallas frecuentes con transformadores	74
3-14	Guía da para determinadas zonas de incidencia potencial infrecuente y frecuente	75
3-15	Protección de sobrecorriente para un transformador categoría II sirviendo un sistema secundario de falla-infrecuente	78
3-16	Revisión de fallas a través de banco transformador delta-estrella (corrientes se muestran en por unidad): (a) fallas trifásicas; (b) fallas fase-a-fase; (c) fallas fase-a-tierra, donde $X_1=X_2=X_0$ .	79
3-17	Coordinación y ajuste de curvas para un motor de 1750-hp	81
3-18	Características de protección y corriente de arranque del motor	84
3-19	Esquema lazo con cinco-restauradores	86
3-20	Coordinación de fase --.Ajuste convencional	88
3-21	Coordinación de fase – Ajuste mejorado	89
3-22	Bombas Booster: parte de la red de una planta industrial de aceite y sus curvas de coordinación.	90
3-23	Coordinación de curvas con sistema modificado.	92
3-24	Comparación de características de relevador RT-80 y equipo adjunto	93
3-25	Estructura de red típica y gráficos: comportamiento de a) corriente de falla trifásica, b) tiempo de disparo definido efectivo, c) tiempo de disparo inverso efectivo	96
3-26	(a) Nueva Característica de disparo no estándar en comparación con (b) la característica de disparo IEC-estándar IDTM.	97

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
4-1	Relevador sobrecorriente tipo disco de inducción inverso.	101
4-2	Flujo normalizado en relevadores extremadamente inverso, muy inverso y moderadamente inverso.	104
4-3	Comparación de características extremada, muy y moderada inversa.	105
4-4	Ajuste relevador de sobrecorriente a) cambio de tap en la bobina y b) desplazamiento de la característica de tiempo inverso.	107
4-5	Ajuste de dial a) disco de inducción con su palanca de tiempo, b) grafica de una curva inversa con diferente número de dial.	108
4-6	Curva de tiempo inverso con diferente corriente pickup y tiempo mínimo definido	109
4-7	Curva de tiempo inverso con margen de corriente de falla estándar normalizada	109
4-8	Esquema análogo de un relevador electromecánico del relevador propuesto.	110
4-9	Versión digital del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso	112
4-10	Versión digital del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso con función variable de tiempo dial	114
4-11	Diferentes formas de $A(I)$ numerador de la ecuación característica RSC	117
4-12	Metodología de diseño del nuevo algoritmo relevador de sobrecorriente RSC.	118
4-13	Clasificación de algoritmos de ajustes de curvas.	124
4-14	Comportamiento dinámico del modelo propuesto en comparación del modelo convencional. a) Curvas de tiempo, b) Salida del integrador con señales constantes $T_{op}=0.49$ s, c) Salida del integrador con señales dinámicas $T_{op} 0.58$ s.	125
4-15	Estimación de parámetros ajuste de curva tipo exponencial y curva de por ciento de error	127
4-16	Estimación de coeficientes ajuste de curva tipo polinomial y curva de error.	128

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
4-17	Grafica de la condición de operación de un relevador con palanca fija.	131
4-18	Grafica de cumplimiento de operación de $\Delta G_K$ acumulador- $A(I)$ palanca variable y tiempo de operación	132
5-1	Curva límite de capacidad falla-a través de transformador sumergido-liquido categoría II con fallas frecuentes.	135
5-2	Coordinación de curva límite de capacidad de falla-a través de transformador categoría III y IV con característica inversa tiempo-corriente del alimentador TOC	136
5-3	Protección de transformador categoría III de falla trifásica secundario.	137
5-4	Subestación de potencia con transformador categoría III delta-estrella aterrizada de 115/12.5 kV y sus valores de corto circuito	138
5-5	Grafica de coordinación del transformador de potencia categoría III con protección de sobrecorriente por el lado primario y secundario.	138
5-6	Comparación de tiempo en las características de protección de sobrecorriente estándar y no estándar de un transformador categoría III.	140
5-7	Curva de ajuste de un relevador de sobrecorriente no estándar para la protección de transformador de potencia categoría III.	141
5-8	Sistema de potencia industrial a tensión 13800/4160 voltios.	143
5-9	Grafica de coordinación de dispositivos de protección con curvas características estándares del sistema eléctrico industrial de figura 5-8.	144
5-10	Gráfica de ajuste curva PD-2nc del transformador y por ciento de error de ajuste	146
5-11	Coordinación con la función propuesta curva flexible en los relevadores PD-5, PD-2 y PD-3.	147
5-12	(a) Sistema eléctrico de distribución de 11000 voltios,	152
5-12	(b) gráfica de coordinación dispositivos de sobrecorriente: fusibles y relevadores con características estándares, y en la acometida el nivelado es con curvas de diferente tipo.	153

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
5-13	Gráfica de coordinación entre la fuente de suministro (Utility source) y el SDEI, donde se puede mejorar la coordinación.	154
5-14	Gráfica de ajuste de curva y por ciento de error de ajuste	156
5-15	Relevador R4 cambio de característica usando función exponencial en el numerador $Ae^{-I/C}$ para mejorar ajuste río abajo R3 y río arriba con R5.	157

## ÍNDICE DE TABLAS

No.	Descripción	Pág
3.1	Valores de ajuste típicos de relevadores y fusible en la protección de sobrecorriente	57
3.2	Valores de ajuste típicos de relevador de sobrecorriente en la protección de motor	58
3.3	Valores de ajuste típicos de relevador de sobrecorriente en la protección de transformador	58
3.4	ANSI/IEEE Estándar capacidad sobrecorriente del transformador modificado en 1982 <sup>a</sup>	72
3.5	ANSI/IEEE Estándar categorías sobrecarga – falla a través del transformador	73
3.6	<i>Comparación de valores <math>I^2t</math> para dispositivos de protección nuevo multifunción y convencional</i>	89
4.1	Constantes y exponentes para características Estándares*	106
4.2	Generar los valores de las funciones del relevador digital de los k = 1, 2, ... m puntos.	119
5.1	Categoría de transformadores de potencia	134
5.2	Resultados de la coordinación de los relevadores estándares (PD-05 y PD-04) y no estándar (PD-04Ne) en el transformador categoría III, reduciendo tiempo y esfuerzo.	142
5.3	Comparación de datos curva convencional (estándar) y no-convencional (flexible) en el relevador PD-05 del motor, presentando el tiempo reducido y el factor de esfuerzo reducido.	148
5.4	Comparación de valores de datos curva convencional (estándar) y propuesta no-convencional de los relevadores PD-03 vs PD-3nc	149
5.5	Comparación de valores de datos curva convencional (estándar) y propuesta no-convencional de los relevadores PD-02 vs PD-02nc	150
5.6	Comparación de valores de datos de curva estándar y curva no convencional (flexible) en el relevador R4 <sub>PRINCI</sub> , introduciendo el tiempo reducido y el factor de energía ahorrada	159



# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1.1 Consideraciones

Los estudios de análisis de sistemas eléctricos de potencia son requeridos para evaluar el desempeño de los sistemas de potencia. El objetivo es definir las condiciones operativas para que el sistema sea seguro, fiable, fácil de operar, fácil de mantener y a un costo razonable. Los estudios de flujo de carga, corto-circuito, y coordinación de protección deberán ser llevados a cabo durante la fase de desarrollo del diagrama unifilar para plantas nuevas o para expansiones/modificaciones de un sistema de potencia existente [1].

La continuidad de servicio es uno de los índices más importantes en los sistemas eléctricos, lo cual permite que las cargas estén operando sin afectar sus procesos. Los sistemas industriales son de naturaleza altamente dinámica de acuerdo con las fluctuaciones de la demanda durante el día, cambios discretos de demanda por la entrada-salida de procesos, cambios frecuentes de configuración topológica y altos valores transitorios de corriente; también se tienen variaciones en las corrientes de falla debido a los cambios de configuración topológica, la ubicación y los cambios de la impedancia de falla. Por consiguiente, sus protecciones deben ser capaces de atender esa dinámica del sistema.

La protección de sobrecorriente es el principio más simple de protección, el más utilizado y a la vez el más difícil de aplicar en los sistemas eléctricos industriales. Los requerimientos básicos de la protección de sobrecorriente son: a) la detección de fallas en todo el sistema protegido; b) la operación selectiva ante cualquier falla; y c) la operación

segura ante condiciones de sobrecarga tanto en equipos primarios como en cables del sistema eléctrico.

La coordinación de los relevadores de sobrecorriente se realiza garantizando un intervalo de tiempo CTI (*coordination time interval*) de 0.3 a 0.4 s, entre los tiempos de operación de la protección primaria y de respaldo para una falla trifásica máxima inmediata al relevador primario. La divergencia de las curvas de tiempo garantiza la coordinación tanto en corto-circuito mínimo como en sobrecarga; sin embargo, el intervalo de tiempo entre las dos protecciones puede ser muy alto, provocando tiempos de liberación de falla elevados afectando el desgaste térmico del equipo primario e incrementando la duración de los sags de voltaje.

En las protecciones convencionales de sobrecorriente puede existir un compromiso en la discriminación entre una condición de corto circuito mínima y una condición de carga máxima, ya que estos valores de corriente pueden ser comparables. Así, la protección debe ajustarse por encima de la corriente de carga máxima pudiendo ser insensible a fallas mínimas, que al no ser eliminadas pueden agravarse e involucrar otras fases o elementos del sistema. Este criterio de ajuste reduce el alcance de la protección e incrementa el tiempo de operación ante condiciones de carga inferiores a la máxima, que es el estado operativo más frecuente. Estas condiciones degradan el desempeño de la protección de sobrecorriente.

## **1.2 Estado del arte**

La protección de sobrecorriente prevé una rápida operación en alta corriente y lenta operación en baja corriente, como la corriente de falla está en función de la localización de la falla, la coordinación con otros dispositivos de sobrecorriente es posible. Este comportamiento es característico de los relevadores de sobrecorriente, y ha sido demostrado que es apropiado para la protección de sistemas eléctricos en lo cual la

operación sobre los valores nominales es frecuente y temporal. Esta situación no es tan conveniente cuando ocurre en protección de respaldo; debido a la naturaleza de la protección de sobrecorriente, resultando tiempos de operación largos, forzando al sistema a tolerar corrientes no-permisibles, resultando en esfuerzos térmicos y mecánicos que deberían ser minimizados [2].

La creciente capacidad de carga en los sistemas eléctricos requiere que los ajustes de arranque de los relevadores durante un estado operacional de baja demanda sea más sensible. La corriente de corto-circuito tiene un crecimiento limitado por la falta de inversión en nuevas estaciones de generación y/o por la reconfiguración del sistema eléctrico en topologías menos malladas con la intención de reducir los niveles de corto circuito, evitando el reemplazo de interruptores y otros equipos primarios. Sin embargo, la corriente de carga está sujeta a la dinámica del desarrollo industrial y comercial crecimiento de la población e incremento de consumo eléctrico. Estos factores requieren que la protección sea ajustada en escenarios de bajos niveles de corto circuito y altos valores de corriente de carga, por tanto la sensibilidad de los relevadores durante condiciones de baja demanda puede ser comprometida; además el tiempo de operación resultante es directamente proporcional a los incrementos de la corriente de arranque. La presencia de generación distribuida (DG) y fuentes no convencionales en redes de bajo voltaje podría resultar en un cambio de la respuesta de falla [3, 4]. Los tiempos de operación de los relevadores de sobrecorriente (primario y respaldo) pueden ser excesivos por la diversidad topológica de la red.

La aplicación de relevadores de sobrecorriente en redes de distribución ha sido reportada en [5]. Varios métodos son propuestos para resolver las limitaciones funcionales de relevador sobrecorriente. El uso de relevadores basados en corrientes diferenciales de fase a fase es propuesto en [6]. La información de señales de corriente distorsionadas es utilizada para compensar el efecto de saturación de los TCs [7]. Un relevador direccional de sobrecorriente basado sobre ANN es propuesto en [8].

Componentes simétricas son usadas para mejorar la selectividad en [9]. Y por último, una metodología basada en señales de voltaje traslapadas para mejorar sensibilidad de protección en sistemas de distribución radiales es presentada en [10].

Hay propuestas interesantes que contemplan el uso de canales de comunicación para modificar los ajustes de los relevadores en tiempo real para redes de bajo voltaje [11, 12]. Sin embargo, en redes radiales con una o dos fuentes, tales sistemas de comunicación o otros principios de protección implican un costo económico elevado por el número significativo de redes radiales en sistemas de potencia.

La evaluación del desempeño de un relevador de sobrecorriente está en función de su capacidad de detectar fallas dentro de su zona de protección. Sin embargo la señal de corriente es la única variable eléctrica medida, la cual es sensible a la condición de operación del sistema y de la conexión en el punto de falla; por lo tanto, la determinación de la ubicación de la falla es difícil ya que su zona de protección es dinámica y muy sensible a las condiciones de operación del sistema eléctrico.

En los demás principios de protección tal como el diferencial y piloto su característica es constante e insensible al estado operativo de la red eléctrica, únicamente el relevador de distancia presenta una dinámica limitada debido a la polarización. Es por esa razón que el análisis *post mortem* de la operación de un relevador de sobrecorriente es complicado debido a que no se conoce el tiempo en que la protección debería operar ya que este depende de la dinámica de la corriente de falla. Es una práctica común realizar una reconstrucción de la operación del relevador inyectándole los registros de eventos a un relevador similar en condiciones de laboratorio para validar el tiempo de operación de la protección.

Para establecer la coordinación de la protección, se deben considerar los escenarios operativos críticos de la red eléctrica en [13]; el objetivo principal de este enfoque es la protección de equipos primarios, para lo cual se establece la coordinación para la máxima

corriente de cortocircuito (fase y tierra). Métodos para reducir los esfuerzos en el equipo primario mediante cambios en la forma de la curva de tiempo y en la optimización del proceso de coordinación se presentan en [14], [15], [16], [17]. Además, las curvas de tiempo se pueden intersectar durante el proceso de coordinación, es posible determinar el punto de intersección en [18]. Sin embargo, debido a la diversidad de las curvas de tiempo del relevador de protección de sobrecorriente y las curvas de daño de los equipos eléctricos primarios, los tiempos resultantes del proceso de coordinación permiten corrientes de falla hasta de varios segundos.

En la literatura se han propuesto diferentes soluciones que buscan minimizar la duración de la corriente de falla que fluye a través de los equipos eléctricos primarios [19]. Un relevador de sobrecorriente que modifica su curva de tiempo como soporte de la segunda zona de operación de un relevador de distancia se ha propuesto en [20]. Un relevador con una curva de tiempo universal que permite la coordinación con una amplia variedad de curvas de tiempo de relevadores de sobrecorriente de diferentes tecnologías se ha propuesto en [21]. Por último, un modelo de relevadores de sobrecorriente que facilita la selección de las curvas utilizando una combinación de base de datos y algoritmos de ajustes de curvas basados en modelos polinomiales se presenta en [22].

### **1.3 Propuesta**

Se propone desarrollar un algoritmo en un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso para reducir los tiempos de operación con la finalidad de evitar daños mayores en el elemento fallado y su propagación a otros elementos del sistema eléctrico de potencia mediante modificaciones en el diseño del relevador a fin de reducir sus tiempos de operación para corrientes de falla no máximas. Un corto-circuito es una condición de emergencia del sistema en donde puede resultar dañado el equipo primario fallado e incrementar el desgaste térmico-mecánico de los demás equipos que no participan directamente en el fenómeno transitorio.

## **Hipótesis**

Las condiciones de operación de las redes industriales actuales resultan en una degradación de la operación del sistema de protección; condiciones de sobrecarga temporales, la alta diversidad de equipo eléctrico y la elevada dinámica en la operación de la red; provocan que los tiempos de liberación de las fallas eléctricas sean altos, provocando desgastes térmicos-mecánicos al equipo eléctrico de la red.

Si se tiene una adecuada coordinación y ajustes correctos de la protección de sobrecorriente en los circuitos de las redes industriales, se podrá tener un mejor desempeño y confiabilidad en su operación.

El diseño de una nueva característica de operación tiempo-corriente en el relevador, que sea más flexible en su forma con respecto a la estándar; puede resolver algunas limitaciones que tiene la protección en los sistemas eléctricos industriales, y se podrían mejorar su tiempo de operación e incrementar la sensibilidad; por lo tanto, también aumentar la vida útil de los componentes del sistema industrial y mejorar la calidad de voltaje de la red eléctrica.

### **Objetivos del Proyecto:**

#### **General**

- Obtener una protección de sobrecorriente con mejor desempeño para poder ayudar a que no sucedan operaciones inadecuadas de la coordinación de protecciones y mejorar la sensibilidad; también disminuir el tiempo de operación de la protección y así reducir los esfuerzos mecánicos-térmicos (los costos de operación del sistema debido a pérdidas eléctricas), y en la calidad de voltaje del sistema.

## **Específicos**

- Análisis de los aspectos de diseño de un relevador de sobrecorriente con nuevas curvas de tiempo para mejorar la coordinación y los tiempos de operación de la protección.
- Desarrollo de una formulación generalizada de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso con capacidad de generar curvas de operación no convencionales.
- Diseño de una palanca de tiempo variable en función de la corriente de falla y la interacción de dos dinámicas, la del disco de inducción y la palanca de tiempo, las cuales resultan en curvas de tiempo que pueden ser diseñadas específicamente para el problema de coordinación analizado.
- Obtener un modelo del relevador de sobrecorriente por medio de funciones, teniendo mayor flexibilidad para la generación de curvas de tiempo que los modelos convencionales y con incrementos reducidos en las exigencias computacionales facilitando su implementación.
- Formular la incorporación de funciones independientes de la palanca de tiempo que resultarán en curvas de tiempo diversas dependiendo de los criterios de aplicación que se definan.
- Aplicar la metodología para coordinación de relevadores de sobrecorriente, fusibles, circuitos interruptores y otros dispositivos de protección. Evaluar el método de coordinación con los relevadores de sobrecorriente de nuevas curvas de tiempo-inverso no convencionales y estándar en la reducción de los tiempos de operación, analizar su impacto en la disminución de esfuerzos mecánico-térmicos de los equipos primarios y su impacto en la calidad de voltaje.

## 1.4 Estructura de la tesis

La estructura de la tesis “Coordinación de relevadores de sobrecorriente con curvas de tiempo no convencionales en sistemas eléctricos industriales” inicia con la evolución del relevador de sobrecorriente; sus problemas y limitaciones al llevar a cabo la protección bajo diferentes situaciones en los sistemas eléctricos industriales. Se propone un nuevo modelo de relevador de sobrecorriente, se realiza el análisis de aplicación en diferentes casos de sistemas eléctricos industriales obteniendo algunas mejoras de su acción de protección; por último se exponen las conclusiones de los resultados obtenidos de este proyecto de tesis y trabajos futuros por desarrollar relacionados con esta tesis.

En el capítulo 1 se presenta la problemática principal del relevador de sobrecorriente y el estado del arte de los trabajos de investigación que anteceden a este desarrollo de la tesis, dedicados a modelos y diseños del relevador de sobrecorriente. Se presentan también el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis y se desglosa su estructura.

En el capítulo 2 se describen las diferentes generaciones del relevador de sobrecorriente: electromecánico, estático y digital. Se presenta una modelación matemática básica de un sistema electromecánico y el principio de funcionamiento de diferentes tipos de relevadores electromecánicos; también el principio de operación y sus etapas del relevador estático de sobrecorriente; por último la estructura de funcionamiento del relevador digital.

En el capítulo 3 se estudian e investigan las limitaciones de coordinación del relevador de sobrecorriente usando curvas características estándar, tales como: criterios de coordinación en sistemas industriales, ajustes de parámetros, características estándares híbridas, curvas diferentes en la acometida de una planta industrial, protección de la curva de daño de los transformadores categoría II y III, protección en el ramal



transformador-cable-carga, protección en motores de inducción grandes con diferentes ajustes y características de relevador multifunción.

En el capítulo 4 se presenta el modelo IEEE std. C37.112-1996 del relevador sobrecorriente de inducción como antecedente para el modelo propuesto con curva característica flexible no convencional; se describe la metodología de diseño de nuevo algoritmo y se evalúan las diferentes funciones propuestas para la ampliación de la dinámica de operación del relevador de sobrecorriente. También se presenta la estimación de los parámetros, la prueba de ajuste y los criterios de evaluación de la curva característica no convencional.

En el capítulo 5 se presenta una introducción sobre cómo mejorar la coordinación de la protección de sobrecorriente, según lo planteado en los capítulos anteriores, se estudian tres casos de aplicación del nuevo modelo de relevador de sobrecorriente con curvas no convencionales:

- Caso I. Protección de transformador categoría III
- Caso II. Alimentador principal transformador-cable-carga
- Caso III. Protección en la acometida de una planta industrial

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de los resultados de la tesis, así como las contribuciones y las sugerencias de trabajos futuros en este campo de las protecciones eléctricas.

# Capítulo 2

## Desarrollo tecnológico de los relevadores de sobrecorriente

---

### 2.1 Introducción.

Los primeros dispositivos automáticos que se emplearon para aislar fallas eléctricas en los sistemas de potencia fueron los fusibles. Los fusibles tienen un amplio uso por su bajo costo, tienen la desventaja de que deben ser reemplazados después de que ha ocurrido una falla. El interruptor de potencia automático resuelve el inconveniente de reemplazo de los fusibles, utiliza una bobina de disparo que opera por sobrecarga o baja tensión. Durante el desarrollo de las protecciones eléctricas para circuitos de mediana y alta tensión la tendencia fue incorporar relevadores de protección independientes del interruptor. La primera generación de relevadores era electromecánica y actuaban operando sus contactos sobre la bobina del interruptor de potencia cuando se presentaba una falla [23].

Los relevadores electromecánicos son dispositivos de conversión de energía con entrada de señal eléctrica y señal de salida mecánica, teniendo características muy propias como son: baja capacidad, movimientos cortos y rápidos, alta eficiencia; por lo tanto presentan un porcentaje de error muy bajo en sus respuestas. De igual forma este principio se encuentran en muchos otros dispositivos electromecánicos muy pequeños y de alta sensibilidad.

Su principio de funcionamiento está basado en los fenómenos de la atracción e inducción electromagnética. Algunos de estos relevadores consisten de un disco de inducción, un núcleo electromagnético, un muelle en forma de espiral, una bobina

secundaria o de sombra y de una unidad de sello indicadora **en figura 2-1**. Los relevadores electromecánicos de sobrecorriente con disco de inducción funcionan bajo el mismo principio de operación del motor de inducción; opera girando su disco cuando circula por la bobina del relevador una corriente que supera un valor máximo de corriente o punto de arranque [23], [25]. Al girar el disco de inducción, este cierra un contacto que inicia el disparo de un interruptor de potencia o acciona una alarma.

El tiempo en que tarda el disco de inducción en cerrar el contacto de disparo es inversamente proporcional a la corriente que circula por la bobina del relevador; este tiempo está controlado por el ángulo de desplazamiento del disco que se ajusta a través de una palanca de tiempo (dial), los diferentes ajustes del dial generan la familia de curvas de tiempo. La corriente de arranque se obtiene mediante derivaciones (taps) de la bobina, para variar el mismo número de amperio-vueltas necesarias para mover el disco.



**Figura 2-1.** Relevador electromecánico.

La aplicación del relevador electrónico de estado sólido se inició en la década de 1960. El término "*Estático*" se aplica a este relevador aun cuando no tiene partes móviles, esto no es estrictamente el caso, debido a que los contactos de salida están todavía generalmente atraídos por relevadores de inducción. Sin embargo, el término se refiere a

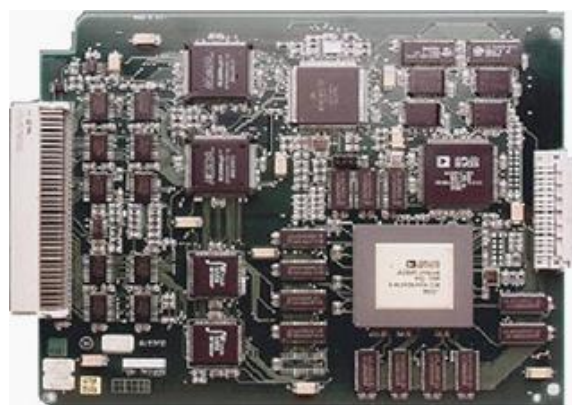
la ausencia de partes móviles, su diseño se basa en la utilización de dispositivos analógicos electrónicos en lugar de las bobinas y el imán para crear la característica del relevador.

Las primeras versiones utilizaron dispositivos discretos tales como transistores y diodos en conjunción con resistencias, condensadores, inductores, etc.; pero el avance en la electrónica permitió el funcionamiento lineal, la implementación de funciones lógicas y en versiones posteriores, el desarrollo de los circuitos digitales integrados para el procesamiento de señales. Mientras los circuitos básicos fueron comunes a un número de relevadores, el gabinete se sigue esencialmente restringido a una *función de protección única*, mientras que para funciones múltiples requieren varios *hardware* adecuadamente interconectados. La programación del usuario se limita a las funciones básicas de ajuste de curvas características de relevador.

Por tanto, puede ser visto en términos simples como un reemplazo análogo electrónico de relevadores electromecánicos, con algo más de flexibilidad en la configuración y algunos ahorros en los requisitos de espacio. En algunos casos, el *burden* del relevador se reduce dependiendo de los requisitos de salida del transformador de corriente (TC). En la **figura 2-2(a)** se muestran ejemplos de relevadores estáticos simples y complejos, mientras que en la **figura 2-2(b)** se muestra la placa de circuito de un relevador estático simple [24].



(a)



(b)

**Figura 2-2.** (a) Diferentes tipos de los relés estáticos y (b) placa de circuito del relevador estático.

Los relevadores de protección de estado sólido han quedado fuera de uso progresivamente desde el surgimiento de los relevadores digitales. Los relevadores de estado sólido no tienen la misma flexibilidad de los relevadores digitales, y su exactitud y rango dinámico están limitados por sus componentes electrónicos [25].

Los relevadores de protección con microprocesadores, también llamados relevadores digitales o relevadores numéricos en **figura 2-3**, son ampliamente aceptados en el ámbito de la protección de sistemas eléctricos de potencia. Esta tendencia está motivada por el hecho de que los relevadores digitales son dispositivos con múltiples capacidades que realizan funciones de protección, medición, control y supervisión. Los relevadores digitales han revolucionado el enfoque tradicional de las protecciones eléctricas debido a que al estar implantada su lógica de protección en *software*, son pocos los límites en la innovación de nuevas técnicas de protección. Desde el origen de los relevadores digitales muchos algoritmos han sido formulados y probados; algunos de estos algoritmos permiten tener relevadores digitales adaptativos que se ajustan automáticamente a las condiciones prevalecientes de un sistema de potencia, o relevadores digitales que hacen uso de redes neuronales y de inteligencia artificial para identificar fallas con mayor eficacia [26]. Como resultado, se tienen mejores soluciones para los problemas que se plantean los ingenieros de protecciones eléctricas.



**Figura 2-3.** Relevador digital comercial.

También, la capacidad de comunicación de los relevadores digitales hace posible que interactúen con otros relevadores, o con estaciones de monitoreo y control en forma local o remota. Por lo tanto, se tiene una supervisión continua y una mayor cantidad de información de un sistema de potencia al usar relevadores digitales, su inserción en redes inteligentes *Smart-grid* y en aplicaciones de tiempo real son posibles. Estas y otras características de los relevadores de protección digitales los convierten en una pieza fundamental dentro de la estructura de automatización y control de los sistemas de potencia.

El principio de funcionamiento de cada tecnología de relevadores no ha sufrido cambios sustanciales. Así tanto los relevadores digitales como los de estado sólido emulan la operación de un relevador electromecánico. Históricamente, la evolución de los relevadores de protección se ha dado como se muestra en la **figura 2-4**, [25].

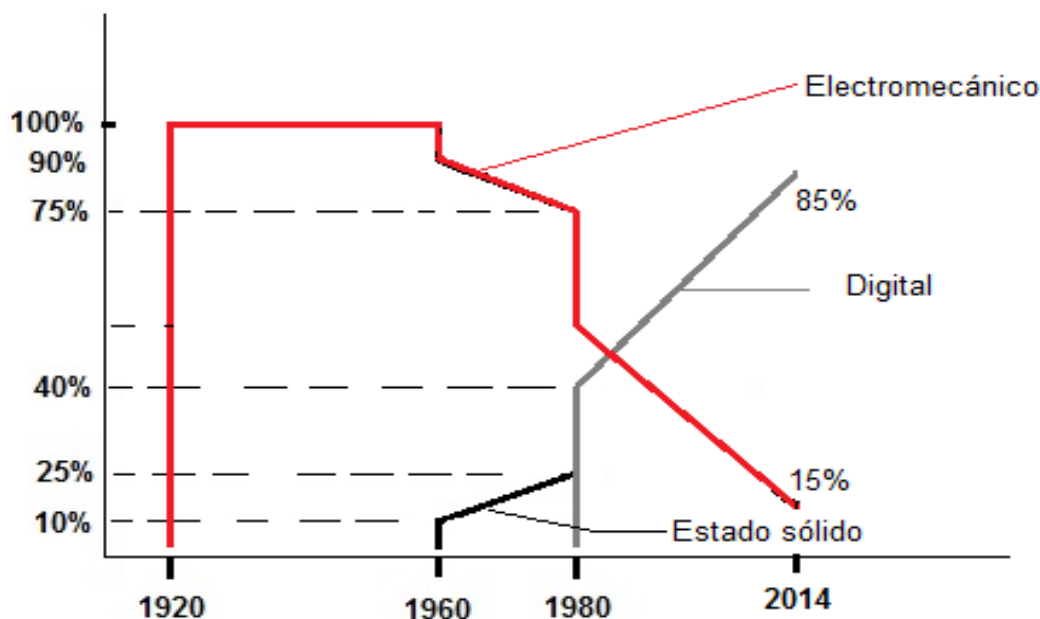


Figura 2-4. Tendencia de los relevadores de protección

## 2.2 Relevador Electromecánico

### 2.2.1 Modelo general de dispositivos electromecánicos

#### *Ecuaciones Dinámicas*

Tenemos expresiones derivadas de los pares producidos en dispositivos electromecánicos por la conversión de energía en función de las variables eléctricas y el desplazamiento angular mecánico. Estas expresiones son derivadas para un sistema conservativo de conversión de la energía; cualquier pérdida es asignada a las fuentes eléctricas y mecánicas.

El modelo de un sistema conservativo simple de conservación de la energía es mostrado en la **figura 2-5**, muestra las porciones básicas, los detalles de cual podría variar desde un sistema hasta otro sistema. El sistema mostrado consiste de tres partes: una porción eléctrica, el medio de conversión de energía, y la porción mecánica externa [27].

La porción eléctrica es representada por la ecuación eléctrica.

$$v_o = iR + \frac{d\lambda}{dt}$$

Si los enlaces de flujo  $\lambda$  pueden ser expresados como  $\lambda = L(x)i$ ,

$$v_o = iR + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$

El término  $L(x)\frac{di}{dt}$  es el voltaje inductancia-propia; el término  $i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$  es la velocidad-voltaje el cual es responsable para la transferencia de energía entre el sistema eléctrico externo y el medio de conversión de energía.

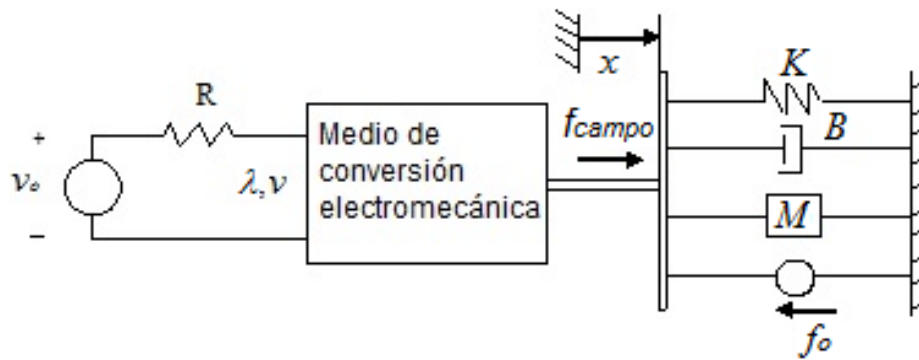


Figura 2-5. Modelo de sistema electromecánico excitado simple.

La porción mecánica muestra los símbolos para el resorte  $K$ , amortiguador  $B$ , y masa  $M$ . Estos símbolos relacionan fuerza o par a desplazamiento, a velocidad, y a aceleración; tanto lineal como angular.

La fuerza  $f_K$  y par  $\tau_K$  en el resorte, respectivamente:

$$f_K = K(x - x_o) \quad \tau_K = K_f(\theta - \theta_o)$$

Donde  $x$  es el desplazamiento lineal y  $\theta$  es el desplazamiento rotacional

La fuerza  $f_B$  y par  $\tau_B$  en el amortiguador:

$$f_B = B \frac{dx}{dt} \quad \tau_B = \beta \frac{d\theta}{dt}$$

La fuerza  $f_M$  y par  $\tau_J$  en la masa:

$$f_M = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad \tau_J = J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Donde  $x_o$  es el valor de  $x$  con el resorte no estirado y la fuerza mecánica aplicada  $f_o = 0$ .  $K_f$  es el momento de fuerza,  $\beta$  momento angular y  $J$  momento de inercia.

La ecuación balance-fuerza para la porción mecánica es:

$$f_{fld} = f_K + f_D + f_M + f_o \quad (2.1)$$



$$f_{fld} = K(x - x_o) + B \frac{dx}{dt} + M \frac{d^2x}{dt^2} + f_o \quad (2.2)$$

Las ecuaciones de las porciones eléctrica y mecánica son:

$$V_o = iR + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.3)$$

$$-f_o(t) = K(x - x_o) + B \frac{dx}{dt} + M \frac{d^2x}{dt^2} - f_{fld}(x, i) \quad (2.4)$$

Las funciones  $L(x)$  y  $f_{fld}(x, i)$  dependen de la construcción del medio de conversión.

#### *Técnicas Analíticas.*

Hemos descrito un dispositivo relativamente sencillo, el dispositivo tiene un par de terminales eléctricas y una terminal mecánica, lo cual es usualmente construido para movimiento incremental.

#### *a. Propósitos para el análisis*

El dispositivo descrito anteriormente es usado con movimiento burdo, tal como relevadores y solenoides, donde este dispositivo opera bajo condiciones *on* y *off* o encendido y apagado.

El análisis sobre este dispositivo es llevado a cabo para determinar la fuerza o par como una función del desplazamiento y relacionado con la fuente eléctrica. Tales cálculos son hechos alrededor de este dispositivo. Así como los detalles del movimiento que son requeridos, después de energizado el dispositivo el desplazamiento queda en función del tiempo, donde la respuesta se obtiene de las ecuaciones diferenciales no lineales (2.3) y (2.4) respectivamente.

Considerando los dispositivos de movimiento-burdo usados con movimientos pequeños, como en transductores de varios tipos; se obtiene la conversión de señales eléctricas en señales mecánicas y viceversa. Las relaciones entre las variables eléctricas y mecánicas son hechas lineales por el diseño de los dispositivos o por el desempeño restringiendo de las señales a un rango lineal. En tales casos las ecuaciones diferenciales son lineales y pueden ser resueltas para respuestas transitorias, respuesta de frecuencia, o presentando el circuito-equivalente como sea requerido.

*b. Movimiento burdo.*

Las ecuaciones diferenciales (2.5) y (2.6) para un dispositivo de una sola excitación que son derivadas de una armadura de atracción electromagnética, donde  $a$  es el recorrido total de la armadura.

$$\frac{1}{2} L' \frac{a \cdot i^2}{(a+x)^2} = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + K(x-l_1) + f_t \quad (2.5)$$

$$v = iR + L' \frac{x}{(a+x)} \frac{di}{dt} + L' \frac{a \cdot i}{(a+x)^2} \frac{dx}{dt} \quad (2.6)$$

Un problema típico usando estas ecuaciones diferenciales es encontrar el recorrido de  $x(t)$  cuando un voltaje prescrito  $v = V$  es aplicado en  $t = 0$ . Un problema incluso más simple es encontrar el tiempo requerido por la armadura al moverse desde su posición  $x(0)$  en  $t = 0$  a un desplazamiento dado  $x = X$  cuando un voltaje  $v = V$  es aplicado en  $t = 0$ . No hay solución general para estas ecuaciones diferenciales; ellas involucran productos de variables  $x$  e  $i$ , sus derivadas y términos no lineales. Ellas pueden ser resueltas con una computadora digital.

En muchos casos el problema movimiento-burdo puede ser simplificado y una solución encontrada por un método relativamente simple. Por ejemplo, cuando el devanado del dispositivo es conectado a la fuente de voltaje con una resistencia relativamente grande, el término dominante  $iR$  sobre el lado mano-derecha de ecuación

(2.6) comparado a el voltaje-transformador  $\frac{di}{dt}$  y el voltaje-velocidad  $\frac{dx}{dt}$ . La corriente  $i$  puede ser asumida igual a  $\frac{V}{R}$  y directamente insertada en ecuación (2.5). La misma suposición puede ser hecha cuando el devanado es manejado desde un transistor, lo cual actúa como una fuente de corriente para el devanado.

Con la suposición que  $i = \frac{V}{R}$  dos casos pueden ser resueltos fácilmente. Primer caso, cuando en el dispositivo electromecánico su movimiento dinámico es gobernado por amortiguamiento más que inercia; por ejemplo, relevadores tipo sardina provistos de frenos o amortiguadores que retrasan el movimiento, o dispositivos propiamente teniendo baja inercia.

En tales casos, la ecuación diferencial (2.5) es reducida a

$$f(x) = \frac{1}{2} L' \left( \frac{V}{R} \right)^2 \frac{a}{(a+x)^2} - K(x-l_1) = B \frac{dx}{dt} \quad (2.7)$$

En el lado izquierda de la ecuación (2.7)  $f(x)$ , es la diferencia entre la fuerza de origen eléctrico y la fuerza del resorte en el dispositivo de **figura 2-5**. La velocidad en cualquier valor de  $x$  es simplemente  $\frac{dx}{dt} = \frac{f(x)}{B}$ ; el tiempo  $t$  para buscar  $x = X$  es dado por

$$t = \int_0^X \left[ \frac{B}{f(x)} \right] dx \quad (2.8)$$

La operación de ecuación (2.8) puede ser llevado a cabo analíticamente o gráficamente.

El segundo caso, puede ser resuelto fácilmente por manejo de corriente constante del devanado es donde el movimiento dinámico es gobernado por la inercia más que el amortiguamiento. Donde el amortiguamiento adicional no es introducido, la inercia usualmente gobierna el movimiento. En tal caso, la ecuación diferencial (2.5) reduce a:

$$f(x) = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.9)$$

La aceleración en cualquier valor de  $x$  es  $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{f(x)}{M}$ , y la velocidad  $v(x)$  en cualquier valor de  $x$  es obtenida.

$$f'(x) = \frac{M}{2} \frac{d(dx/dt)^2}{dx} \quad (2.10)$$

$$v(x) = \frac{dx}{dt} = \left[ \frac{2}{M} \int_0^x f(x) dx \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

La operación de ecuación (2.11) puede ser llevada a cabo analíticamente o gráficamente para encontrar  $v(x)$  y también encontrar el tiempo  $t$  para alcanzar cualquier valor de  $x$ .

### c. Linealización

Dispositivos los cuales son caracterizados por ecuaciones diferenciales no lineales tales como (2.5) y (2.6). Producirán respuestas no lineales a señales de entrada cuando se usan transductores. Para obtener un comportamiento lineal, tales dispositivos podrían ser restringidos a recorridos pequeños de desplazamiento y cantidades eléctricas cerca de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es determinada por vía  $f_{mm}$  producida por la corriente o por un accionado magnético permanente contra un resorte o por un par de devanados produciendo  $f_{mms}$  cuyas fuerzas son canceladas en el punto de equilibrio. El punto de equilibrio puede ser estable, la armadura siguiendo un pequeño disturbio podría

retornar a la posición de equilibrio. La condición de equilibrio es determinada con el conjunto de ecuaciones (2.5) y (2.6) derivadas con respecto al tiempo e igualando a cero; así tendremos:

$$\frac{1}{2} \frac{L'(aI_0^2)}{(a+x)^2} = k(X_0 - l_1) + f_{t0} \quad (2.12)$$

$$V_0 = I_0 R \quad (2.13)$$

Donde  $i = I_0$  y  $x = X_0$  en equilibrio. La operación incremental puede ser descrita expresando las variables como  $i = I_0 + i_1$  y  $x = X_0 + x_1$ , cancelando los productos de incremento como están de segundo orden. Ecuaciones (2.5) y (2.6). Así viene.

$$\frac{1}{2} L' \frac{a(I_0 + i_1)^2}{(a + x_0 + x_1)^2} = M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + B \frac{dx_1}{dt} + k(x_0 + x_1 - l_1) + f_{t0} + f_1 \quad (2.14)$$

$$V_0 + v_1 = (I_0 + i_1)R + L' \left( \frac{x_0 + x_1}{a + x_0 + x_1} \right) \frac{di_1}{dt} + L' \left( \frac{a(I_0 + i_1)}{(a + x_0 + x_1)^2} \right) \frac{dx_1}{dt} \quad (2.15)$$

Los términos en equilibrio se cancelan dejando un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales en términos justos de las variables incrementales de primer orden como:

$$\frac{L'aI_0 i_1}{(a + x_0 + x_1)^2} = M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + B \frac{dx_1}{dt} + K' x_1 + f_1 \quad (2.16)$$

$$v_1 = i_1 R + \frac{L'(x_0)}{(a + x_0)} \frac{di_1}{dt} + \frac{L'aI_0}{(a + x_0 + x_1)^2} \frac{dx_1}{dt} \quad (2.17)$$

La constante  $K'$  representa el efecto de la fuerza del resorte y la componente de fuerza del campo magnético proporcional a  $x_1$ . Las ecuaciones pueden ser escritas en forma más compacta en términos de la inductancia propia  $L_0$  en el punto de equilibrio y un coeficiente  $K_0$  de conversión de energía como,

$$K_0 i_1 = M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + B \frac{dx_1}{dt} + K' x_1 + f_1 \quad (2.18)$$

$$v_1 = i_1 R + L_0 \frac{di_1}{dt} + K_0 \frac{dx_1}{dt} \quad (2.19)$$

Donde:

$$K_0 = \frac{L' a I_0}{(a + x_0 + x_1)^2}$$

$$L_0 = \frac{L'(x_0)}{(a + x_0)}$$

### 2.2.2 Relevador sobrecorriente de atracción electromagnética

El principio de funcionamiento del relevador se examina en dos formas muy simples del relevador de sobrecorriente electromagnético; el tipo-mazo y el de armadura pivotada, lo cual sirve para responder a la magnitud de la corriente que fluye en el circuito la cual es controlada.

#### *Relevador de corriente tipo-mazo electromagnético*

En el circuito eléctrico dado en **figura 2-6a** se presenta la estructura funcional del relevador de sobrecorriente instantáneo [28]. La **figura 2-6a** muestra las conexiones de un relevador de corriente tipo-mazo cuando una corriente  $I$  fluye a través de la bobina relevador (3), una fuerza electromagnético  $F_e$  estirando la armadura (2) y actúa en el entrehierro de trabajo  $\delta$ .

Para relevadores electromagnéticos d-c y a-c, en el cual la curva de la armadura no causa un cambio en el valor de la corriente, la fuerza  $F_e$  puede ser determinada por la formula (2.20),

$$F_e = \frac{1}{2} I^2 \omega^2 \frac{dG}{d\delta} \quad (2.20)$$

Donde.

$I$  – corriente fluyendo en bobina del relevador

$\omega$  – número de vueltas en bobina del relevador

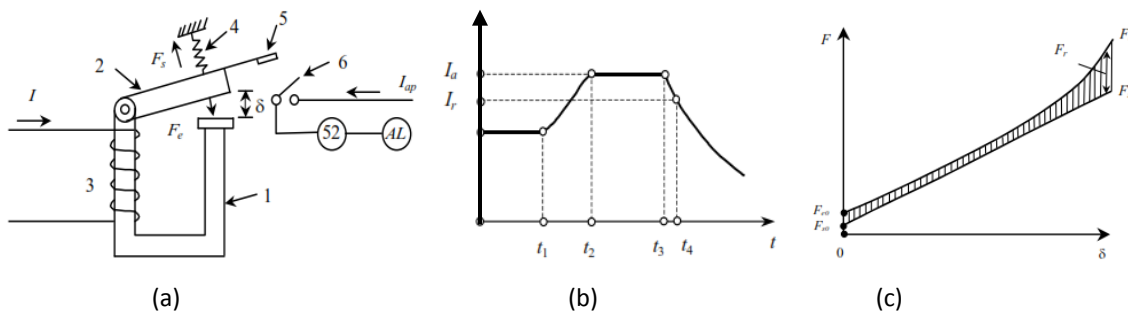
$\frac{dG}{d\delta}$  – razón de cambio de la permeancia aire-entrehierro con respecto al viaje de la armadura.

Como puede ser visto desde el diagrama de la conexión esquemática del relevador, el sintonizado de la armadura del relevador está bajo el efecto de la fuerza electromagnética  $F_e$  y es contrarrestado por la fuerza  $F_s$  resistente del resorte (4). Es casi evidente que si  $F_e \geq F_s$  como es mostrado en **figura 2-6c** el relevador arrancará, por consiguiente la armadura (2) girará en el sentido manecillas reloj y hace que el contacto puente (5) cierre el contacto (6). Esto resulta en el disparo del interruptor 52, o el cierre del circuito lámpara señalización AL.

La **figura 2-6b** se representa el cambio en la magnitud de corriente que circula por la bobina del relevador. La corriente se incrementa (intervalo  $t_1 - t_2$ ) hasta alcanzar el valor de corriente  $I_a$  (corriente de operación) que provoca el cierre de contactos del relevador. Si después del cierre de contactos la corriente disminuye su valor en ( $t_3$ ), cuando alcance el valor  $I_r$  (corriente de reposición) en el instante ( $t_4$ ), la armadura retornará a su posición inicial, abrirá los circuitos de disparo del interruptor (52) y de señalización (AL). La corriente de operación del relevador está comprendida entre el intervalo  $t_2 - t_3$  en la **figura 2-6b**.

Valores comunes de la razón de reposición ( $K_d$ ) son de 0.7 a 0.95:

$$K_d = \frac{I_r}{I_a} \quad (2.21)$$



**Figura 2-6.** Relevador de corriente tipo-mazo electromagnético: (a) diagrama conexión 1- núcleo magnético; 2- armadura; 3- bobina relevador; 4- resorte; 5- contacto puente moviendo; 6- contacto relevador normalmente-abierto; (b) curva de corriente en la bobina relevador; (c) gráfica de fuerza actuante  $F_e$  y resistente  $F_s$ .

### *Relevador sobrecorriente electromagnético con armadura pivoteada*

Una representación esquemática de un relevador electromagnético es dada en **figura 2-7**. Este relevador consiste de un núcleo magnético (1), sobre los polos finales dos devanados idénticos son arreglados (2), el espacio entre los polos finales de una armadura de acero forma-Z es empotrada (3). Por último es incorporado en el relevador la flecha (4) libre para girar en soporte (10), y sobre el cual es fijada armadura (3); el contacto puente (6) y en un extremo del resorte espiral (5). El otro extremo último es conectado al ajustador de nivel (8), el ajuste es en la escala (9) permite que el par resistente del resorte sea ajustado en proporción al ángulo de deflexión [28].

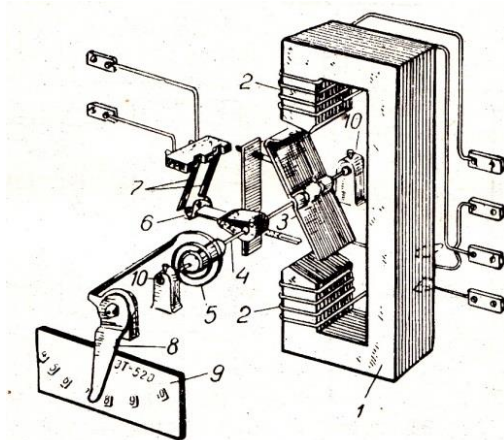
Al circular la corriente  $I_r$  a través de las bobinas del relevador crea un par actuante electromagnético accionando sobre la armadura (3) para dar vuelta en sentido de las manecillas del reloj, donde:

$$T = kI_r^2 \quad (2.22)$$

La rotación de armadura, sin embargo, es restringida por un par resistente desarrollado por el resorte (5). Por consiguiente si en este par del sistema  $T$  excede el par resistente del resorte, el relevador opera, por ejemplo la armadura gira en el sentido del reloj para cerrar contacto puente (6) sobre contacto (7).



Cambiando el nivel de ajustador (8) para el lado-derecho sobre la escala (9) incrementa el par resistente del resorte y así incrementa corriente de arranque (operación). Estos relevadores son construidos así para un ajuste suave de la corriente de operación buscándose con la ayuda de nivel ajuste (8), la posición extremo lado-derecho de lo cual corresponde a una corriente de arranque (operación) dos veces tan grande como esta se obtiene en la posición extremo lado-izquierdo.

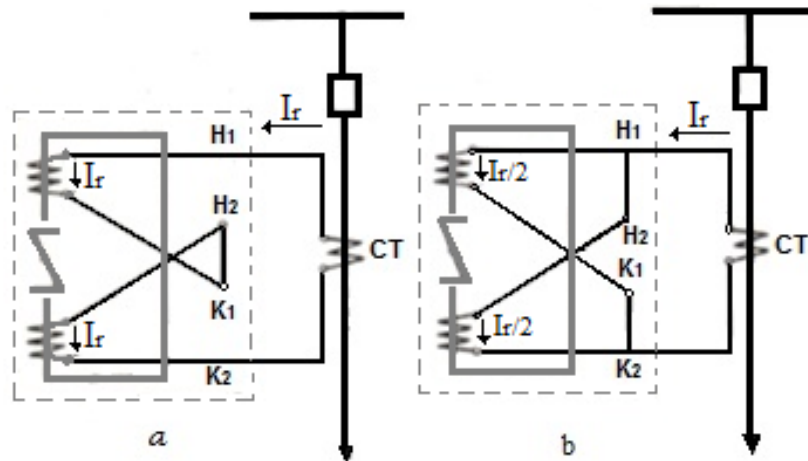


**Figura 2-7.** Relevador sobrecorriente electromagnético con armadura pivoteada. 1.- Núcleo magnético; 2.- devanados; 3.- armadura; 4.- eje relevador; 5.- resorte espiral; 6.- contacto puente móvil; 7.- contacto estacionario; 8.- ajustando corriente-operación; 9.- escala de ajuste; 10.-soporte flecha.

En resumen el ajuste suave de la corriente de arranque de la característica de operación provee un cambio escalón en la corriente de arranque (operación) por medio de conexión serie o paralelo de sus dos bobinas. En **figura 2-8 a** las bobinas del relevador son conectadas en serie y la corriente  $I_r$  de entrada al relevador es pasada a través de las bobinas desde la alimentación del transformador de corriente.

El valor de la corriente de arranque marcada afuera sobre escala (9) corresponde a conexión serie de las bobinas relevador. Si las bobinas son conectadas en paralelo como se muestra en **figura 2-8 b**, solo una mitad de la corriente  $I_r$  fluirá a través de cada bobina, debido a lo cual los valores escala deberían ser multiplicados por 2: por ejemplo, el relevador arrancará a corrientes dos veces más grande. En esta manera, reconectado de

las bobinas, el valor de la corriente de arranque puede ser cambiado al doble. Note la conveniencia en hacer las reconexiones, los cables de conexión de las bobinas intersectan una a otra como se muestra en los diagramas del circuito de **figura 2-8**.



**Figura 2-8.** Conexiones relevador sobrecorriente con transformador de corriente:  
a) Conexión serie de devanados relevador; b) conexión paralelo de devanados relevador.

Estos relevadores son disponibles en varios rangos de ajuste de corriente arranque (operación). El valor de ajuste de corriente máxima en el cual el relevador opera con sus bobinas conectadas en paralelo y el nivel de ajuste en su posición extremo lado-derecho es denotado por el denominador en el número asignado al relevador, un relevador tipo 2.5/10; por ejemplo, permite seleccionar ajuste de corriente de arranque de 2.5 a 10 amperios (2.5 a 5 A con bobinas conectadas en serie, y 5 a 10 A con bobinas en conexión paralelo).

En virtud de su simplicidad de construcción y alta confiabilidad de servicio, los relevadores electromagnéticos han sido extensamente aplicados en esquemas de protección y control automático. Una substancial deficiencia del relevador es la vibración en los contactos durante el flujo de valor de corriente normal a través su devanado y también durante la operación del relevador bajo corriente de falla.

En resumen los relevadores del tipo electromagnético tuvieron un extensivo uso en esquemas de protección y control automático, donde los relevadores son construidos sobre el principio inducción electromagnética, siendo el elemento fundamental de muchos diseños de relevadores tipo inducción.

### **2.2.3 Relevador sobrecorriente de disco de inducción**

#### *Elemento de Inducción Polo-Sombreado.*

Los relevadores de sobrecorriente de disco de inducción con su principio de polo sombreado son ampliamente usados en el sistema eléctrico de potencia, como protección de sobrecorriente de tiempo inverso. En la **figura 2-9 a** se muestran las partes del elemento de inducción polo-sombreado, las cuales son: una armadura magnética (1), en cada punta de polo tiene un anillo sombreado (2) dispuesto para abarcar parte de la sección transversal de la punta del polo; la bobina (3) está ubicada en la armadura; dentro del entrehierro de los polos punta está ubicado un disco de aluminio (4) libre para rotar en su eje (5); en el eje está ubicado un contacto puente (6) que sirve para cerrar los contactos (7) cuando el disco gira, en el otro lado del viaje del disco entre los polos está un magneto permanente (8) [28].

Como es conocido, un electro-magneto con un devanado simple será capaz de producir un par en el disco solamente mientras el disco está atravesado por dos flujos magnéticos corridos ambos en espacio y tiempo.

Con el flujo de corriente a través de devanado (3), un flujo magnético  $\Phi$  es creado. Dividido en dos flujos  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$ , cada uno con su respectiva fase, a través de la bobina-sombreada y sección no sombreada de los polos-núcleo puntas. Desde Fig. 2-9a puede ser visto que los flujos divididos son movidos en el espacio.

En este sistema, por virtud de la presencia de la bobina sombreada, los flujos  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  son también movidos en fase. Esta fase desplazada está representada por un diagrama vectorial **figura 2-9 b**. Para este diagrama el flujo resultante  $\Phi_1$  existiendo desde la sección bobina-sombreada ha sido tomado como el vector de referencia. Flujo  $\Phi_1$  induce en la bobina sombreada una *e.m.f.*  $E_k$  la cual está atrasa del flujo  $\Phi_1$  por 90 grados. La *e.m.f.*  $E_k$ , causa una corriente  $I_k$  para fluir alrededor de bobina sombreada. Esta corriente puede ser asumida a estar en fase con  $E_k$  por razón de la baja inductancia de la bobina sombreada (la última usualmente consiste de un lazo simple de cobre grande sección-transversal). Flujo de corriente  $I_k$  que crea un flujo  $\Phi_k$  el cual incide en el disco. Flujo  $\Phi_1$  puede ser considerado para ser el vector suma de dos flujos  $\Phi_1'$  y  $\Phi_k$ .

$$\Phi_1 = \Phi_1' + \Phi_k \quad (2.23)$$

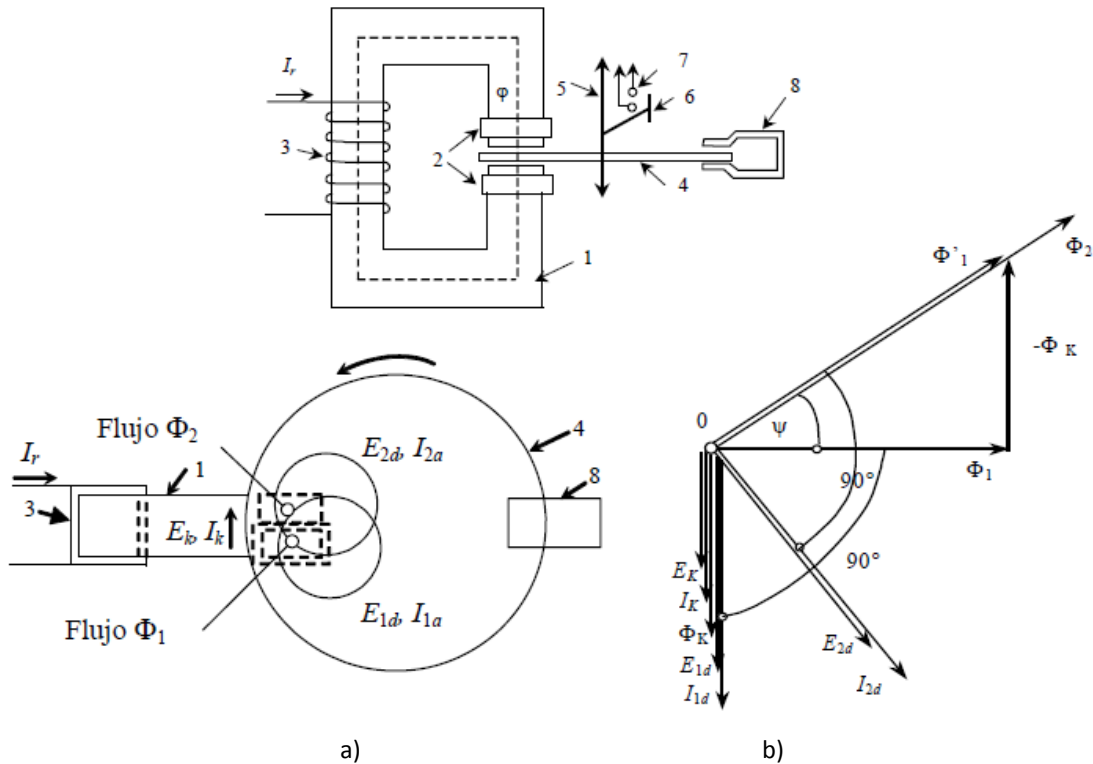
Donde  $\Phi_1'$  - flujo en sección sombreada si la bobina sombreada fue ausente, este flujo coincide en dirección con flujo en sección no sombreada;

$\Phi_k$  - flujo debido a la presencia de bobina sombreada.

Como puede ser visto desde el diagrama vectorial, flujo  $\Phi_1$  y flujo  $\Phi_2$  están en un ángulo  $\psi$  relativo a cada uno, por ejemplo, no coinciden en fase.

Flujo  $\Phi_1$  y flujo  $\Phi_2$ , en el disco atravesado, induce en él las *e.m.f.s*  $E_{1d}$  y  $E_{2d}$  lo cual estando atrás los flujos lo cual ellos inducidos por 90 grados. Estas *e.m.f.s* conducen el flujo de corrientes de Eddy  $I_{1d}$  y  $I_{2d}$ . Flujo  $\Phi_1$  que interactúa con corriente de Eddy  $I_{2d}$ , y flujo  $\Phi_2$  con corriente de Eddy  $I_{1d}$ . Esto resulta en la creación de un par actuante el cual causa que el disco gire, por lo tanto:

$$T = k \Phi_1 \Phi_2 \cos (90^\circ - \psi) = k \Phi_1 \Phi_2 \operatorname{sen} \psi \quad (2.24)$$



**Figura 2-9.** Elemento de inducción polo sombreado: a) Esquema de lado y vista superior: 1.- núcleo magnético; 2.- bobina sombreada; 3.- devanado; 4.- disco; 5.- eje; 6.- contacto puente móvil; 7.- contactos; 8.- magneto permanente; b) diagrama vector.

A la vez en un circuito magnético no saturado los flujos son proporcionales a las corrientes, y ambos flujos  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  son producidos por la misma corriente  $I_r$ , el par actuante sobre el disco puede ser expresado como:

$$T = k I_r^2 \operatorname{sen} \psi \quad (2.25)$$

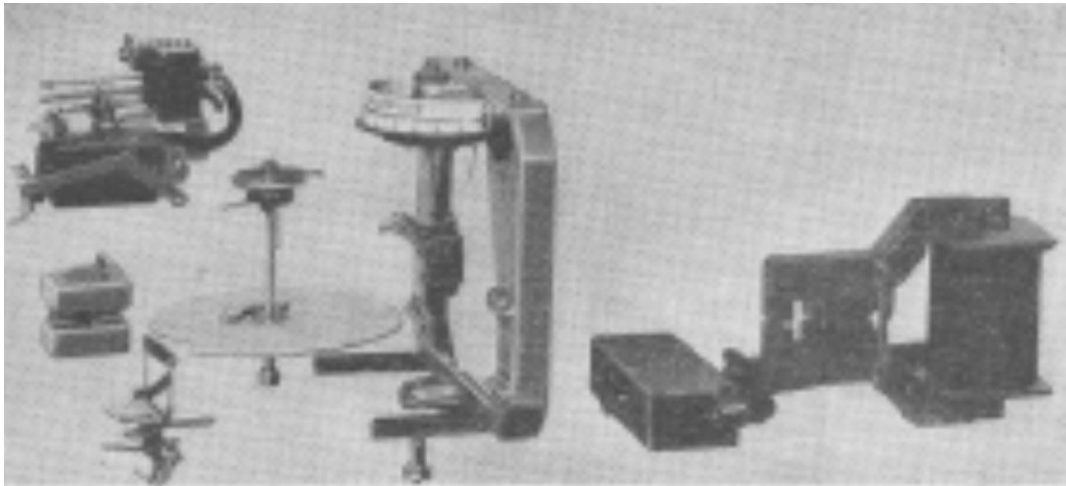
El magneto permanente (8) funciona como un dispositivo amortiguador. Como el disco gira, las corrientes Eddy inducidas en el disco re-actúan con el campo del magneto permanente y crean un par resistente. El último es proporcional a velocidad del disco, lo cual, en la vuelta, es proporcional a la corriente fluyendo en el devanado del relevador.

Sobre el otro lado, la velocidad del disco es proporcional a la corriente fluyendo en la bobina del elemento inducción.

#### *Relevador disco de inducción*

Normalmente el relevador de disco de inducción es semejante a una unidad medidor watt-horas con un par de contactos puente re-emplazados por el disco registrador. Los diseños modernos emplean un magneto de forma-C con polo sombreado como por ejemplo, en **figura 2-10** y tiene tres ventajas principales:

- a) Par más alto por VA de entrada al relevador
- b) La bobina sencilla permite el uso de alambre de diámetro grande
- c) Dos electromagnetos y un magneto amortiguador puede ser montado sobre el mismo disco para la conversión de un relevador diferencial

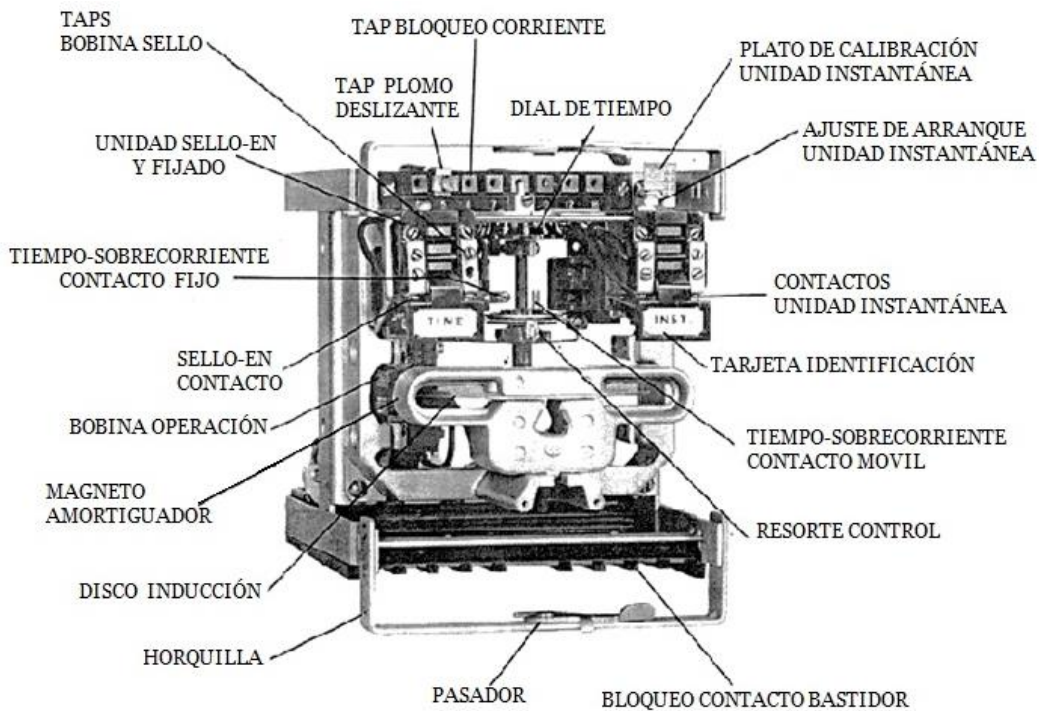


**Figura 2-10.** Vista explorada de una unidad relevador disco de inducción con núcleo magnético tipo-C.

En el lado mano-derecha del disco en **figura 2-11** puede ser visto un magneto permanente Alcomax con fuerza coercitiva alta, el cual es más pequeño y más estable que una magneto acero-cromado. Puede ser montado sobre el lado del armazón como se muestra y permite remover el disco sin perturbar la posición del electro magneto impulsor y por lo tanto la calibración del relevador. La alta presión de contacto es obtenido en parte por el uso de un sistema magnético el cual produce un par alto sobre el disco y en parte

por el uso de un contacto sencillo con una inserción simple, prefiriéndose el método más viejo de contacto puente móvil.

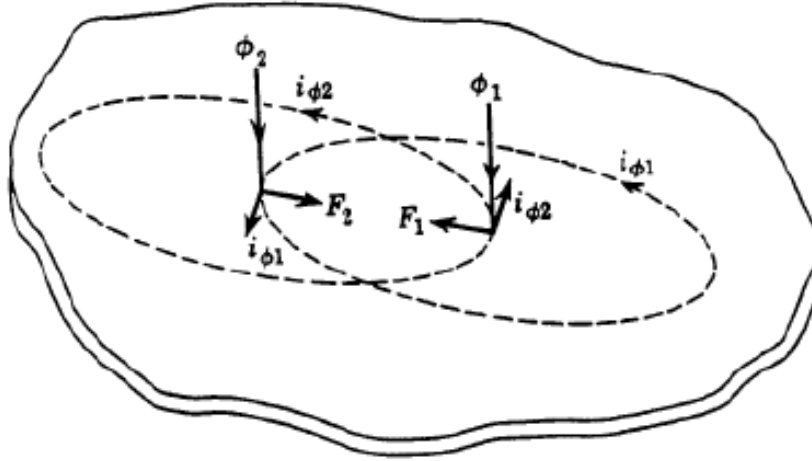
En resumen, usando contactos de superficie cilíndrica en ángulo recto, el contacto de máxima presión por unidad de área es alcanzado sin usar un punto fijo de contacto; esto asegura que el arco el cual forma sobre el cierre sea encontrado [29].



**Figura 2-11.** Relevador de disco de inducción para características tiempo inverso e instantánea.

El par de estos relevadores es proporcional al producto seno de los dos flujos magnéticos cortando al disco. Donde ambos flujos son producidos por la misma cantidad, como en un relevador de sobrecorriente, el par es proporcional al cuadrado de la corriente. Por ejemplo  $T = K I^2$ ,  $K$  decrece con el incremento de la corriente debido a saturación magnética y hecho para dar un rango de tiempo mínimo definido a las características de relevadores de sobrecorriente. En la **figura 2-12** se representa la

interacción de los flujos incidentes en el disco, las corrientes inducidas y las fuerzas actuantes [30].



**Figura 2-12.** Elemento representativo de la acción de funcionamiento del relevador de inducción.

La deducción analítica del par actuante en el funcionamiento del relevador de inducción:

Los flujos:  $\phi_1 = \Phi_1 \text{sen } \omega t$

$$\phi_2 = \Phi_2 \text{sen } (\omega t + \theta)$$

Las corrientes:  $i_{\phi 1} = \frac{d\phi_1}{dt} = \Phi_1 \cos \omega t$

$$i_{\phi 2} = \frac{d\phi_2}{dt} = \Phi_2 \cos (\omega t + \theta)$$

La fuerza equivalente:

$$F = (F_2 - F_1) = (\phi_2 i_{\phi 1} - \phi_1 i_{\phi 2})$$

La fuerza resultante actuante en el disco.

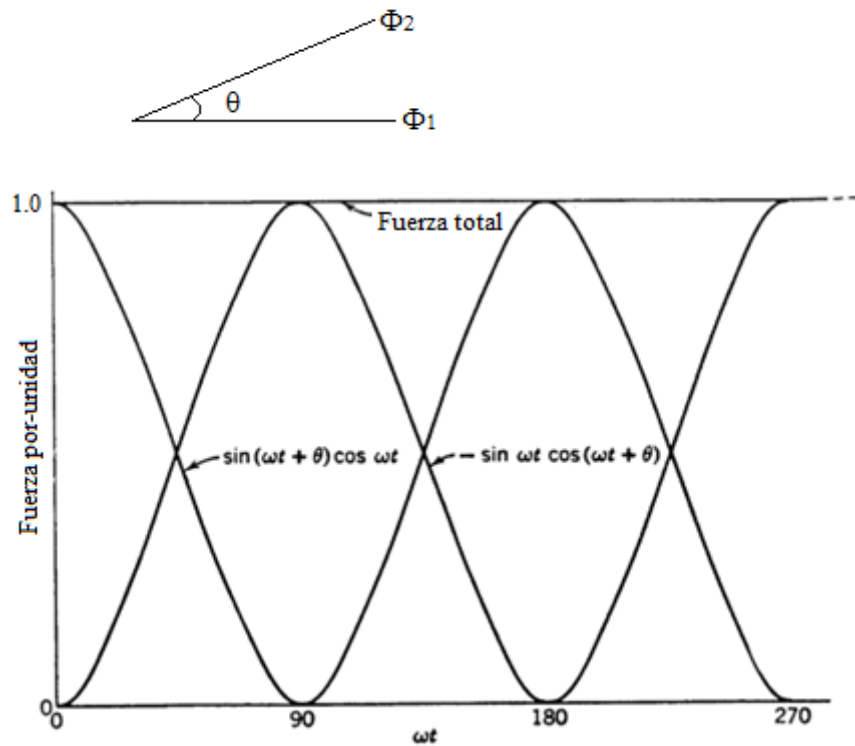
$$T = k \phi_1 \phi_2 \cos (90^\circ - \theta) = k \phi_1 \phi_2 \text{sen } \theta \quad (2.26)$$

Usando la equivalencia de los flujos  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  incidentes en el disco con un ángulo de fase  $\theta$ , producidos por la corriente aplicada a la bobina del relevador, y haciendo una



simplificación se tiene la ecuación (2.27). Complementado con la **figura 2-13** que nos representa los vectores y la suma de las dos señales en el tiempo correspondiente a la fuerza resultante.

$$T = kI_r^2 \text{sen}\theta \quad (2-27)$$



**Figura 2-13.** Fuerza actuante total a partir de la suma de dos señales resultantes de la interacción  $\phi$  y  $i$ .

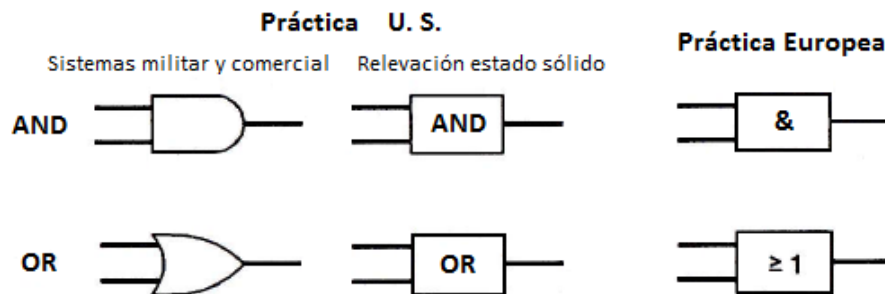
## 2.3 Relevador Electrónico de Estado Sólido

### 2.3.1 Unidades lógicas de estado sólido.

Las unidades lógicas de estado sólido son combinaciones de componentes de estado sólido diseñados para usar señales de voltaje *dc* en el desempeño de funciones lógicas. Una unidad lógica tiene solamente dos estados: *no salida*, representado por 0 (cero), y *salida* representado por 1 (uno). Dos combinaciones lógicas son usadas para indicar los

voltajes asociados con los estados 0 y 1. En lógica normal, 0 es equivalente a voltaje cero y 1 a voltaje normal. En lógica inversa, los equivalente de voltaje correspondiente son invertidos; 0 es equivalente a voltaje normal y 1 a voltaje cero.

En lógica positiva, entradas y salidas son positivas; en lógica inversa o negativa, entradas y salidas son negativas. Sistemas relevados normalmente usan lógica positiva, sin embargo algunos elementos podrían usar señales de entrada y salida negativas. Unidades lógicas son mostradas esquemáticamente en su estado inactivo, el estado normal o “at-rest”. El estado inactivo corresponde a la representación normalmente des-energizado en el circuito del relevador electromecánico. Unidades lógicas son representadas por símbolos de función característica **figura 2-14**. Dos conjuntos de símbolos están en uso común. En sistemas militares y comerciales, el tipo de función es indicado por la forma geométrica distintiva del símbolo. En relevación de estado sólido, el nombre de la función lógica es simplemente escrito en un rectángulo o bloque, o un símbolo distintivo tal como “&” es usado dentro del bloque. La práctica Europea es similar a esta. Convenciones dictan que entradas son mostradas sobre lado izquierdo y salidas son sobre el lado derecho. Los símbolos y terminologías usados cumplen con IEEE estándar 91-1973 (ANSI Standard U32 14-1973), símbolos gráficos para diagramas lógicos, [31].



**Figura 2-14.** Ejemplos de símbolos lógicos.

Cuando una función lógica tiene sólo dos entradas, su salida usualmente es simple de determinar. Para tres o más entradas, particularmente con combinaciones de funciones lógicas, una lógica o tabla de verdad ofrece un método conveniente de determinar la salida. Una tabla lógica para una función con tres entradas y una salida es

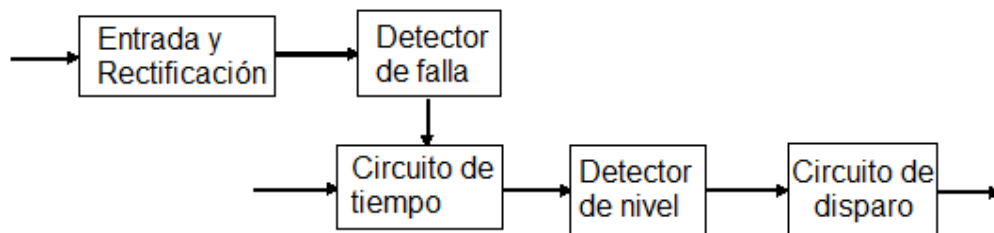
mostrada en la **figura 2-15**. La tabla enlista toda las posibles combinaciones de ceros y unos de las salidas. Cada salida podría ser 0 o 1, dependiendo sobre la función.

Entradas			AND	OR
A	B	C	salida	salida
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

**Figura 2-15.** Ejemplo de tabla lógica

### 2.3.2 Relevador de sobrecorriente estático.

La estructura del relevador de sobrecorriente estático se describe en esta sección de acuerdo [32]. En la **figura 2-16** se muestra el diagrama de bloques de un relevador de sobrecorriente estático.

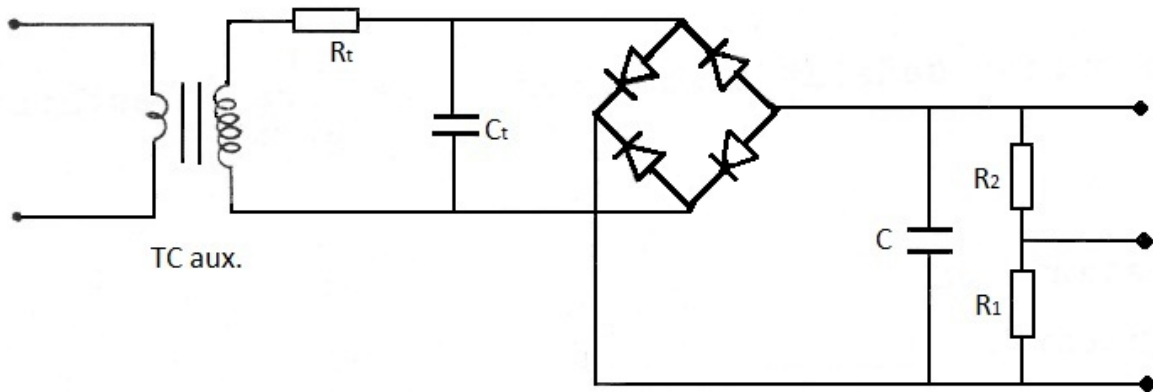


**Figura 2-16.** Representación en bloques de las etapas de un relevador de sobrecorriente estático.

#### *Circuito de entrada y rectificación.*

El circuito cuenta con un transformador de corriente auxiliar que permite reducir a valores muy bajos la señal de la corriente de entrada, un puente de diodos de rectificación de media onda, un circuito  $R_t C_t$  y entrada en el puente que ayuda a filtrar el sobrevoltaje

transitorio de la corriente de entrada y un circuito  $R_1$ ,  $R_2$  y  $C$  para filtrar la señal rectificadora y tener un voltaje de salida proporcional a la corriente rectificadora, **figura 2-17**.



**Figura 2-17.** Circuito de entrada y rectificación

*Circuito de tiempo.*

De este circuito depende la característica TC inversa del relevador de sobrecorriente, esta característica es dada por la siguiente ecuación general.

$$I^n t = K$$

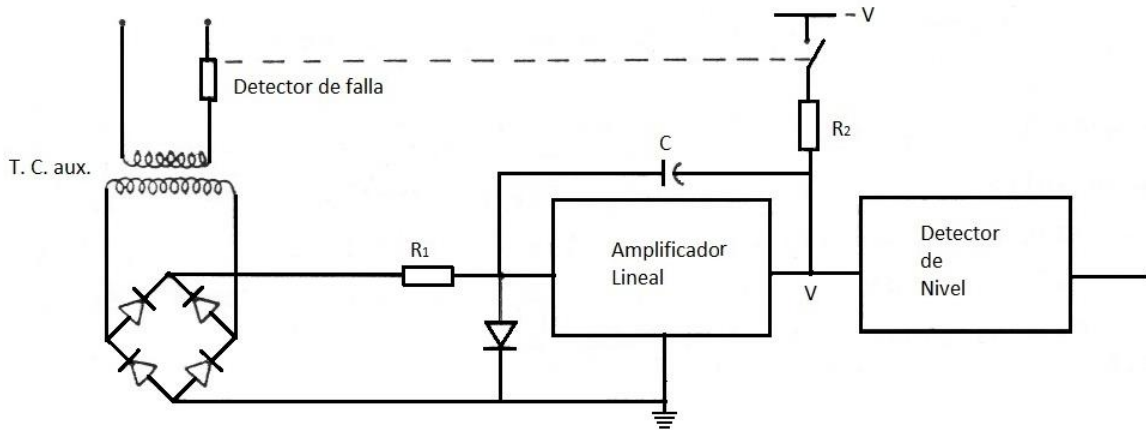
Donde  $I$  es el valor rms de la corriente aplicada al relevador,  $t$  el tiempo de operación y  $K$  una constante.

En forma general, la base de todos los circuitos de tiempo es la carga controlada de un condensador que al llegar a cierto valor de voltaje, provoca el arranque del detector de nivel. Si al condensador se aplica el valor rectificado de la corriente de falla se tiene una característica inversa dada por  $I t = K$ . Esto puede relacionarse con la ecuación de voltaje y corriente en un condensador en forma instantánea dada por.

$$i t = C v$$

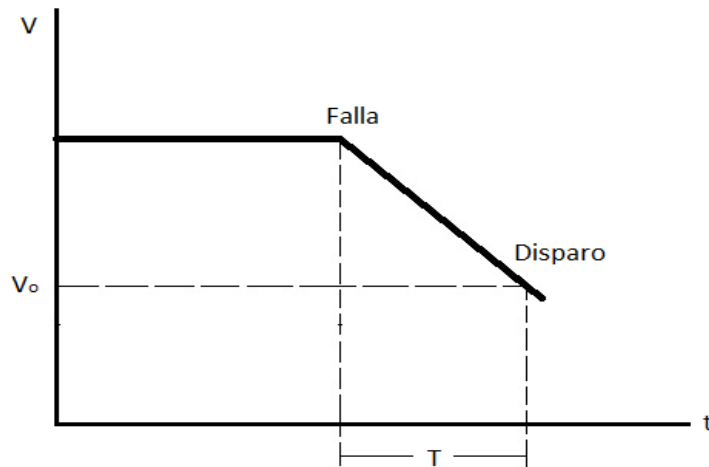
En este caso, la corriente del condensador es la propia corriente de falla, y la operación se produce a un valor constante  $V_o$  del voltaje  $V$  (arranque del detector de nivel); el relevador opera para un valor constante del producto  $I t$ .

La forma de lograr esta característica es a través del siguiente circuito (**figura 2-18**).



**Figura 2-18.** Relevador de sobrecorriente de característica  $I t = K$ .

El amplificador lineal con retroalimentación por un condensador constituye un integrador lineal tipo Miller, cuya salida  $V$  es una rampa de voltaje con una pendiente que depende de la corriente de entrada, y de los parámetros  $R_1$  y  $R_2$ . Esa pendiente puede hacerse positiva o negativa según se desee. En este caso el integrador tiene pendiente negativa, y sin señal aplica esta en saturación, con un valor máximo de voltaje de salida. Cuando hay corriente de falla, el voltaje de salida del integrador cae linealmente con una pendiente proporcional a esa corriente, hasta un valor  $V_o$  en que opera el detector de nivel. El tiempo de operación es por tanto inversamente proporcional a la corriente y resulta  $I t = K$ . La **figura 2-19** muestra la operación del circuito.



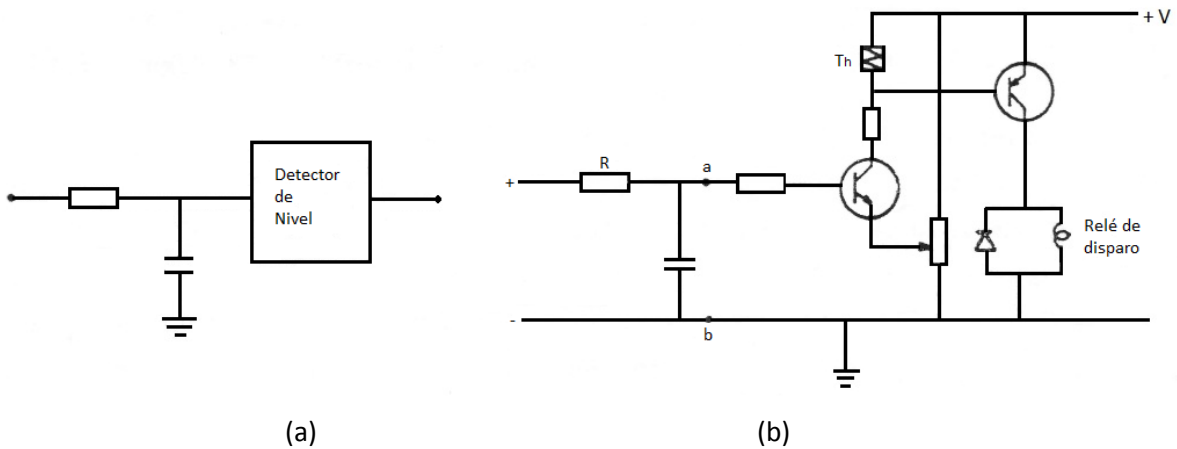
**Figura 2-19.** Gráfica de operación del relevador de **figura 2-18**

En la **figura 2-18** aparecen además del circuito de entrada y rectificación (de la figura 2-17) un detector de falla, cuya función se analizará más adelante.

Si se desea obtener características con mayor grado de inversión ( $n > 1$ ), es necesario aplicar al condensador un voltaje proporcional a la corriente de entrada tal como el obtenido en la **figura 2-17**, variando la característica de la respuesta de salida  $R_1$   $R_2$  de ese circuito por medio de condensadores o resistencias no lineales pueden obtenerse distintos valores de  $n$ .

Un esquema típico para curvas inversas con  $n > 1$  se muestra en la **figura 2-20**.

El voltaje proporcional a la corriente de falla rectificada (obtenido a través de la resistencia  $R_1$  en la figura 2-17, se aplica al circuito de tiempo compuesto simplemente por una red  $RC$  y su salida está el detector de nivel, como se muestra en la **figura 2-20 (a)**. En la **figura 2-20 (b)** se muestra una versión particular de uno de los detectores de nivel y también se presenta un circuito de disparo el cual es un relevador auxiliar electromagnético.



**Figura 2-20.** Circuito para característica de tiempo inverso con detector de nivel y relevador de disparo

El voltaje aplicado a la entrada del circuito es proporcional a la corriente de falla, por lo tanto la ecuación de carga del condensador puede escribirse:

$$V_c = KI(1 - e^{-t/RC}) \quad (2.28)$$

Donde  $V_c$  es el voltaje instantáneo del condensador y  $K$  es un constante.

La operación se produce cuando  $V_c = V_o$ , donde  $V_o$  es el valor de arranque del detector de nivel, por lo tanto el tiempo de operación del relevador puede expresarse:

$$t = RC \ln \frac{KI}{KI - V_o} \quad (2.29)$$

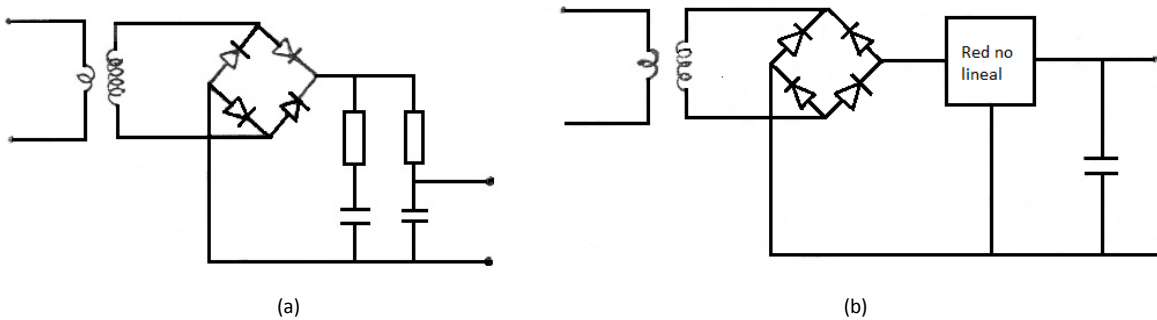
Esta ecuación representa la característica del relevador. Puede apreciarse que para  $KI = V_o$ , tiempo de operación tiende a ser constante, mientras que para  $KI \gg V_o$  (valor de arranque), el tiempo se reduce a medida que  $I$  aumenta, es decir la característica es de tiempo inverso.

Dos formas de lograr características con valor de  $n > 1$  se muestran en la **figura 2-21**. En la **figura 2-21(a)** se presenta el empleo de redes RC para controlar el grado de inversión. En **figura 2-21 (b)** se muestra la forma de lograr características de alto grado de inversión empleando una resistencia no lineal. Ambos circuitos son aplicables al esquema

de la **figura 2-20**, y el de la **figura 2-21 (b)** puede también aplicarse en el esquema de la **figura 2-18**.

#### *Detector de nivel*

El detector de nivel es la base de la comparación de amplitud que se hace entre el valor de arranque y valor de falla en el relevador de sobrecorriente.



**Figura 2-21.** Métodos para lograr características muy inversas.

#### *Detector de falla*

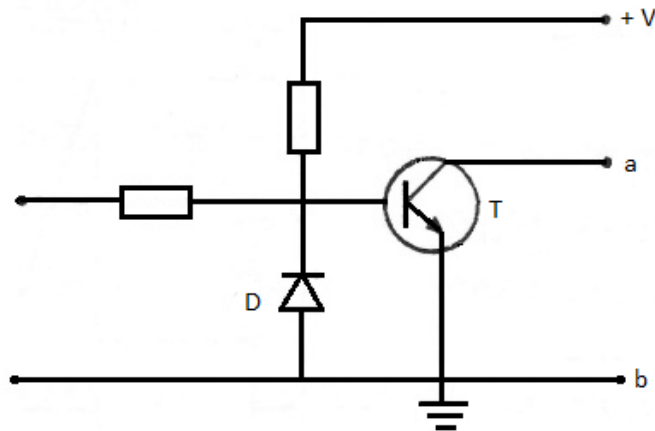
Este circuito tiene como función poner en operación el circuito de tiempo cuando se produce una falla y provocar la descarga rápida del condensador de dicho circuito cuando la falla desaparece. Con esto se logra, por una parte, el circuito de tiempo sólo consume energía de la batería cuando es necesario y no en forma continua; y por otra parte, que el relevador tenga una reposición instantánea o inmediata al desaparecer la falla.

El detector de falla es también un comparador de amplitud, que detecta el nivel de la señal de voltaje proporcional a la corriente rectificadora producida por el circuito de entrada y rectificación, y opera si pasa de cierto valor.

En la **figura 2-22** se muestra un circuito detector de falla muy sencillo. Su señal de entrada es la producida por el circuito de la **figura 2-17**, y se le aplica con la polaridad indicada. Cuando la corriente del sistema está por debajo de cierto valor el transistor está en saturación y representa un circuito en corto-circuito entre sus terminales de salida a y b; estos terminales se conectan en paralelo con el condensador  $C$  del circuito de tiempo



de la **figura 2-20**, por lo que en estas condiciones ese circuito no trabaja. Cuando se produce una falla y la corriente pasa de cierto valor, la base del transistor adquiere un voltaje negativo tal que éste se pone en corte, y hay un circuito abierto entre a y b; de este modo el circuito de tiempo puede comenzar su operación.

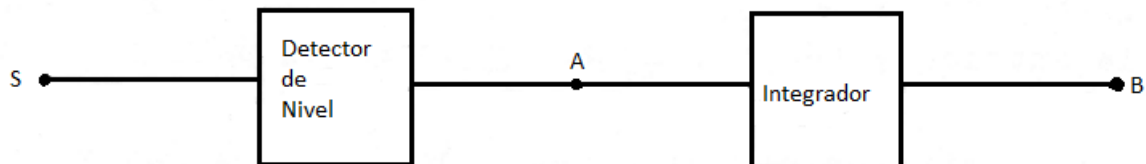


**Figura 2-22.** Detector de falla simple.

Cuando la falla desaparece, se restablecen las condiciones iniciales y el condensador *C* es cortocircuitado, produciéndose la reposición instantánea del relevador.

Debe observarse que la relación reposición/arranque está determinada en este circuito por los voltajes de saturación y corte del transistor; estos valores tienen cierta diferencia, por lo que la relación de reposición/arranque difieren de la unidad.

Si se requieren valores más cercanos a la unidad en el relevador, es necesario emplear detectores de falla más complejos. Un circuito que cumple este requerimiento se muestra en la **figura 2-23**.

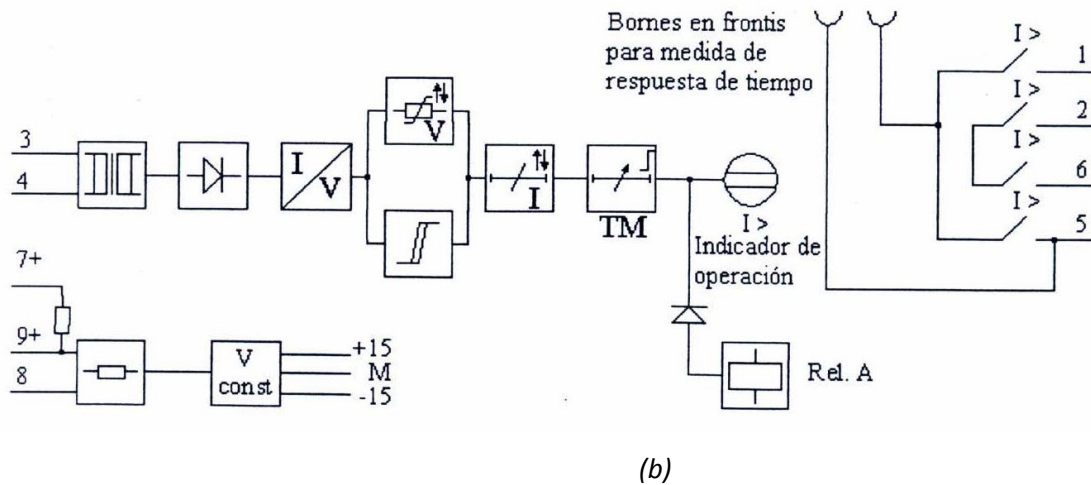


**Figura 2-23.** Detector de falla de relación reposición/arranque unitaria.

En la **figura 2-24** se ilustra un relevador electrónico de estado sólido de sobrecorriente con ajuste de corriente pickup, selección de tiempo dial y terminales de salida para medir el tiempo de operación; y su diagrama a bloques del circuito que integra al relevador.



(a)



**Figura 2-24.** Relevador electrónico de estado sólido marca Siemens modelo 7SK88: (a) Vista frontal y (b) diagrama de bloques

## 2.4 Relevador Digital

Los relevadores microprocesador han mejorado el campo de las protecciones de los sistemas eléctricos de potencia al incorporar sus fórmulas matemáticas que ayudan a sensor de una forma más eficiente las cantidades con las cuales operan [33].

### 2.4.1 Señales para procesamiento en el relevador.

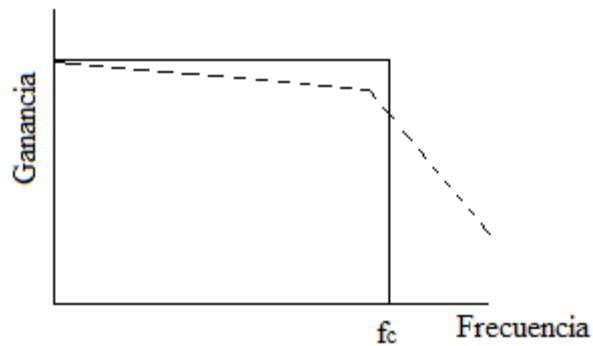
Los transformadores de instrumento deben ser capaces de reproducir fielmente las señales que se tienen en el lado primario del sistema de potencia para tener toda la información necesaria al tomar decisiones de disparo en caso de detectar alguna falla en el sistema de potencia.

### 2.4.2 Filtro pasabajas (filtro anti-aliasing)

Al presentarse alguna falla en el sistema de potencia, la señal de los transformadores de corriente y de voltaje puede tener algún contenido de frecuencias diferente a la fundamental, provocando que las ondas en los secundarios de los transformadores de instrumento se vean distorsionadas. La señal que el relevador debe procesar es la señal fundamental o de 60 Hz.

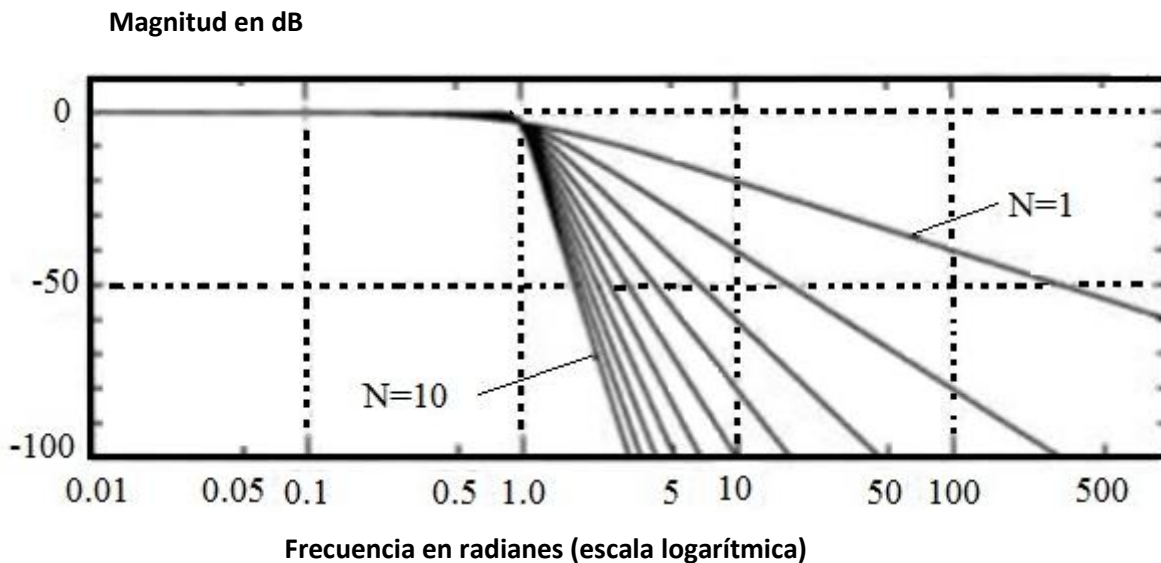
### Filtro pasabajo

La función de este filtro es eliminar un determinado nivel de frecuencias que se generan al presentarse alguna falla en el sistema de potencia. Normalmente en el diseño de relevadores este filtro es del tipo Butterworth de segundo orden con una especificación de corte de frecuencia aproximada a 240 Hz, como se muestra en la **figura 2-25**.

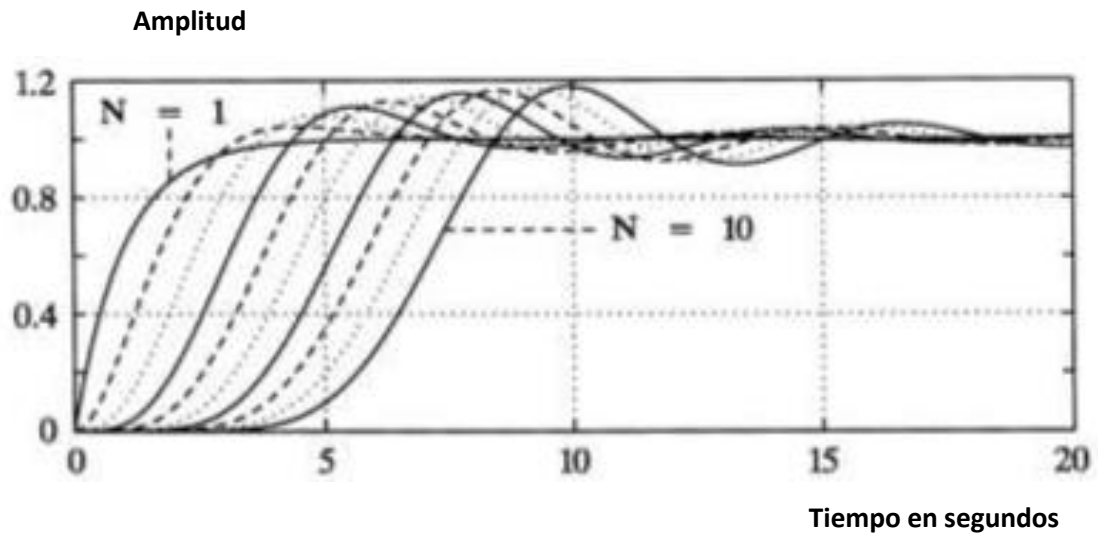


**Figura 2-25.** Característica de corte de frecuencia del filtro ideal pasabajos

Si el filtro presenta un quiebre agudo a la frecuencia de corte en radianes, como se muestra en **figura 2-26**, se produce un retraso en su función de respuesta, además de un sobrepaso, **figura 2-27**.



**Figura 2-26.** Magnitud de respuesta de filtro Butterworth para valores  $\omega_c=1$  y valores N de 1 a 10.

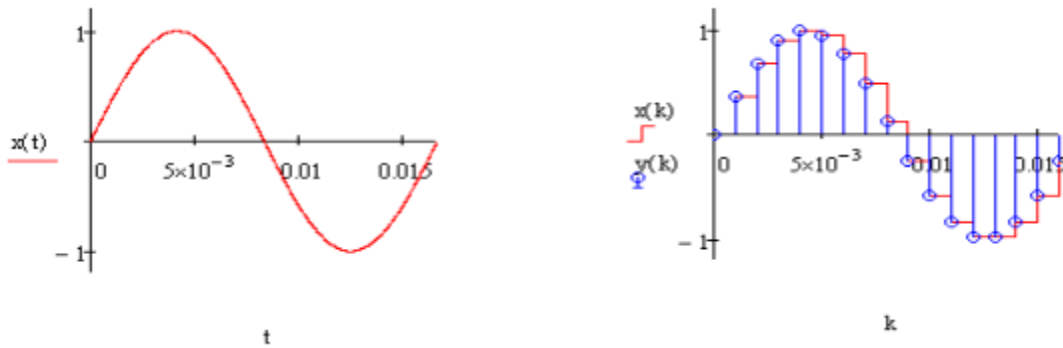


**Figura 2-27.** Grafica normalizada de respuesta a la función escalón unitario del filtro Butterworth con  $\omega=1$  valores de  $N$  de 1 a 10, donde  $N$  es orden del filtro.

### 2.4.3 Muestreo

La velocidad de muestreo está relacionada con la velocidad del procesador que se utilizará en el relevador microprocesador, ya que una velocidad de muestreo alta requiere también una velocidad de procesamiento.

En el *timer* se define la velocidad de muestreo de la onda continua, una vez tomada la muestra de la señal continua se presenta la misma forma de onda pero con efecto de escalera, tal y como lo muestra la **figura 2-28**.



**Figura 2-28.** Comparación de la señal continua y la señal discreta.

#### 2.4.4 Convertidor Analógico/Digital (ADC)

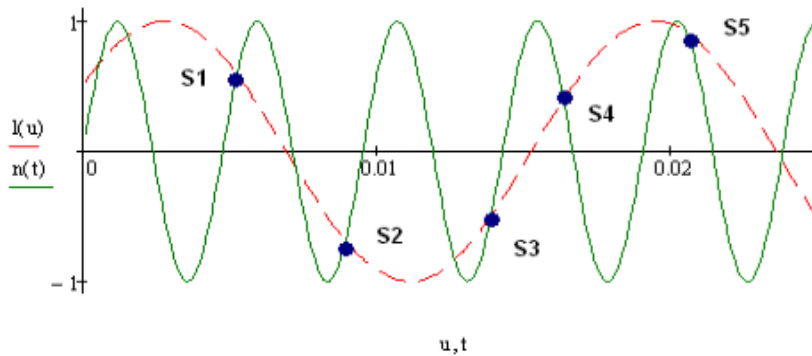
El convertidor analógico/digital, es el encargado de realizar la conversión de la señal continua que proviene de los transformadores de instrumento, una señal de voltaje de valor digital compuesto de unos y ceros. Usualmente la señal de entrada al ADC, es restringida a una escala completa de  $\pm 10 V$ , por lo que las señales son escaladas para que exista la correspondencia con la señal original. Las altas frecuencias que se originan en los transitorios deben ser removidas por el filtro anti-aliasing (filtro pasabaja).

##### *Aliasing*

El aliasing es el efecto que se presenta cuando se muestran señales que son continuas en el tiempo, no distinguiendo la señal que se muestrea debido a que la frecuencia de muestreo es menor que la señal de interés y es un problema en los filtros digitales. Cuando se muestrea una señal periódica senoidal, puede ocurrir que se obtengan las mismas muestras que una señal senoidal pero de más baja frecuencia.

Para evitar el efecto aliasing, se debe respetar el principio de Nyquist, el cual establece que la frecuencia de muestreo al menos dos veces la frecuencia mayor que contenga la señal a muestrear. De esta forma, se podrá reproducir la señal de las muestras tomadas. Si se utiliza una frecuencia de muestreo mayor a la frecuencia máxima de la señal, la señal reconstruida de las muestras se acercará más a la señal original.

En la **figura 2-29** se muestra el efecto aliasing. Si consideramos la señal análoga (sólida) en el dominio del tiempo, la cual es muestreada en los puntos de S1 a S5, estos valores también corresponden a la señal original a muestrear, por lo que no se distinguirá a que señal pertenece.



**Figura 2-29.** Ejemplo de aliasing causado por muestreo.

#### 2.4.5 Filtro digital

Una vez que los valores han sido filtrados a través del filtro pasabajas, las formas de onda contienen aún componentes de CD, antes de que los valores sean procesados por el relevador digital, los fasores solo deben tener la componente de 60 Hz o frecuencia fundamental.

El cálculo de la transformada discreta de fourier de la componente fundamental es la definida en las ecuaciones (2.30) y (2.31)

$$V_{real} = \frac{2}{NMC} \sum_{k=0}^{NMC-1} [V_k \cos(2\pi k / N)] \quad (2.30)$$

$$V_{imag} = \frac{2}{NMC} \sum_{k=0}^{NMC-1} [-V_k \text{sen}(2\pi k / N)] \quad (2.31)$$

La magnitud del fasor puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$V_{mag} = \sqrt{(V_{real})^2 + (V_{imag})^2} \quad (2.32)$$

El ángulo del fasor es definido por la ecuación (2.33):

$$V_{angulo} = \arctan(V_{imag}/V_{real}) \quad (2.33)$$

La transformada discreta de fourier para muestras discretas, también se representa con la siguiente expresión:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.34)$$

En donde:

NMC son las muestras de un ciclo

N es el número de muestras por ciclo

K es la muestra que se procesa

n es la frecuencia, n=1 es la frecuencia de 60 Hz o fundamental.

$$e^{-j2\pi kn/N} = \cos(2\pi kn/N) - j\sin(2\pi kn/N)$$

Al utilizar el análisis de Fourier es necesaria que la cantidad de muestras sean de un ciclo completo, sean contabilizadas para tener la magnitud y ángulo correctos de la señal.

El filtro coseno es utilizado para eliminar esta componente de CD, y solo se utilizan valores obtenidos por este filtro, tanto para la parte real como para la parte imaginaria. La ecuación (2.35) es la expresión del filtro coseno.

$$X(n)_{real} = \frac{2}{NMC} \sum_{k=0}^{NMC-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{NMC}\right) \quad (2.35)$$

La parte imaginaria del fasor está dada por la ecuación (2.36):

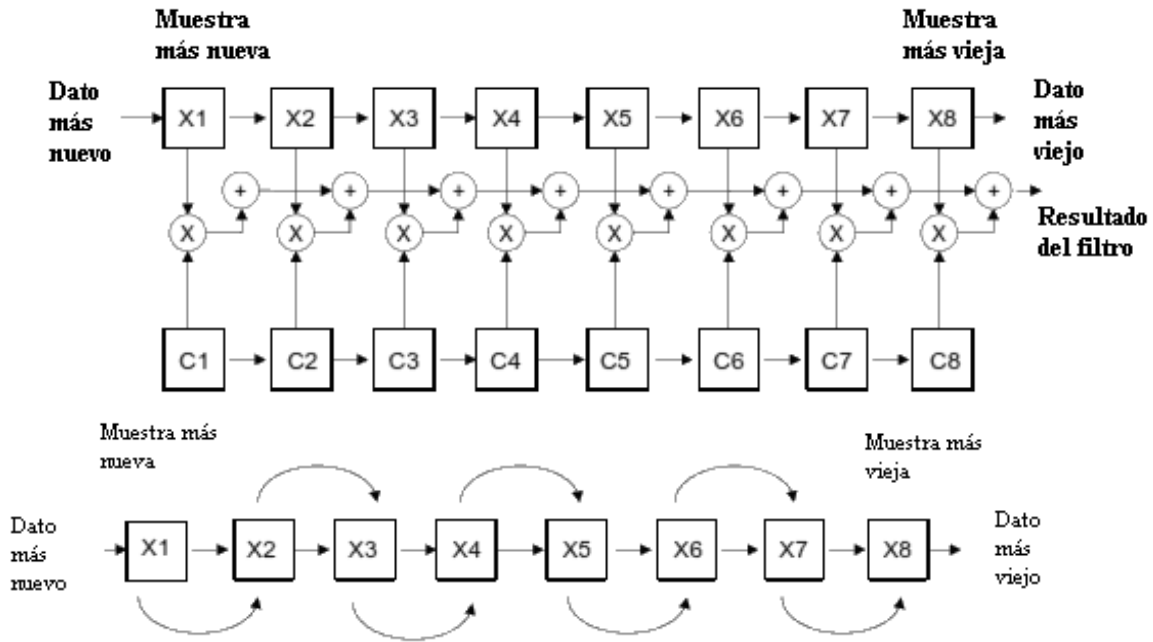
$$X_n_{imag} = X_{\left(k - \frac{NMC}{4}\right)}_{real} \quad (2.36)$$

Si NMC está considerado para 360°, NMC/4 es la muestra tomada con 90° de retraso, siendo igual al valor de la función seno.



De esta forma, el filtro coseno requiere 5/4 de ciclo para alcanzar su estado estable, tanto en magnitud como en ángulo de fase, y la señal obtenida después de aplicarlo es sin la componente de CD.

La implementación del filtro coseno para 8 muestras por ciclo en la **figura 2-30**.



**Figura 2-30.** Filtro coseno para 8 muestras por ciclo.

*Formación de los fasores de las señales de los transformadores de instrumento.*

El relevador digital requiere que las formas de onda senoidales de las corrientes y voltajes, sean convertidas a valores fasoriales sin la componente de CD, sin armónicos y solo con la frecuencia fundamental con la finalidad de poder realizar operaciones con ellos.

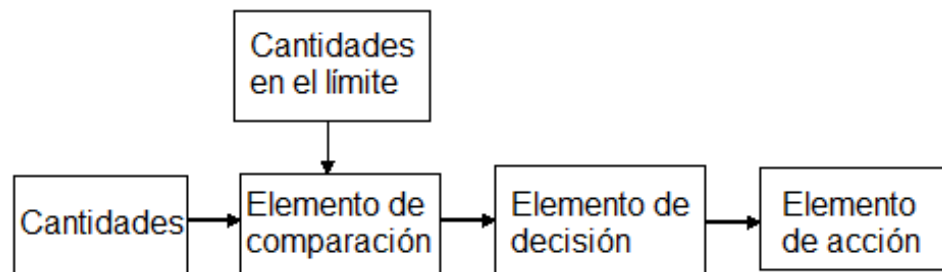
Si en el relevador digital, una señal análoga  $V(t)$  es muestreada NMC por ciclo, y de acuerdo a los puntos de las *señales procesadas y muestreo*, el filtrado digital procesará estas muestras desde  $k=0$  hasta  $NMC-1$ .

#### **2.4.6 Memoria**

La memoria es requerida en los relevadores digitales ya que en caso de presentarse una falla trifásica a la salida de la ubicación del relevador digital, éste no tendrá el poder de realizar procesamiento de cálculo para poder liberar correctamente la falla, pudiendo ser el causal de un disturbio de grandes magnitudes y altos costos. Si la red del sistema eléctrico de potencia se encuentra en condiciones balanceadas antes de que ocurra cualquier falla, los fasores de voltaje solo presentan secuencia positiva, y este tipo de secuencia es la requerida para realizar correctamente el procesamiento de la información en el relevador digital.

#### **2.4.7 Modelo del relevador digital**

El relevador digital consiste de varios elementos arreglados para determinar una condición normal del sistema en base a las muestras de las señales de entrada para tener una acción. La **figura 2-31** muestra los elementos de un relevador



**Figura 2-31** Elementos funcionales de un relevador digital de protección.

Los relevadores siempre miden ciertas cantidades del sistema, tales como voltajes y corrientes, realizan comparaciones de las cantidades del sistema o algunas combinaciones de estas cantidades contra los límites de ajuste ingresados al relevador por el ingeniero de protecciones. Si las condiciones comparadas indican una condición de alerta, el elemento de decisión se activa. Lo anterior puede involucrar elementos de tiempo para determinar si la condición es permanente. Finalmente, si todas las verificaciones se satisfacen, el elemento de acción se activa con lo que se involucra una apertura de un interruptor para aislar la falla del sistema eléctrico.

El tiempo requerido para tomar la acción necesaria es llamado tiempo de liberación de la falla y está definido por la ecuación (2.37).

$$T_{lib} = T_c + T_d + T_a \quad (2.37)$$

En donde

$T_{lib}$  es el tiempo de liberación de la falla

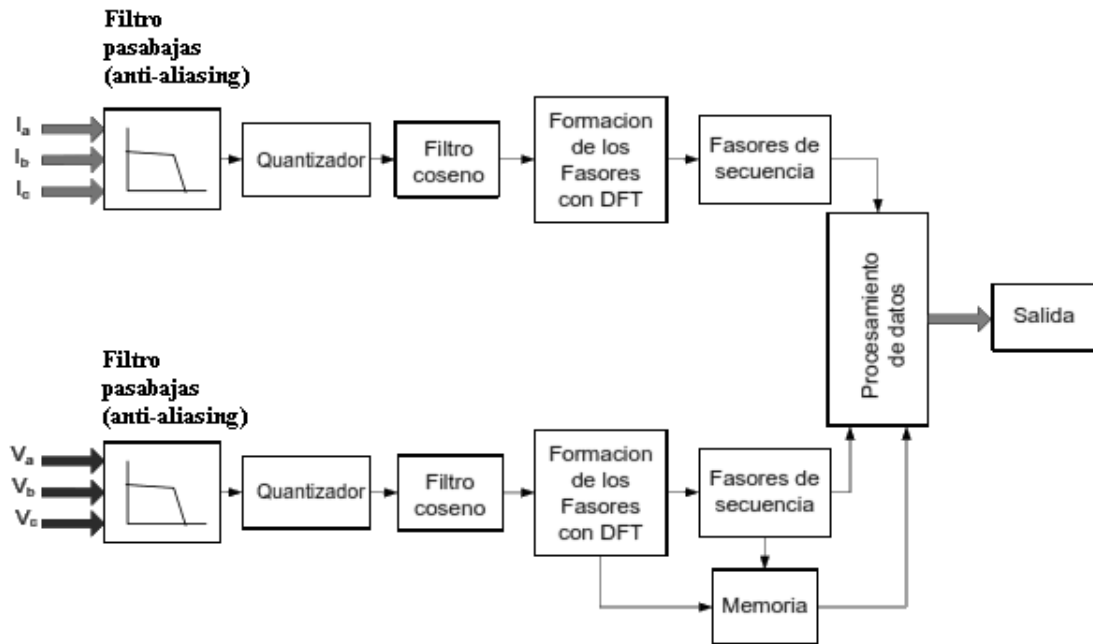
$T_c$  es el tiempo de comparación

$T_d$  es el tiempo de decisión

$T_a$  es el tiempo de acción

El tiempo de liberación es muy importante en los sistemas eléctricos de potencia, ya que se tiene que coordinar con otros relevadores, para asegurar que solo se abran las partes del sistema con falla y también, para permitir al sistema eléctrico estabilidad.

La **figura 2-32** muestra un diagrama de bloques de un modelo simplificado del relevador microprocesador.



**Figura 2-32.** Modelo del relevador microprocesador.

# Capítulo 3

## Limitaciones de la protección de sobrecorriente convencional en redes de distribución

---

### 3.1 Fundamentos de la operación del relevador de sobrecorriente 51.

Los dispositivos de protección son aplicados a un sistema de potencia como protección primaria y de respaldo. La protección primaria es la primera línea de defensa contra más daños causados por una falla u otras condiciones anormales de funcionamiento. Estos dispositivos son generalmente ajustados para operar sin retardo de tiempo y remover menos elementos del sistema de potencia. La protección de respaldo se encarga de despejar la condición anormal cuando falla la protección primaria. Los dispositivos protección de respaldo y sus ajustes son seleccionados para operar con un intervalo de tiempo predeterminado después de operar el dispositivo primario. Para la mayoría de las aplicaciones, el funcionamiento de los dispositivos de respaldo aísla circuitos en adición al circuito fallado. Una porción más grande del sistema de potencia es interrumpida con la protección de respaldo.

El proceso de ajuste del relevador es un compromiso entre los objetivos opuestos de máxima continuidad de servicio y de máxima protección de equipo; por lo tanto, no puede lograrse una completa coordinación selectiva en todos los sistemas. El siguiente procedimiento muestra la progresión lógica de pasos necesarios para construir efectivamente la gráfica de coordinación tiempo-corriente y ajustar los dispositivos de protección de sobrecorriente en sistemas industriales:

**a)** Seleccionar el circuito a coordinarse. Comience con las cargas en el circuito (en el nivel de voltaje más bajo) y hacia la fuente de alimentación. Determinar el circuito rama con el ajuste de corriente más grande. Normalmente, este punto será donde se encuentre el motor más grande en los circuitos de derivación debido a la alta corriente inrush vista durante el arranque. Sin embargo, debe seleccionarse un alimentador del circuito en derivación si tiene una corriente más alta de ajuste.

**b)** Seleccionar la escala adecuada de corriente. Considerando un sistema grande o uno con más voltaje de transformación, la curva característica del dispositivo más pequeño es representada a la izquierda de la hoja de coordinación. El máximo nivel de cortocircuito en el sistema es el límite de las curvas a la derecha, a menos que sea conveniente observar el comportamiento de un dispositivo por arriba del nivel de corriente corto-circuito en el sistema bajo estudio. Debe limitarse el número de características de disparo trazadas sobre una hoja de coordinación. Más de cuatro o cinco curvas en una sola hoja se convierte en confusión, particularmente si se superponen las curvas **figura 3-1** en [34].

**c)** Dibujar un pequeño diagrama unifilar del circuito como referencia para las curvas características en la plantilla con los dispositivos en el diagrama.

**d)** En la gráfica bilogarítmica, se indican estos puntos importantes (si corresponde):

- 1) Corrientes de corto-circuito máximas disponibles
- 2) Corrientes de plena carga de transformadores y corriente importante de flujo-carga
- 3)  $I^2 t$  o curvas de daño para transformadores, cables, motores y otros equipos
- 4) Puntos de corriente inrush de transformador
- 5) La curva de arranque del motor que indica la corriente de rotor bloqueado, corriente a plena carga y tiempo de aceleración del motor
- 6) Valor nominal de tiempo-corto de paneles de control y conmutación (switchgear)

La coordinación de protecciones permite la continuidad de servicio con la mínima desconexión del sistema durante fallas. Consiste en la selección de los dispositivos de

protección y la asignación de los parámetros de ajuste que garantizan la liberación adecuada de las fallas. La selección de las características tiempo-corriente es determinante en la respuesta de los tiempos de operación del relevador.

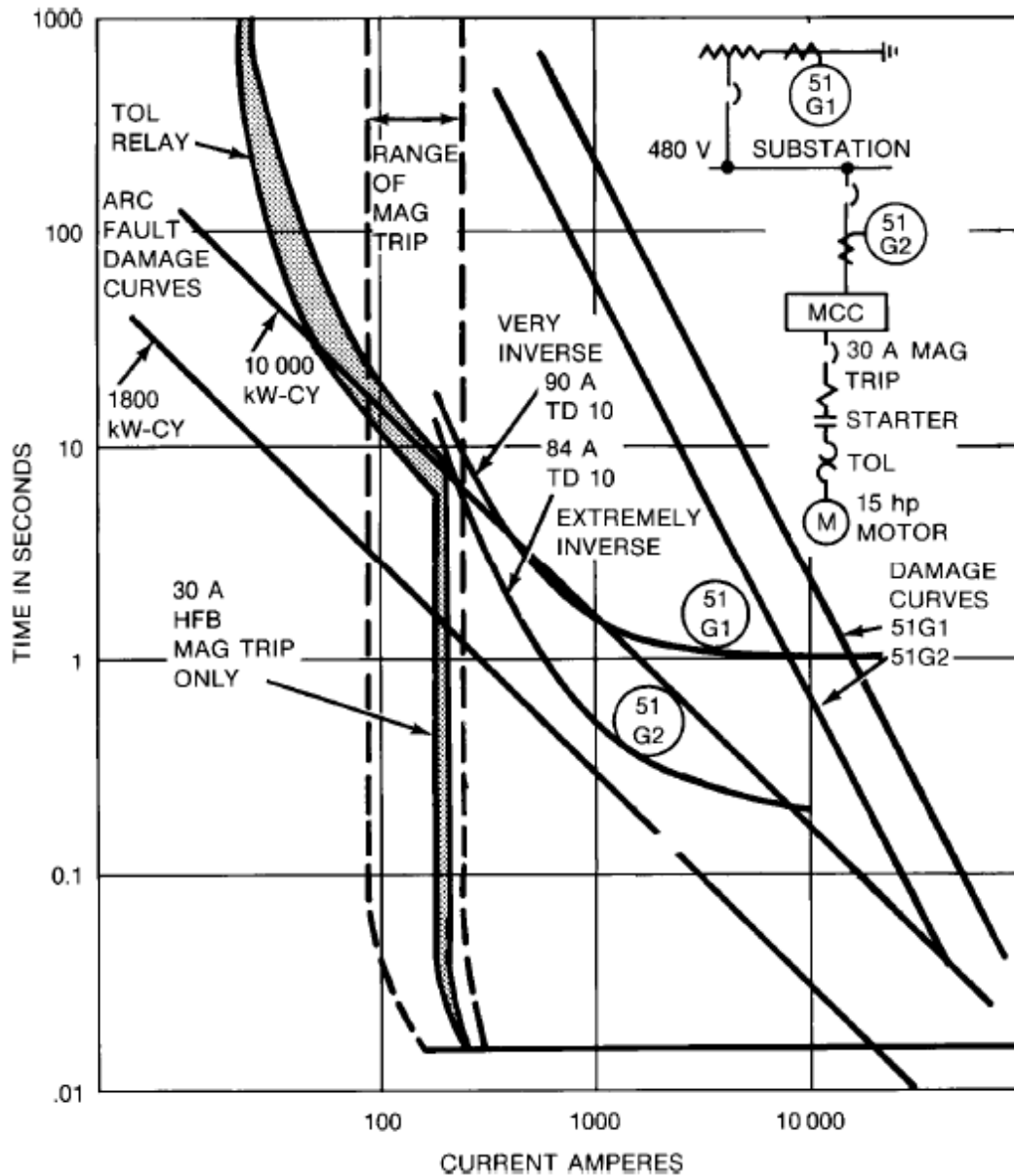


Figura 3-1. Gráfica de coordinación donde hay más de cuatro curvas y se presentan cruces.

El objetivo de un estudio de coordinación es determinar los parámetros de ajuste de los dispositivos de protección, que aseguren que las fallas y sobrecargas se eliminen con la mínima afectación a las cargas del sistema.

### **3.2 Coordinación en sistemas industriales.**

La coordinación de un sistema eléctrico industrial consiste en un estudio organizado de tiempo-corriente de todos los dispositivos de protección de sobrecorriente. El objetivo principal es determinar las características, rangos y ajustes de los diversos dispositivos de protección de sobrecorriente que asegure que la falla sea interrumpida por el dispositivo primario; o en caso de no tener la operación de esta, la del dispositivo de respaldo.

Los dispositivos de protección usados en sistemas industriales son relevadores sobrecorriente fase y tierra (50/51, 50/51G), diferencial (87), sobrecorriente direccional (67), bajo/sobre voltaje (27/59), sobrecorriente voltaje restringido (51V) o impedancia (21) para generadores, bajo/sobre frecuencia (81 u/o), fusibles y unidades de disparo-estático del circuito-interruptor de bajo voltaje.

Con la excepción de la protección diferencial, la cual es de selectividad absoluta, las otras protecciones son zona abierta y necesitan ser coordinados en tiempo para asegurar que el circuito fallado dispare primero.

En el relevador sobrecorriente tiempo-inverso (51), dispositivos de disparo-estático y fusibles, los tiempos de operación son dependientes de la corriente de falla. Las curvas de coordinación tiempo-corriente dibujadas manualmente para un sistema grande son laboriosas y se consume mucho tiempo, por lo cual la aplicación de programas computacionales ofrece una mejor alternativa, salva tiempo, y hace más fácil hacer y registrar cambios. Obtener confianza y un mejor entendimiento del tema o materia, el diseñador podría también aprender cómo desarrollar la prueba manualmente en [13].

### ***Intervalo de tiempo para coordinación de elementos sobrecorriente.***

#### *Entre relevadores controlando interruptores*

Circuitos interruptores mediano-voltaje (5 ciclos): 0.3 s

Circuitos interruptores alto-voltaje (2 a 3 ciclos): 0.25 s

#### *Entre fusibles río arriba y río abajo*

Pre-arqueo  $I^2t$  de fusibles río arriba > total  $I^2t$  de fusible río abajo. Los valores  $I^2t$  están disponibles por los fabricantes de fusibles. En la mayoría de las aplicaciones, una relación de valor nominal de corriente de dos-a-uno (por ejemplo 200 A río arriba y 100 A río abajo) provee coordinación, aunque una relación a 3:1 es preferible.

#### *Fusible río arriba y circuito interruptor río abajo*

Los fusibles de medio-o-alto-voltaje, usan el valor mínimo de la curva de fusión del fusible río arriba. Se debe permitir un margen de seguridad para contar con tolerancia, precarga, y cambios en temperatura ambiente. La curva tiempo-corriente del circuito interruptor o relevador no podrá exceder de 75% del tiempo de fusión mínimo de la curva tiempo-corriente del fusible para prevenir envejecimiento.

Para un fusible de bajo-voltaje, el tiempo total de disparo puede ser estimado adicionando un 15% arriba de 0.03 s y 10% encima de 0.03 s del tiempo promedio.

#### *Unidad disparo-estático de circuito interruptor bajo-voltaje*

Las curvas características tiempo-corriente de unidades disparo-estático son representadas por una banda de operación. Estos dispositivos son coordinados correctamente cuando hay un claro espacio entre sus bandas de operación. Esto también es válido para interruptores de bajo-voltaje que pueden iniciar ajustable y no ajustable, lo cual a menudo también tienen características de disparo de tiempo-corriente.

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones en las corrientes de corto circuito: corriente momentánea (primer ciclo) máxima y mínima, corriente de interrupción



(5 ciclos) máxima y mínima, y corriente de falla a tierra máxima y mínima. También se debe considerar en los intervalos de tiempo: el sobre viaje, tolerancia de curvas, características de envejecimiento de fusibles, y velocidad de operación de los interruptores.

Dentro de la planeación se lleva a cabo el desarrollo de un diagrama unifilar, determinar los flujos de carga, calcular los valores de corriente de corto circuito en cada punto de coordinación del sistema, seleccionar las características de dispositivos de protección y la relación de transformadores de corriente [34]. Los criterios de ajuste para los relevadores de sobrecorriente y fusibles se presentan en las **tablas 3.1; 3.2 y 3.3**, [13].

**TABLA 3.1.** VALORES DE AJUSTE TÍPICOS DE RELEVADOR Y FUSIBLE EN LA PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

Dispositivo	Tipo	Fórmula	Constante de Ajuste	Consideraciones
Relevador sobrecorriente instantáneo 50	Fase	$I_{pickup}^{inst} = k' \cdot I_{CC3\phi}^{max}$	$k' = 0.8a0.9$	
	Tierra	$I_{pickup}^{inst} = k' \cdot I_{CC1\phi}^{max}$	$k' = 0.8a0.9$	
Relevador sobrecorriente de tiempo inverso 51	Fase	$I_{pickup} = k \cdot I_{nom}$	$k = 1.5a3$	El dial depende de estudio de coordinación
	Tierra	$I_{pickup}^N = k \cdot I_{nom}$	$k = 0.1a1$	El dial depende de estudio de coordinación
Fusible	Limitador	$I_{pickup} = k \cdot I_{nom}$	$k = 1.25a1.5$	Voltaje máximo de línea a línea o de línea a neutro, máxima corriente de ruptura y máxima corriente de cortocircuito
Fusible	Expulsión	$I_{pickup} = k \cdot I_{nom}$	$k = 1.25a1.5$	Voltaje máximo de línea a línea o de línea a neutro, curva depende de requerimiento de coordinación y seleccionar acorde a la aplicación

**TABLA 3.2.** VALORES DE AJUSTE TÍPICOS DE RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE EN LA PROTECCIÓN DE MOTOR

Dispositivo	Tipo	Fórmula	Constante de Ajuste	Consideración
Relevador sobrecorriente instantáneo 50	Fase	$I_{a50} \geq 1.6 I_{contribmot}$ $= \frac{1.6}{X''_{d\ motor}}$	$I_{a50} \geq \frac{1.6}{X''_{d\ motor}}$	Si se introduce un retardo de tiempo (100ms)
Relevador sobrecorriente de tiempo inverso 51		$I_{pickup} = k \cdot I_{nom\_mot}$	$k = 2a3$	Si no se conoce la curva capacidad térmica Dial depende del estudio coordinación
Relevador sobrecorriente instantáneo 50N	Tierra	$I_{a50N} \leq 0.5 I_{CC\ monof\ mínima}$	$I_{a50N} \leq 0.1 I_{CC\ monof\ mínima}$ retardo de tiempo (100ms)	$I_{CC}$ En 30 ciclos
Relevador sobrecorriente de tiempo inverso 51N		a	$I_{a51N} \leq 0.1 I_{CC\ monof\ mínima}$ $I_{CC}$ en 30 ciclos	

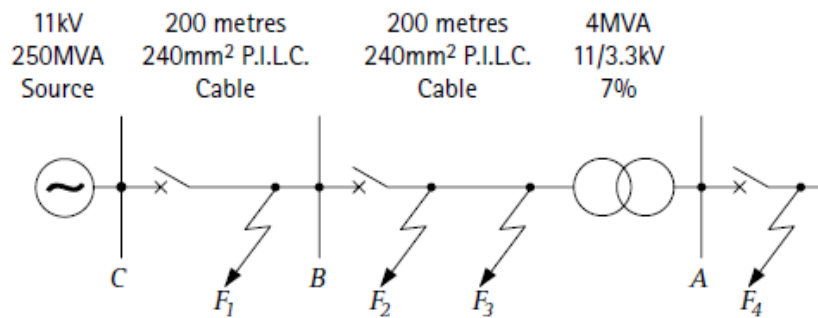
**TABLA 3.3** VALORES DE AJUSTE TÍPICOS DE RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE EN LA PROTECCIÓN DE TRANSFORMADOR

Dispositivo	Tipo	Fórmula	Constante de Ajuste	Consideración
Relevador sobrecorriente de tiempo inverso 51	Fase	$1.5 I_{nom} \leq I_a \leq 3 I_{nom}$	En un alimentador de varios transformadores  $I_a = 1.5 \sum I_{nom}$	Curva de tiempo debe seleccionarse cumpliendo: a) Coordinación con otros dispositivos de protección. b) Coordinación con la curva de daño del transformador. c) Tolerancia a la corriente de magnetización del tranf.
Relevador sobrecorriente instantáneo 50			$I_a \geq 1.6 I_{cc3\phi\ max\ primer\ ciclo}$ $I_a \geq I_{mag} = 12 I_{nom}$	a) No operación cortocircuito 3φ máximo (corriente de primer ciclo) en las barras del sec. transformador b) No operación por la corriente de magnetización del transformador

		$I_a \geq \sum I_{mag} = 12 \sum I_{nom}$	c) Coordinación con la curva de daño del transformador	
Relevador sobrecorriente de tiempo inverso 51N	Tierra	$I_{a51N} \leq 0.1 I_{CC\ monof\ mínima}$ $I_{CC}$ en 30 ciclos		Curva de tiempo, se selecciona la curva más rápida disponible
Relevador sobrecorriente instantáneo 50N		$I_{a50N} \leq 0.5 I_{CC\ monof\ mínima}$	$I_{a50N} \leq 0.1 I_{CC\ monof\ mínima}$ retardo de tiempo (100ms)	$I_{CC}$ En 30 ciclos

**Ajuste de parámetros en la coordinación por tiempo.**

La selección de características de relevador sobrecorriente depende de los compromisos de la protección de cada caso en particular. Un procedimiento iterativo es a menudo necesario para resolver la falta de sensibilidad y/o coordinación, puede implicar el uso de características no óptimas, ocasionando el cruce de curvas, perdiendo la coordinación en un intervalo de corriente [35]. En la **figura 3-2** se muestra una porción de un sistema eléctrico de potencia con su protección primaria y de respaldo, y también su representación gráfica de coordinación por tiempo con un margen de CTI (*Coordination time interval*).



(a)

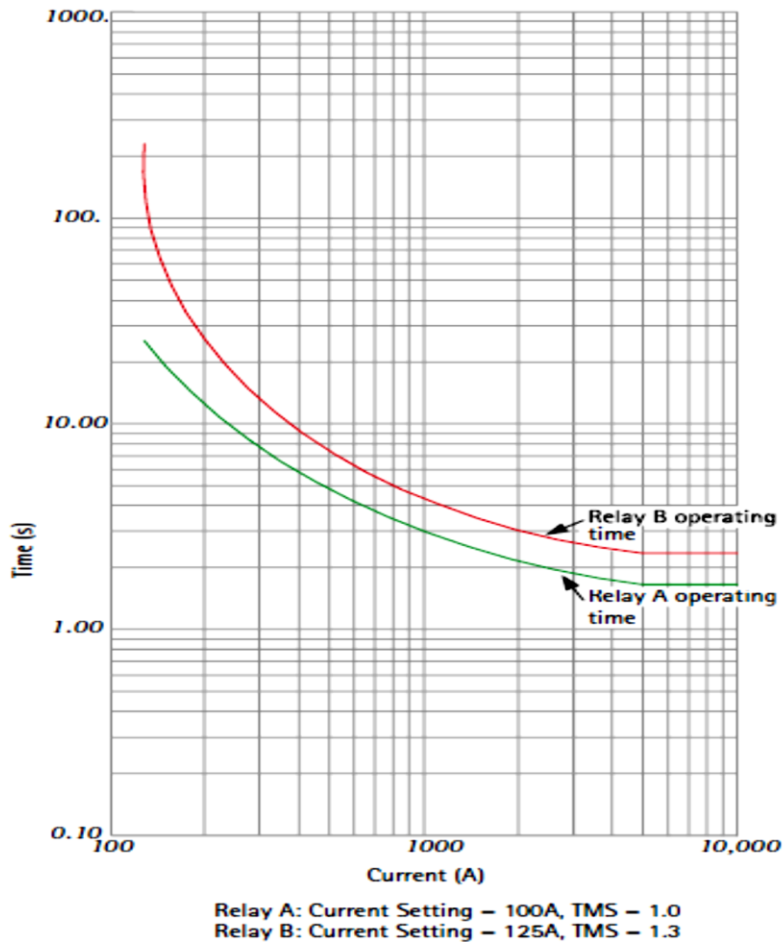


Figura 3-2. (a) Sistema radial y (b) su ajuste de coordinación protección primaria-respaldo

El Procedimiento del cálculo de los parámetros de ajuste en la coordinación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso 51 es:

1. Determinar el tiempo del relevador primario, usando la ecuación (3.1).

$$T_{\text{primario}} = \frac{A}{I^n - 1} + B \quad (3.1)$$

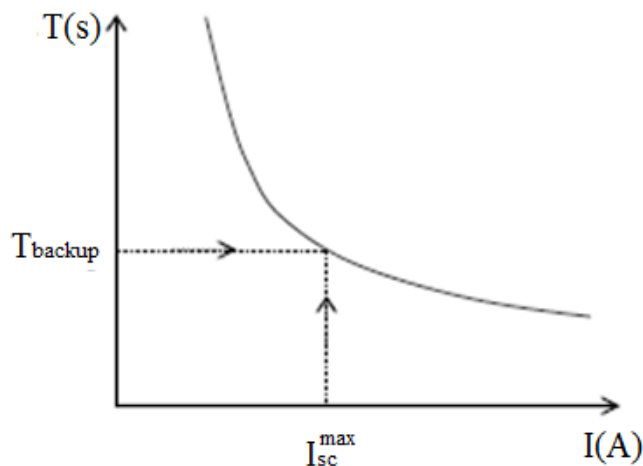
2. Determinar el tiempo del relevador de respaldo, usando la ecuación (3.2)

$$T_{\text{respaldo}} = T_{\text{primario}} + CTI \quad (3.2)$$

3. Determinar la palanca de tiempo con el tiempo de respaldo  $T_{respaldo}$  y la corriente de corto circuito  $I_{sc}$ , usando la ecuación (3.3).

$$Dial = \frac{T_{respaldo}}{\frac{A}{\hat{I}_{pickup} \hat{I}_{sc}^{max} \hat{U}^n} + B} \quad (3.3)$$

En la **figura 3-3** se representa la relación de la corriente de corto circuito máxima con el tiempo de respaldo en la característica tiempo-corriente del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.



**Figura 3-3.** Relación de corriente máxima de corto circuito y tiempo de respaldo en curva inversa

### 3.3 Limitaciones de funcionamiento

#### ***Limitación de características estándares híbrida.***

*Ajuste de relevadores de sobrecorriente, ambas unidades de retardo-tiempo e instantáneas.*

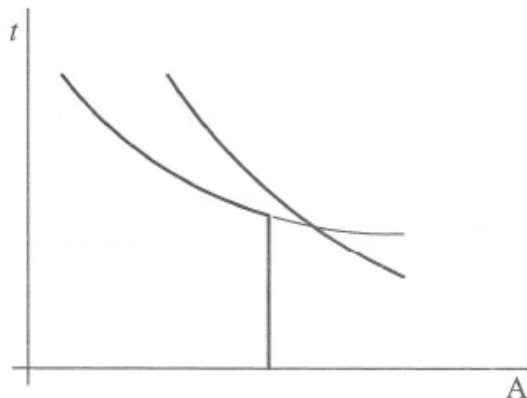
Los relevadores de sobrecorriente son normalmente suministrados con un elemento instantáneo y un elemento de retardo-tiempo dentro de la misma unidad. Cuando los relevadores electromecánicos fueron más populares, la protección de sobrecorriente se

componía de unidades monofásicas separadas. La protección más moderna de microprocesador tiene unidades de sobrecorriente de fase y una unidad de falla a tierra dentro del mismo equipo.

El ajuste de relevadores de sobrecorriente consiste en seleccionar los parámetros que definen las características tiempo-corriente requeridas para la unidad de retardo de tiempo; algo que trae más trabajo y confusión, lo cual podría realizarse con una sola característica flexible y con parámetros para un solo ajuste [36]. Otra limitación es tener que estar considerando que las unidades instantáneas son más efectivas cuando las impedancias de los elementos del sistema de potencia protegidos son más grandes en comparación a la impedancia de la fuente, pero ellas ofrecen dos ventajas fundamentales:

- Reducir el tiempo de operación de los relevadores para fallas severas del sistema
- Evitar la pérdida de la selectividad en un sistema de protección que consta de relevadores con características diferentes; esto se consigue por el ajuste de las unidades instantáneas así que funcionan antes de que pueden cruzar las características, como se muestra en la **figura 3-4**.

Estas mismas ventajas se pueden conseguir usando características no convencionales, que se pueden generar con facilidad en relevadores numéricos y sin la necesidad de doble ajuste de curvas estándares.

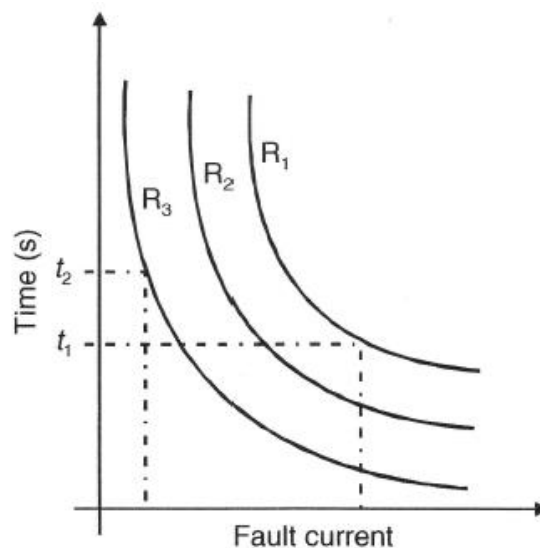


**Figura 3-4.** Preservación de selectividad usando unidades instantáneas

El criterio para ajuste de unidades instantáneas varía dependiendo en la localización, y el tipo de elemento del sistema que está siendo protegido. Tres grupos de elementos pueden ser definidos: líneas entre subestaciones, líneas de distribución y transformadores.

#### *Ajuste de relevadores de sobrecorriente con características IDMT*

Las curvas inversas IDMT (*Inverse definite minimum time*) como se muestran en **figura 3-5** operan más rápido en corrientes de falla más altas y más lento en corrientes de falla más bajas, lo que nos ofrece las características que deseamos. Esto explica por qué la filosofía IDMT se ha convertido en una práctica estándar en muchos países durante los años.

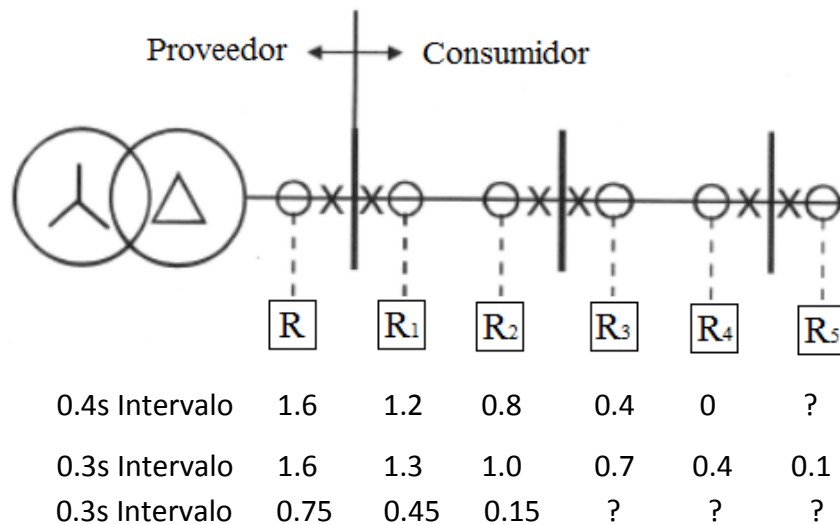


**Figura 3-5.** Características tiempo mínimo definido inverso

Cuando decidimos aplicar relevadores IDMT a una red, un número de puntos importantes tienen que ser considerados.

Primeramente, debe ser aceptado que los relevadores IDMT no pueden ser considerados en forma separada, tienen que establecerse para coordinar con ambos relevadores río arriba y río abajo. Su propósito es formar parte de un sistema totalmente integrado. Por lo tanto, quien especifica este tipo de relevador debe también proveer los

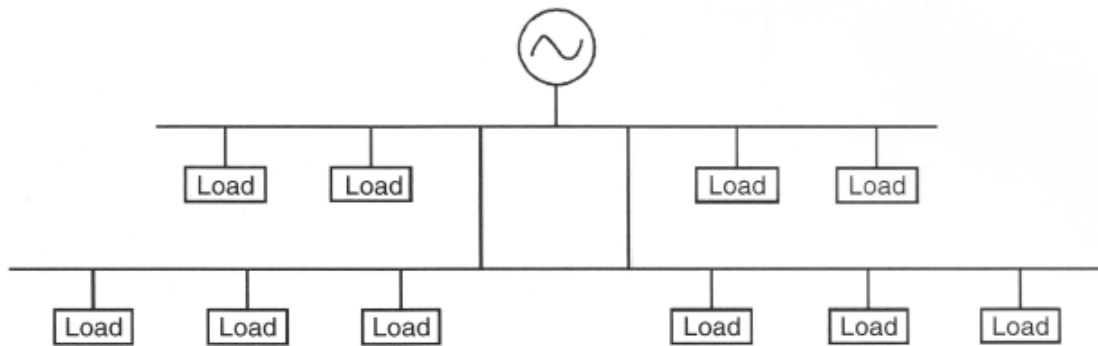
ajustes y curvas de coordinación como parte del paquete de diseño. Esta tarea es muy importante, los ajustes no deben ser manipulados (incluso por el personal operativo) de lo contrario se pierde la coordinación. Luego, evaluar la viabilidad de tal protección aplicada, uno debe estar consiente de ciertas restricciones que se aplicarán de la fuente en un extremo y los requisitos de la coordinación de la red de baja tensión en el otro. Estos factores pueden colocar a menudo severas limitaciones en el número de pasos que pueden lograrse para el ajuste. Se verá de la **figura 3-6** que uno podría quedar fuera del tiempo en los relevadores de sobrecorriente en el lado río abajo y puede ser imposible proporcionar los ajustes para los relevadores del extremo aguas abajo.



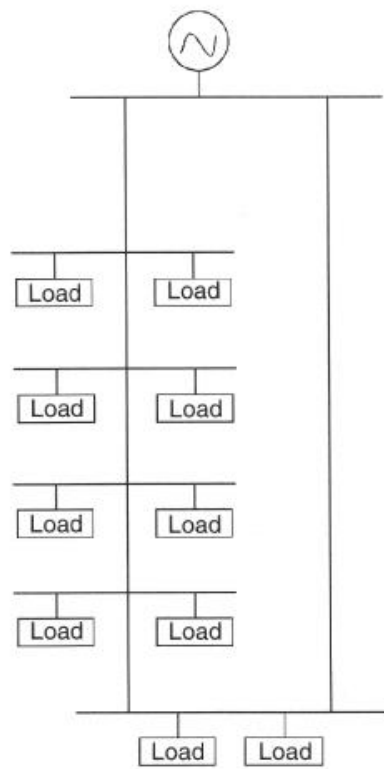
**Figura 3-6.** Intervalos de ajuste tiempo-sobrecorriente

Usando relevadores electrónicos modernos, estos ayudarán en que es posible obtener un par de pasos extra de ajuste considerando un intervalo de 0.3 s. El mensaje aquí es por consiguiente muy claro. Al diseñar la red de media tensión, uno debe aspirar a un número mínimo de niveles de ajustes. En otras palabras, redes de mediano-voltaje deberán ser diseñadas “cortas y gordas” en lugar de “largas y flacas” como se muestran en **figura 3-7 (a) y (b)**.





(a)

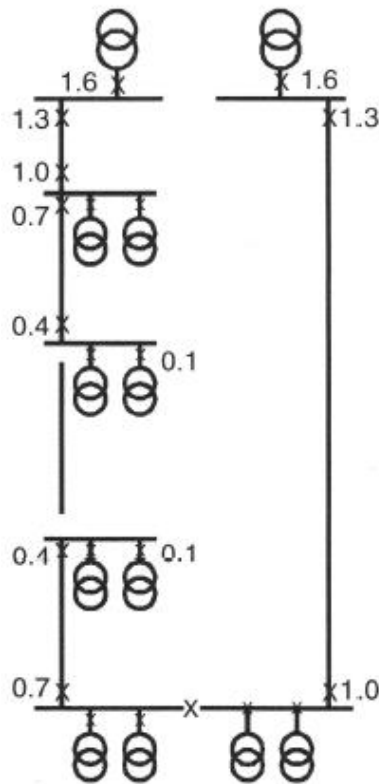


(b)

**Figura 3-7.** Influencia sobre el diseño de redes (a) cortas y gordas; (b) largas y flacas

Sí esta recomendación no es seguida, entonces se debe tomar la decisión de usar red radial abriendo el anillo en un punto específico para alcanzar algunos ajustes moderadamente aceptables como se muestra en la **figura 3-8**. El ajuste del relevador, dicta en cual punto el anillo debe ser abierto. Esta es una práctica de mal diseño, los

relevadores de protección nunca deberían colocar limitaciones en como la red debe ser operada, ya que la flexibilidad máxima es esencial en todo tiempo. Además, radialmente significa que la continuidad de suministro se pierde bajo condiciones de falla y la coordinación se perdería cuando la red se reorganiza para restaurar el suministro de una fuente alterna.



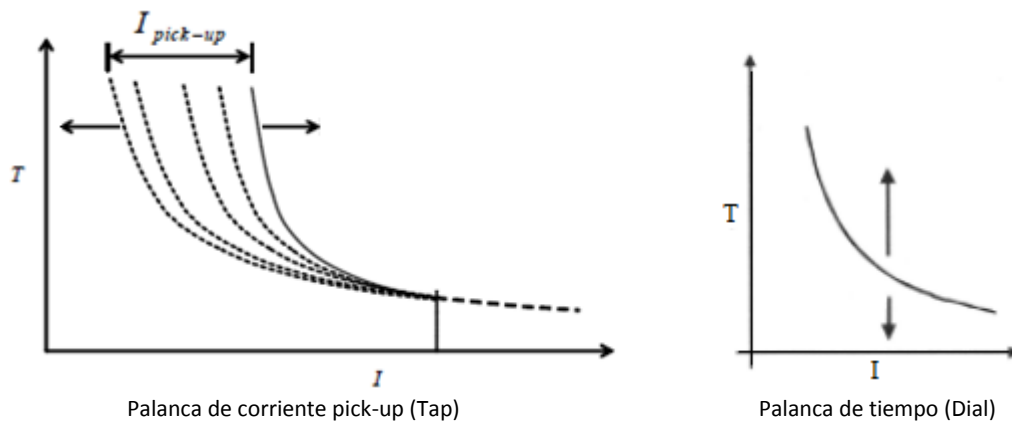
**Figura 3-8.** Impacto en configuración del sistema.

### **Importancia de ajustes y curvas de coordinación**

Si la protección no se ajusta correctamente entonces no es de mucha utilidad. Por lo tanto, una cuidadosa atención debe de darse al ajuste de los relevadores IDMT en particular, como ellos tienen que coordinar con relevadores río arriba y río abajo. En determinados casos no es posible alcanzar ningún tipo de ajuste (como se ha destacado anteriormente) demostrando así algunas limitaciones y a la vez oportunidades para

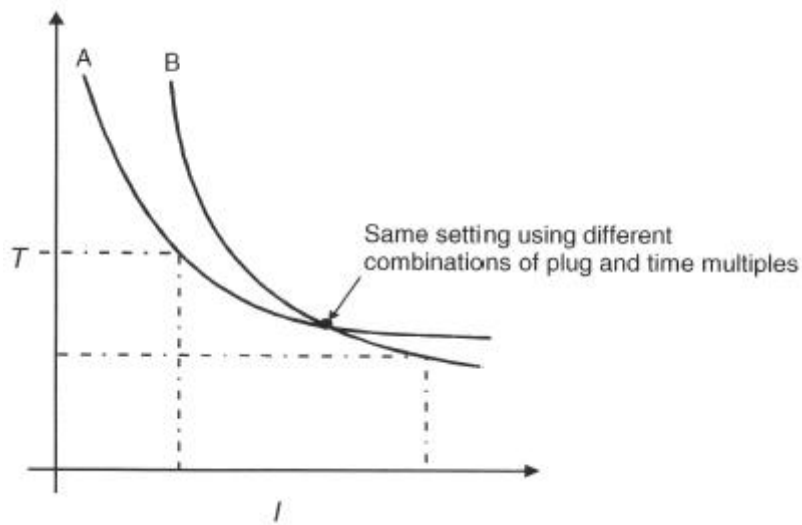
proponer una nueva característica flexible del relevador; y lograr ajustes apropiados en la coordinación.

En el ajuste del relevador IDMT se debe apreciar que moviendo el conector de la palanca de *pickup*, este mueve la curva en la dirección horizontal a la izquierda o a la derecha. Ajustando el *dial* se mueve la curva arriba o abajo en la dirección vertical para seleccionar el tiempo de operación (ver **figura 3-9**).

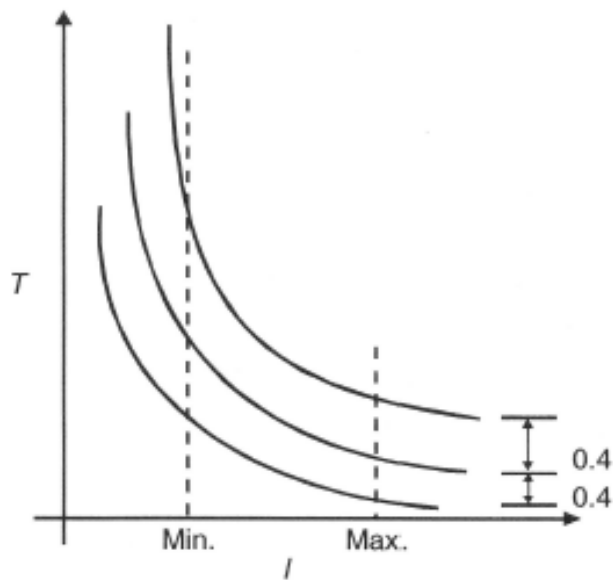


**Figura 3-9.** Efecto de ajustes

Es por lo tanto posible buscar el mismo ajuste usando dos combinaciones diferentes de ajuste de *tap* y *dial* como se ilustra en la **figura 3-10**. Note como las curvas se cruzan. Incluso para un intervalo de tiempo entre ellas es posible elegir ajustes de corriente/palanca de tiempo tal que las curvas se crucen. De esta manera que para corrientes de falla bajas, el relevador A opera antes que relevador B pero para corrientes de falla altas, el relevador B opera antes que el relevador A. Por lo tanto se pierde la coordinación. Es vitalmente importante que después de seleccionados los ajustes de los relevadores, la coordinación de curvas sean dibujadas para evaluar que no se crucen, como se muestra en la **figura 3-11**.



**Figura 3-10.** Curvas que no deben de cruzar



**Figura 3-11.** Coordinación ideal de ajuste de curvas

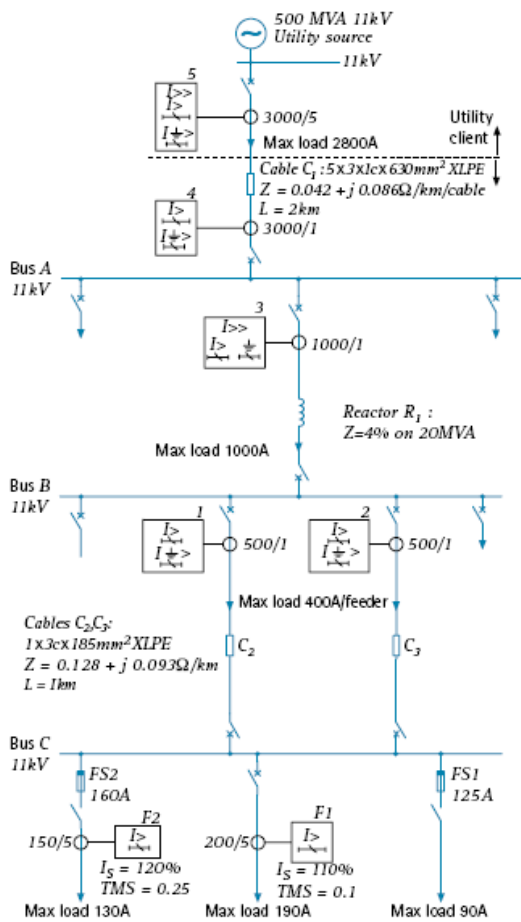
Dos reglas básicas son, que debe arrancar para el nivel más bajo de la falla (planta mínima) y que debe coordinar para el nivel más alto de la falla (planta máxima). La red eléctrica tiene que crecer y cambiar con el tiempo. Si la generación crece, se desarrollan centros de carga, plantas viejas son decomisadas, nuevas plantas son extendidas y así sucesivamente. Los niveles de falla por lo tanto cambian e invariablemente incrementan. Los ajustes del relevador IDMT deben por lo tanto ser revisados regularmente,

especialmente si hay extensiones o cambios planeados. Los viejos relevadores electromecánicos de disco han hecho un trabajo maravilloso sobre los últimos cien años y todavía pueden continuar para ello en ciertas aplicaciones, pero uno es consciente de sus limitaciones. Sin embargo, en la actualidad estamos empezando a pedir más de lo que son capaces de entregar [37]. No hay nada de malo con el relevador, es sólo la aplicación. Así que uno debe aprovechar los beneficios adicionales ofrecidos por la nueva gama de relevadores numéricos.

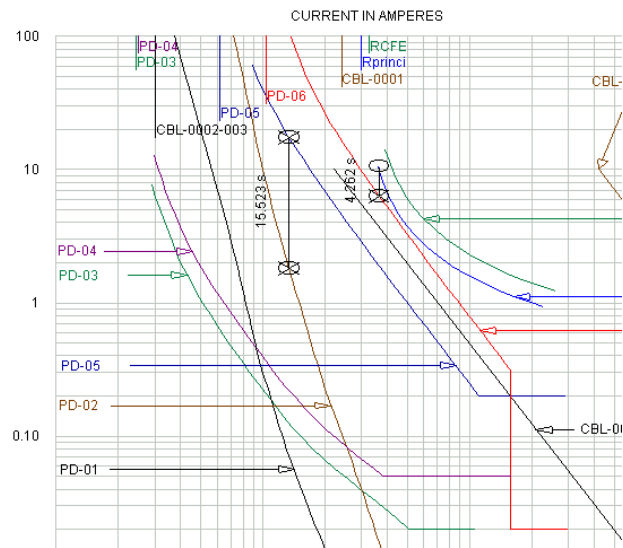
### **3.4 Oportunidad de mejorar**

#### ***3.4.1 Protección en acometida de una planta industrial.***

En la coordinación entre el relevador principal y el relevador de la empresa de suministro se ve la necesidad de modificar la forma de la curva y reducir el intervalo de tiempo de coordinación CTI, como se presenta en [35]. En figura 3-12 se muestra un sistema de distribución con esta problemática y sus curvas características de protección, donde se tienen grandes márgenes de tiempo en el nivelado de las curvas estándares en la acometida entre el sistema de consumo y suministro. En estos casos se ve la necesidad de modificar la característica estándar de extremadamente inversa *EI* a muy inversa *VI*, perdiendo coordinación y sensibilidad. Así que, hay que dar un mayor CTI, los tiempos de operación se incrementan y regularmente se deben tener corrientes de arranque más grandes; perdiéndose la protección para sobrecargas incrementándose el tiempo de operación para fallas mínimas. Con el uso de curvas características modificadas no convencionales es posible recuperar la sensibilidad y reducir el tiempo de operación en todo el rango de la protección sin perder coordinación.



(a)



(b)

**Figura 3-12** a) Sistema eléctrico de distribución de 11000 voltios y b) gráfica de coordinación de dispositivos de sobrecorriente estándares, en la acometida la coordinación es con curvas características diferentes.

### 3.4.2 Protección en la curva de daño de los transformadores categoría II y III.

La protección de sobrecorriente de fase o tierra es común para transformadores, ya sea como la primera protección para unidades más pequeñas o para cualquier unidad sin protección diferencial, o como protección de respaldo en unidades más grandes protegidas por relevadores diferenciales. Para transformadores menores de 10 MVA, pueden utilizarse fusibles en el primario. Los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso son utilizados en altos voltajes. Porque estos dispositivos ofrecen la función de respaldo, su aplicación y ajuste representan una protección combinada del transformador y el sistema adyacente.

Es deseable ajustar los dispositivos de protección con tanta sensibilidad como sea posible, pero los fusibles y relevadores de sobrecorriente de fase no deben de operar en cualquier condición tolerable. Tales como las condiciones de corriente inrush, sobrecargas máximas por la re-energización de circuitos después de una salida (arranque de carga-fría), o cualquier condición de emergencia. Los relevadores de tierra pueden ser ajustados sobre el desbalance máximo de secuencia cero que puede existir principalmente como resultado de las cargas monofásicas.

Los relevadores de sobrecorriente instantáneos pueden ser aplicados para complementar la protección diferencial o sobrecorriente y proveer protección para fallas severas en el lado primario del transformador. Ellos pueden ser ajustados de tal manera que no operen en inrush, en carga máxima de tiempo-corto (carga-fría), o en la falla máxima trifásica del secundario. Un ajuste típico será de 150-200% de la corriente máxima de cortocircuito en el secundario. Esto puede limitar su operación en fallas en el lado primario.

En el otro lado, los relevadores o fusibles protegen a los transformadores contra daños por fallas. Altas corrientes de falla pasando a través del transformador pueden causar daños térmicos como también mecánicos. Altas temperaturas pueden acelerar el deterioro del aislamiento. Las fuerzas físicas por corrientes altas pueden causar compresión de aislamiento, *insulation wear*, y desplazamiento fricción-inducida en los devanados. ANSI/IEEE define los límites para estas fallas.

#### *Estándares de soporte de sobrecarga- falla a través del transformador*

Los estándares ANSI/IEEE para transformadores de distribución y potencia especificando sus capacidades de sobrecarga y fallas fueron cambiadas alrededor del año 1977 (ver IEEE C57.12.00 y el artículo por Griffin en la bibliografía [51]). La comparación de los cambios es dado en la **Tabla 3.4**. Los múltiplos de la corriente nominal representan el máximo posible y son derivados asumiendo una fuente infinita (impedancia cero). Así, la

máxima falla asimétrica a través del banco transformador con 4% de impedancia será  $1/0.04=25$  pu o 25 veces la corriente nominal-banco, como se muestra.

**TABLA 3.4** ANSI/IEEE ESTÁNDAR CAPACIDAD SOBRECORRIENTE DEL TRANSFORMADOR, MODIFICADO EN 1982<sup>a</sup>.

Múltiplos de corriente nominal	Impedancia Transformador (% de kVA nominal)	Corriente máxima soportada (segundos)	
		1977(1980)	(1973)
25	4	2	2
20	5	2	3
16	6	2	4
14 o menos	8 o más grande	2	5
<sup>a</sup> ANSI/IEEE C57.12.00. Standard viejo fecha 1973, aprobado 1977, pero oficialmente publicado hasta 1980			

La impedancia de la fuente nunca es cero, pero puede ser relativamente muy pequeña a la impedancia banco-transformador, particularmente para una planta industrial o subestación de distribución pequeña que es conectada a un sistema de potencia grande. Por lo tanto, los múltiplos representan un límite máximo.

Después de este cambio en todos los límites a 2 segundos, los ingenieros de protección descubrieron que ellos habían estado usando una curva de sobrecarga térmica (**figura 3-13a**), publicada en [42], para protección sobrecorriente del transformador, y que el nuevo estándar de 2 segundos sería severamente limitada la protección del transformador de potencia. Este dilema ha conducido a más cambios, lo cual fue aprobado en 1982 y están resumidas en la **tabla 3.5** y **figura 3-13**. Estos cambios son incorporados en varios estándares. El conflicto existido es debido a que C37.91 fue una curva de daño térmico, mientras que C57.12.00 fue concertada primeramente con daño



tipo mecánico por fallas a través del transformador. Los últimos cambios (ver **figura 3-13**) cubren ambos límites tanto térmico como mecánico.

**TABLA 3.5 ANSI/IEEE ESTÁNDAR CATEGORIAS SOBRECARGA – FALLA A TRAVÉS DEL TRANSFORMADOR**

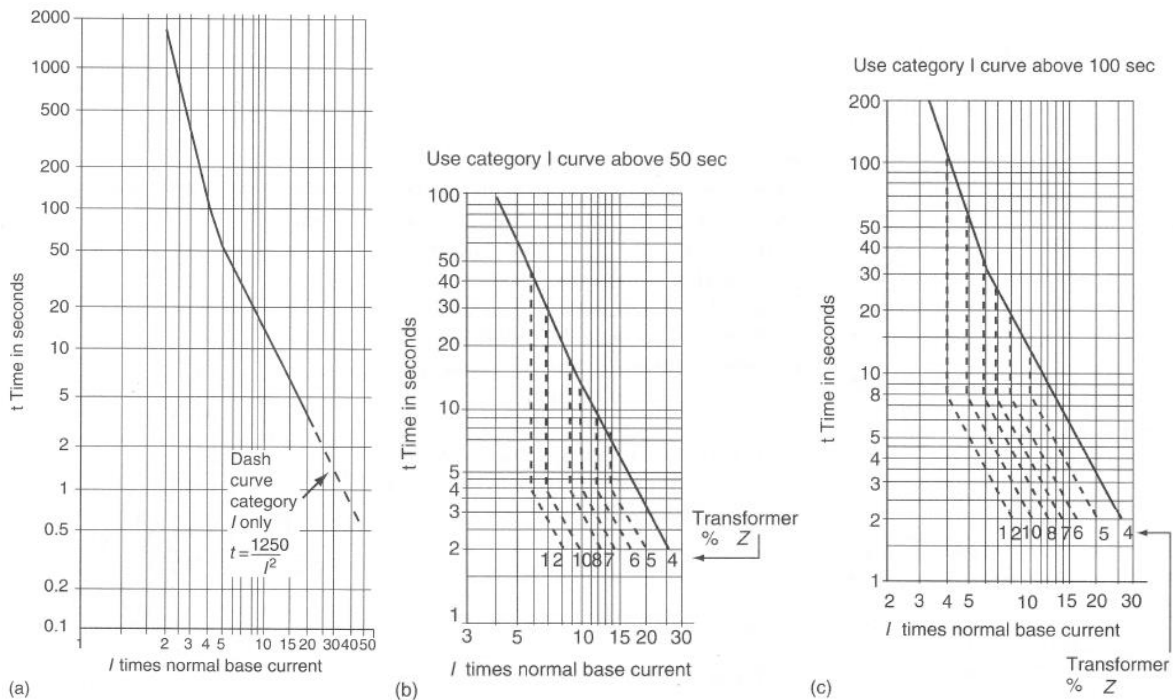
Categoría	Transformador (kVA) nominales		Curva usada (figura 9.17)	Fallas frecuentes <sup>a</sup>	Curvas punteadas aplica desde <sup>b</sup>
	Monofásico	Trifásico			
I	5-500	15-500	a	----	25-501, donde $t = \frac{1250f}{60I^2} = \frac{1250}{I^2}$ a 60 Hz
II	501-1,667	501-5,000	a o a+b	10	70-100% de máxima falla posible donde $I^2t = K$ ; K es determinada en I máxima, donde t=2
III	1,668-10,000	5,001-30,000	a o a+c	5	50-100% de máxima falla posible donde $I^2t = K$ ; K es determinada en I máxima, donde t=2
IV	Sobre 10 MVA	Sobre 30 MVA	a + c	----	Mismo como categoría III

<sup>a</sup>Fallas que ocurren frecuentemente son típicamente más que el número mostrado son para el tiempo de vida del transformador. Fallas infrecuentes son menos que estas mostradas para la vida del transformador. Categoría II y III curva falla- infrecuente (ver figura 9.17a) puede ser usada para protección de respaldo cuando el transformador es expuesto a fallas frecuentes, pero es protegido por relevadores primario de alta-velocidad.

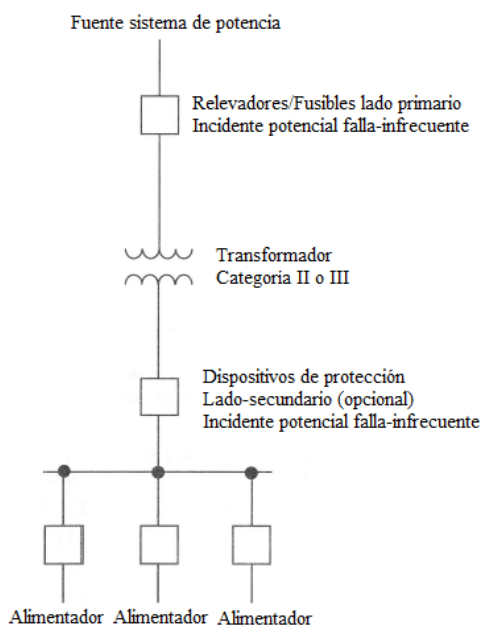
<sup>b</sup>I, corriente de corto-circuito simétrica en por unidad de corriente base normal usando kVA de placa mínimo; en el caso cual la guía cargado- transformador será seguida.

El nuevo estándar tiene seis curvas, cada una para categorías I y IV, y dos para categorías II y III. La curva básica mostrada por la línea sólida en **figura 3-13** para todas las categorías es la misma y, aplica a 4% impedancia del transformador. Estas pueden soportar corrientes de falla a través del transformador que son 25 veces la corriente base nominal por 2 segundos. Las curvas modificadas están mostradas con líneas punteadas y aplica a transformadores con otra impedancia mayor a 4%, dependiendo en la frecuencia de falla en la vida completa de la unidad.

La frecuencia de fallas que podría ocurrir durante la vida entera de un transformador es un estimado basado en experiencia y juicio. Una guía para ayudar a esta determinación es enlistada en la **figura 3-14**. En caso de duda, las curvas de falla-frecuente serán usadas.



**Figura 3-13.** Curvas protección a través de-falla de transformadores: (a) Para categoría I fallas frecuentes o infrecuentes y para fallas infrecuentes con categorías II y III. (b) Para fallas frecuentes con transformadores categoría II. (c) Para transformadores categoría III fallas-frecuentes y categoría IV frecuentes o infrecuentes



Dispositivos protección alimentador: (a) Incidente potencial falla-frecuente para circuitos de distribución (carreras expuestas) (b) Incidente potencial falla-infrecuente para circuitos subterráneos, conductores en conduit, ducto bus, etc. Enlace corto bien-blindado a otros transformadores, etc. La zona protección primaria para cada uno de los dispositivos de protección es entre este dispositivo y el próximo dispositivo agua abajo.

**Figura 3-14.** Guía sujeta determinadas zonas de incidencia potencial infrecuente y frecuente

La aplicación de la protección del transformador para cumplir con este estándar puede ser enlistado como sigue:

1. Determine la categoría desde **Tabla 3.5**
2. En categoría II o III, determine si el servicio esta sujeto para fallas frecuentes o infrecuentes (ver **figura 3-14**)
3. Seleccionar la curva apropiada desde **figura 3-13** (o el estándar ANSI)
4. Es conveniente redibujar la curva en papel log-log usando amperios relacionados al transformador especificado (por unidad podría ser usado, pero como los relevadores y fusibles operan en corriente, amperios es preferible). Cualquiera de las dos corrientes sistema-primario o sistema-secundario puede ser utilizado, y propiamente trasladada como sea requerido a través del banco transformador.

Generalmente, corrientes en el lado-secundario son preferidas para la coordinación con otros dispositivos secundarios río abajo.

5. Selección adecuada de fusibles o relevadores con tap, tiempo dial, y así sucesivamente para proteger el transformador y coordinar con todos los otros dispositivos en el área.

*Ejemplo. Protección de sobrecorriente en el transformador de una planta industrial*

Transformador de 2500 kVA, 12 kV: 480 V con impedancia 5.75 %. La protección consiste de un fusible de potencia y un circuito interruptor de acción-directa bajo-voltaje con unidades de sobrecorriente en serie en el lado secundario y alimentadores asociados. Desde la **tabla 3.5**, este transformador es categoría II, y con *metal-clad* o interruptor secundario metal-encerrado, la frecuencia de falla puede ser considerada infrecuente. Así, la **figura 3-13a** es aplicable.

Esta curva es redibujada en la **figura 3-15**, donde la abscisa son amperios secundarios. Esto es

$$I_{por\ unidad} = I_{nom} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 0.48} = 3007\text{ A a } 480\text{V} \quad (3.4)$$

Y así para varios tiempos:

Tiempo (segundos) desde Figura 3.13a	por unidad desde Figura 3.13a	Amperios equivalentes a 480 V (pu X 3,007)
1000	2.3	6,916
300	3.0	9,021
100	4.0	12,028
50	5.0	15,035
12.5	10.0	30,070
4.13	17.39	52,296

Para 50 segundos o menos,

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (3.5)$$

La corriente máxima posible con una fuente infinita es

$$I = \frac{1}{0.0575} = 17.39 \text{ pu} \quad (3.6)$$

Donde

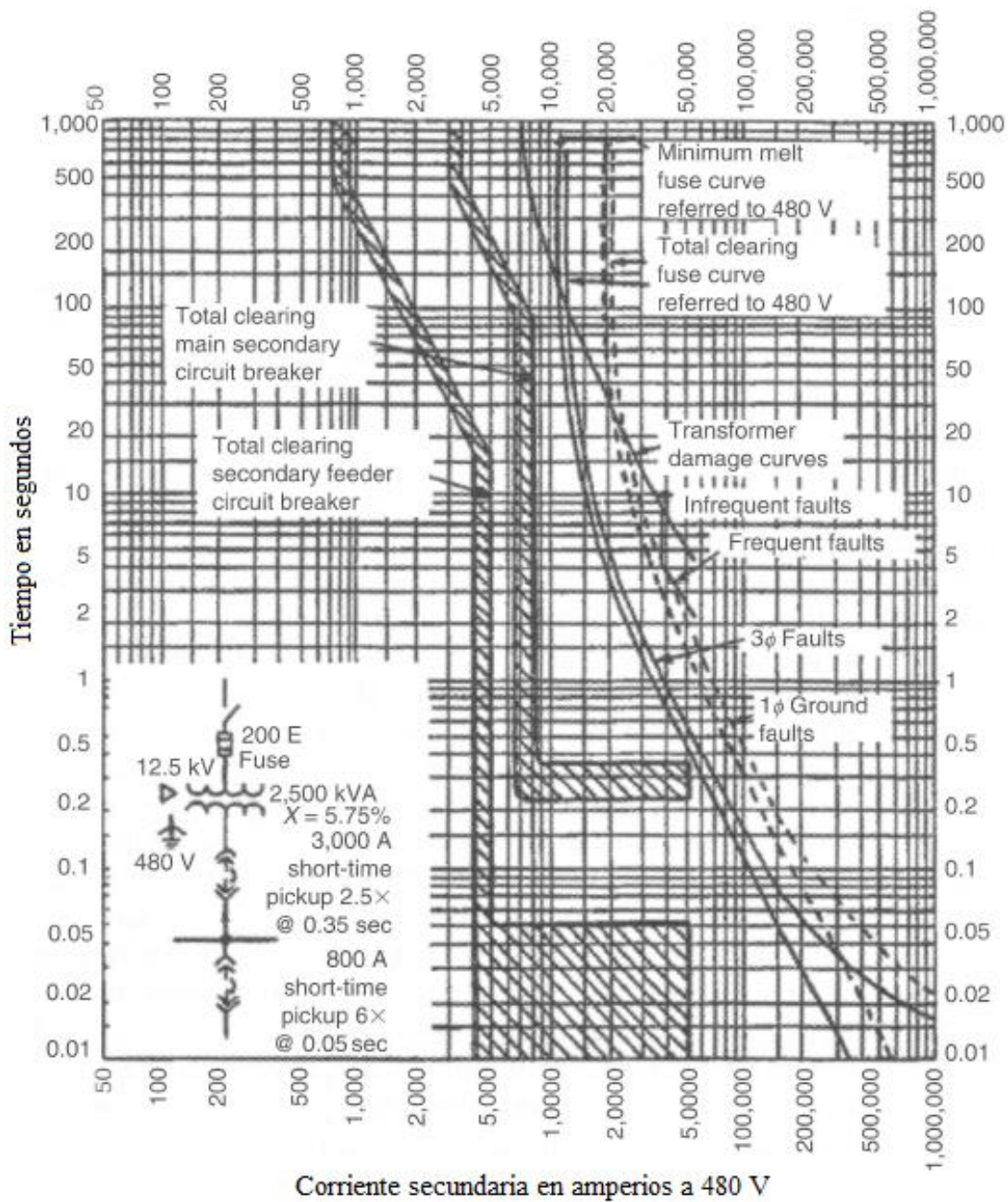
$$t = \frac{1250}{17.39^2} = 4.13 \text{ segundos} \quad (3.7)$$

Así es la terminación de la curva de protección del transformador a través de-falla.

En el lado primario, la corriente nominal es:

$$I_{por\ unidad} = I_{nom} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 12} = 120.3 \text{ A a } 12 \text{ kV} \quad (3.8)$$

Para evitar la operación en magnetización inrush, la carga transitoria tiempo-corto, y así proveer protección para fallas secundarias, valores nominales típicos del fusible son seleccionados a 150% de la corriente nominal. Tal que  $1.5 \times 120.3 = 180.4 \text{ A}$ , por consiguiente, un fusible de 200 A fue seleccionado y se utilizó su característica de tiempo gráfica. Ambas curvas de tiempo de liberación y mínima fundición son mostradas. Como las magnitudes de corriente en el primario son solamente 57.7% de la corriente secundaria para fallas fase-a-tierra, las curvas del fusible son movidas a la derecha por el valor del factor de  $1.73 (\sqrt{3})$  en adición a la relación devanado-transformador (ver **figura 3-15**).



**Figura 3-15.** Protección de sobrecorriente para un transformador categoría II sirviendo un sistema secundario de falla-infrecuente

Las magnitudes de falla trifásica son las mismas en por unidad (ver **figura 3-16**). Las curvas fusible se extienden para las corrientes más altas, y pueden utilizarse fallas del lado de alta (en amperios primario) entre el fusible y transformador.

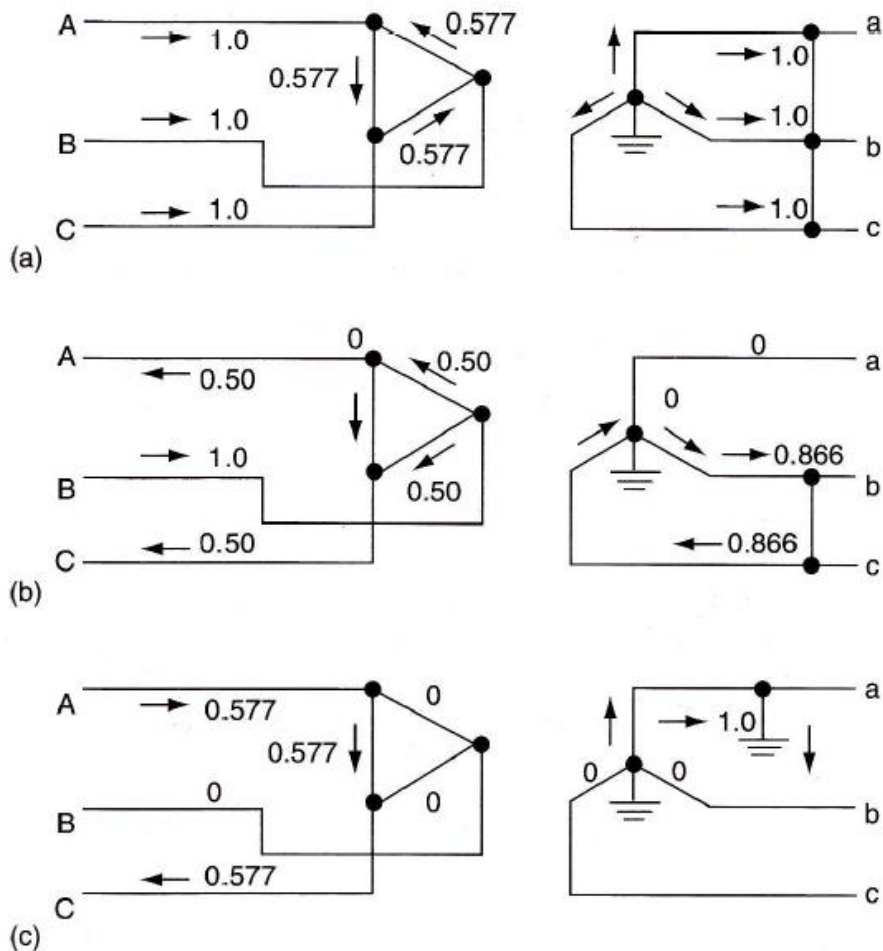


Figura 3-16. Revisión de fallas a través de banco transformador delta-estrella (corrientes se muestran en por unidad): (a) fallas trifásicas; (b) fallas fase-a-fase; (c) fallas fase-a-tierra, donde  $X_1=X_2=X_0$ .

El secundario del transformador y los alimentadores tienen un circuito interruptor bajo-voltaje con unidades de sobrecorriente. Estos tienen elementos instantáneos tiempo-largo y tiempo-corto. Las características son una banda entre un tiempo de apertura y el tiempo de reposición (ver **figura 3-15**). Para este ejemplo, la unidad tiempo-largo del interruptor transformador es ajustada para arrancar en  $1.2 I_{nominal}=1.2 \times 3007 = 3608$  A a 480 V, donde el tiempo es 450 segundos. El tiempo-corto de arranque es ajustado a  $2.5 I_{nominal}$ , o  $2.5 \times 3007 = 7518$  A a 480 V. Un tiempo de retardo de 0.35 segundos es usado para proveer coordinación con los alimentadores. Los circuitos de interrupción del alimentador son ajustados con la unidad de tiempo-largo  $1.2 I_{nominal}=1.2 \times$

800 = 960 A y el tiempo-corto ajusta instantáneamente (0.05 segundos) a 6 veces 800, o 4800 A a 480 V.

La gráfica de protección de **figura 3-15** muestra buena protección y coordinación excepto para fallas ligeras en el secundario. Las curvas del fusible primario cruzan la curva de protección contra daño del transformador en 13,000 A para fallas trifásicas en lado primario del transformador y en 23,000 A para fallas fase-a-tierra en lado secundario. Esto significa que el transformador no es protegido de acuerdo al estándar para fallas de estas magnitudes – o menos --- por los fusibles. Tales fallas son posibles. Si ellas están en el transformador, el daño ya ha ocurrido y puede venir más fuerte antes que la fuente pueda ser removida por el fusible. Si ellas están entre el transformador y el interruptor secundario, debe también desarrollarse una falla más grande, lo cual significa más daño y más tiempo; sin embargo, la probabilidad de fallas en esta área usualmente será pequeña.

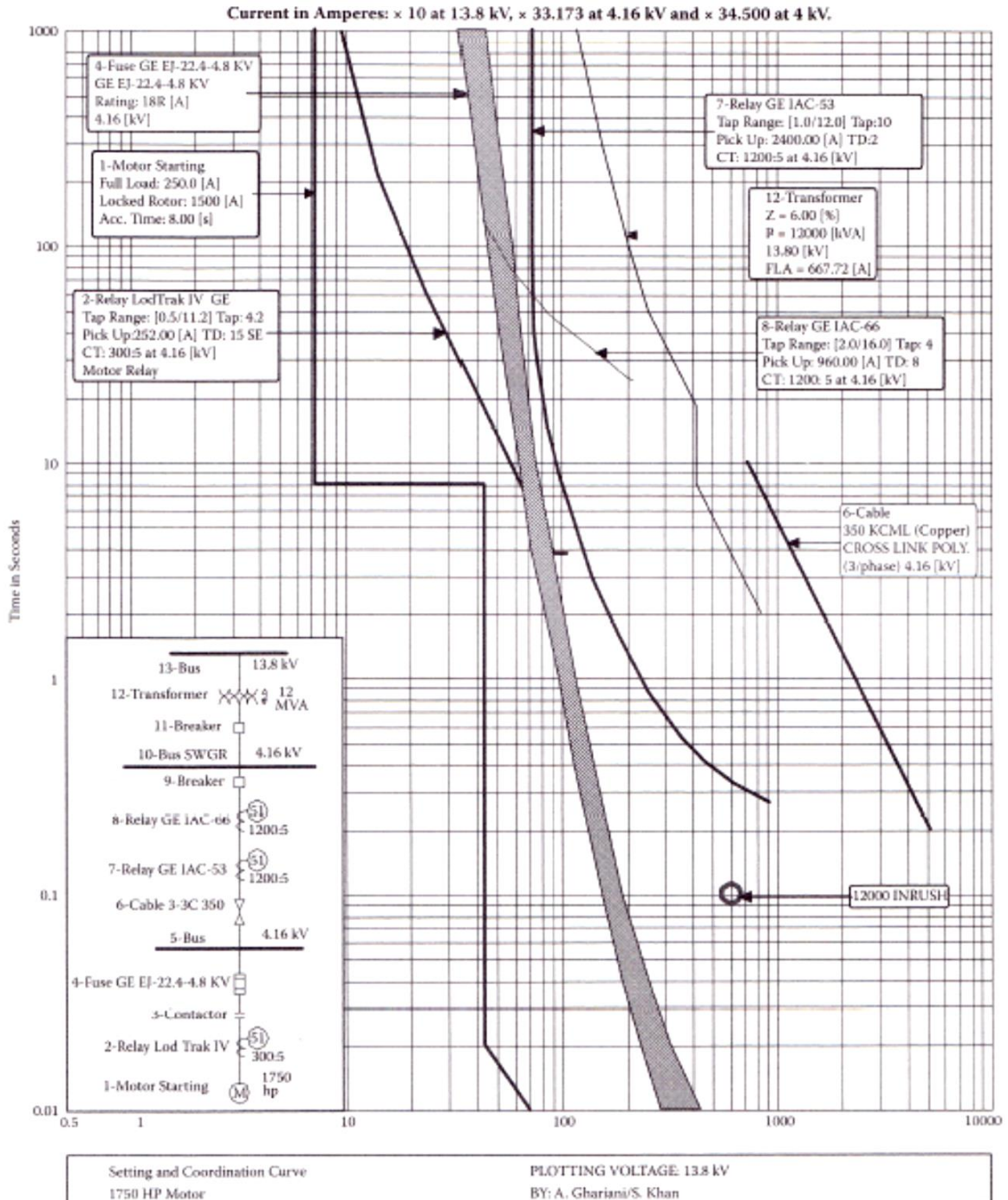
La curva de falla-frecuente modificada de la **figura 3-13b** ha sido mostrada en la **figura 3-15** para comparación. Como se observa, la protección por fusible de lado primario del transformador para fallas fase-a-tierra en el secundario es muy marginal [38].

### ***3.4.3 Protección en ramal transformador-cable-carga.***

En los sistemas de potencia industriales se encuentran arreglos de elementos primarios como transformador-cable-motor que utilizan diversos dispositivos de protección de sobrecorriente. Al realizar la coordinación de protecciones de este arreglo suministro-consumo se ve la necesidad de modificar la forma de la curva de algunos dispositivos de protección para disminuir CTI, adecuar mejor la coordinación con la curva de daño de los elementos protegidos y también con la posibilidad de reducir el número de dispositivos de protección como se presenta en [13]. En **figura 3-17** se muestra el sistema de alimentación-consumo industrial con esta problemática y sus curvas características de protección; se ilustran los ajustes y coordinación de un motor 1750 hp y un alimentador



suministrando potencia al centro de control de motores. En este caso, un GELoadtrak fue usado para protección de motor.



**Figura 3-17.** Coordinación y ajuste de curvas para un motor de 1750-hp

El relevador sobrecorriente del alimentador principal, un GE IAC-53, fue ajustado para proteger el alimentador contra corto circuito y coordinado con el fusible 18R (390 A) del motor. Este relevador es ajustado a 2400 A primario para lograr el objetivo. Sin embargo, este alto ajuste viola los requisitos del código eléctrico.

El ajuste máximo de relevador sobrecorriente del alimentador según lo permitido por la regla del código eléctrico corresponde a la suma de 390 A (mayor fusible) más 640 A (corriente a plena carga de motores restantes). Para mantener la coordinación y cumplir los requisitos del código se añadió otro relé (51 C), un IAC-66 con característica de tiempo largo fijado en 960 A. El relevador extra provee un tiempo de disparo largo para fallas nivel-bajo y condiciones de alta sobre carga. Sin embargo, como puede ser visto, los otros elementos ya prevén un margen significativo sobre la curva de daño-cable. Como se mencionó anteriormente, aunque estas figuras ilustran el uso de relés electromecánicos, las curvas usadas son todavía disponibles en relevadores digitales modernos, y estas curvas de coordinación seguirían siendo válidas para la aplicación de relés digitales.

#### ***3.4.4 Protección de motores de inducción usando diferentes características y ajustes del relevador.***

Hay dos razones para usar el modelo del rotor en el estado operativo: la primera es que el modelo de rotor en corriente de secuencia positiva y negativa, representa el calentamiento; conserva la historia térmica en todo momento a lo largo de la puesta en marcha y ciclo de funcionamiento. La segunda es que es una práctica de la industria para publicar límites térmicos de la sobrecarga y de rotor bloqueado como una curva continua como se ilustra en la **figura 3-18**, que es la característica tiempo-corriente del modelo térmico graficado con el motor en temperatura ambiente. A pesar de la diferencia en los watts de entrada y umbrales, las características de los estados en marcha y en arranque son una curva continua [39]. Esta condición se produce cuando el umbral de rotor bloqueado es fijado en 0.8 de  $I_L^2 \cdot T_a$ , y el factor de servicio del motor es 1.2.

Como un resumen final, asignar valores estándar de 3 y 1.2 a los cocientes  $R_1/R_0$  y  $T_a/T_o$ , respectivamente, permite que los parámetros del modelo sean determinados a partir de cinco valores fundamentales:

FLA Corriente a carga plena nominal del motor en amperios secundario

LRA Corriente de rotor bloqueado nominal en amperios secundario

LRT Tiempo límite térmico de corriente de rotor bloqueado

TD Tiempo dial para viaje de temperatura en por unidad de LRT

SF Factor de servicio nominal del Motor

#### PROTECCIÓN CONTRA FALLAS.

Además del elemento térmico descrito anteriormente, elementos de fase y tierra de tiempo-definido e instantáneos proporcionan protección por fallas en la conexión del motor y fallas interna en el mismo motor. Las características de estos elementos se representan gráficamente en la **figura 3-18**. Un ajuste de tiempo-definido de unos 6 ciclos permite que el arranque se establezca en 1.2 a 1.5 veces la corriente de rotor bloqueado para evitar el disparo en la reactancia inicial  $X_d''$  de corriente Inrush (se muestra ampliada). El elemento instantáneo se encuentra a dos veces de la corriente de rotor bloqueado para la apertura rápida de fallas de corriente altas. De manera similar para elementos de tiempo-definido e instantáneo, son usados para protección de falla a tierra.

El usar varias curvas de diferentes características y diversos ajustes se vuelve complicado y con mayor probabilidad de error por ser muchas condiciones. Pero la propuesta de la característica no convencional del capítulo 4, resuelve el problema con una sola curva y un solo ajuste, como se presenta en el apartado 5.3 del capítulo 5.

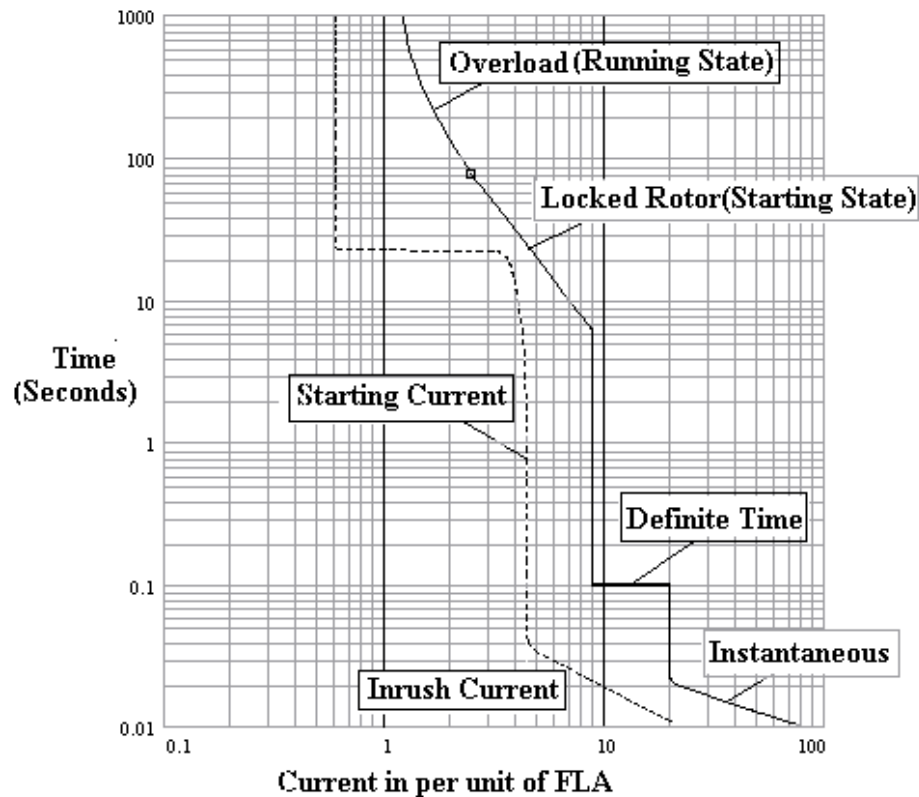


Figura 3-18. Características de protección y corriente de arranque del motor

### 3.4.5 Coordinación entre curvas seccionadas de interruptor automático y relevador.

Se presenta un método para proteger equipos de potencia de esfuerzos prolongados en condiciones de alta corriente de falla, esto se logró mediante un dispositivo de protección universal con una plataforma de *software* que puede facilitar el diseño de curvas características (TCC) tiempo-corriente de diferentes formas, todas en el mismo *hardware*. Cuando se combinan, el control del restaurador y el tiempo de respuesta del relevador son más rápidos y más precisos que con medios convencionales. Los tiempos de respuesta reducido del dispositivo de protección son buscados por diferente combinaciones de TCCs sobrecorriente.

El caso de coordinación se presenta para un sistema típico de distribución con un esquema de lazo que contiene nuevos relevadores multifunción y restauradores. Las

ventajas del dispositivo usando funciones integradas en relevadores de sobrecorriente estándares y controles del restaurador son ilustrados. Un análisis comparativo es presentado para cuantificar la reducción en valores dejado-por  $I^2t$  y esfuerzo de equipo que se pueden realizar utilizando este método durante condiciones de alta corriente de falla [15].

El inconveniente en esta metodología de protección (híbrida o de combinación de diversas curvas de protección) es de tener que seleccionar y ajustar muchos parámetros de curvas características de protección para la protección de un solo elemento, el uso de dispositivos de protección costosos y además de tener que hacer controles de lógica de maniobra entre relevador y restaurador; siendo una metodología muy complicada y es donde se considera la limitación de la protección.

Proceso de coordinación de un esquema de lazo, representado en **figura 3-19**:

El primer elemento programado se utiliza para coordinar la operación del dispositivo para las corrientes de falla altas cerca de la subestación. El segundo elemento coordina para corrientes de falla en el centro de la línea, mientras que el tercer elemento coordina para corrientes de falla en el extremo de la línea.

El segundo y tercero elemento de la protección de sobrecorriente de tiempo-definido se coordinan con el dispositivo de protección de sobrecorriente instantáneo de la línea descendente. Esto permite que el dispositivo de línea ascendente responda más rápido para las corrientes de falla en el medio y al final de su zona de protección. Además, la integración reduce el número de aparatos por subestación. El esquema de protección está integrado en el *software* y en una plataforma de *hardware* de protección, control y medición del alimentador, que cumple con el concepto de "un dispositivo de alimentación completo".

En algunas aplicaciones, este dispositivo puede proteger múltiples alimentadores. Otra plataforma de *hardware* puede integrar la copia de seguridad de protección para múltiples alimentadores o toda una subestación.

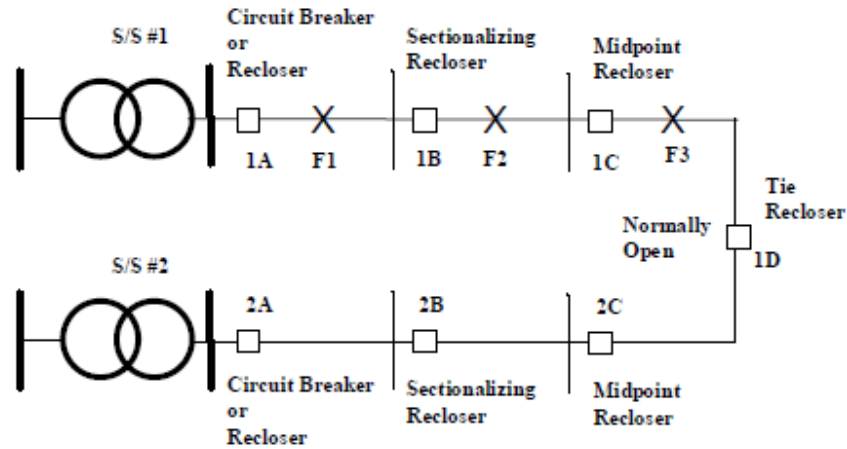


Figura 3-19. Esquema lazo con cinco-restauradores

*Operación de un esquema de lazo con cinco-restauradores (Figura 3-19).*

Un esquema de lazo de cinco-restauradores que consta de los siguientes restauradores 1B, 1C, 2B, 2C y 1D coordinando con los interruptores automáticos/restauradores 1A y 2A. Cada alimentador se divide en tres porciones de carga aproximadamente igual. El impacto de una interrupción puede reducirse a 33% de lo que ocurriría en un alimentador radial. Una falla permanente en F1 da lugar a la operación y el cierre de 1A del dispositivo alimentador. Los controles de LS restauradores 1B, 1C y 1D detectarán pérdida de tensión y empiezan a cronometrar. El retardo del restaurador 1B expira en primer lugar, indicando la apertura de 1B y fijándolo hacia fuera. Cuando el retardo del restaurador 1C expira, su control vuelve a una condición de disparo mínimo alternativo programado que prepara la protección coordinada contra otras fallas que puedan ocurrir detrás del alimentador. Cuando expira el retardo de restaurador 1D, este se cierra y restaura el servicio a las secciones falladas entre 1B y 1D. Después de estas operaciones automáticas, la sección fallada del alimentador es seccionada, y los restantes

dos tercios del alimentador se mantiene en servicio. Para fallas permanentes en F2, 1B opera y bloquea.

Los restauradores 1C y 1D detectan pérdida de tensión y activan sus cronómetros. El retardo del restaurador 1C vence en primer lugar, y su control vuelve a sus niveles de disparo mínimo alternativo con una característica de no-cierre momentánea. Cuando expira el retardo de tiempo del restaurador 1D, se cierra. El restaurador 1C detectará la corriente de falla, por lo cual dispara y bloquea. Las Interrupciones debido a la falla F2 se limitan automáticamente a un tercio del alimentador.

Con múltiples niveles de elementos de sobrecorriente de tiempo-definido se permite al dispositivo de línea ascendente responder más rápido para corrientes de falla en la mitad y al final de la misma zona de protección. Esto reduce significativamente el esfuerzo en el equipo del sistema de distribución durante fallas de corriente altas.

Los siguientes ejemplos demuestran cuánto tiempo de respuesta del nuevo dispositivo multifunción pueden ser reducidos comparados con los dispositivos convencionales.

#### *Ajustes convencionales*

Para ajustes convencionales, sólo los elementos de fase (retardo-tiempo e instantáneos) se considerarán (**figura 3-20**). Por razones de claridad las curvas TCC rápidas de control del restaurador han sido omitidas y sólo las curvas TCC de retardo son mostradas en la **figura 3-20**.

#### *Ajustes mejorados*

Para la configuración mejorada sólo los elementos tiempo-retardo, tiempo-definido e instantáneos por fase serán considerados (**figura 3-21**). Los elementos de tierra serán coordinados en la manera similar. Por razones de claridad se han omitido las curvas TCC rápidas del control restaurador y sólo las curvas TCC retraso se muestran en la **figura 3-21**.

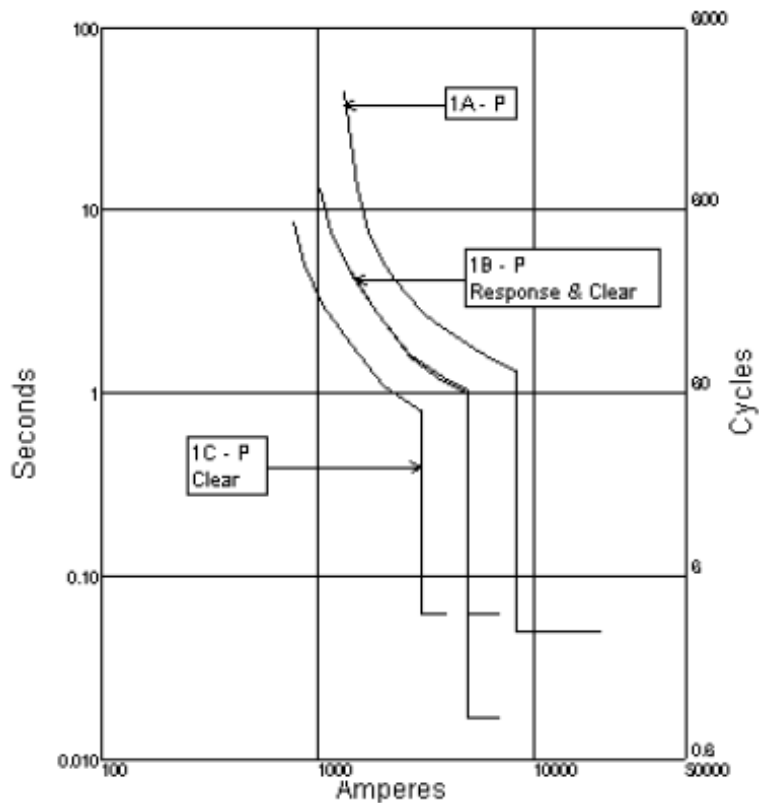


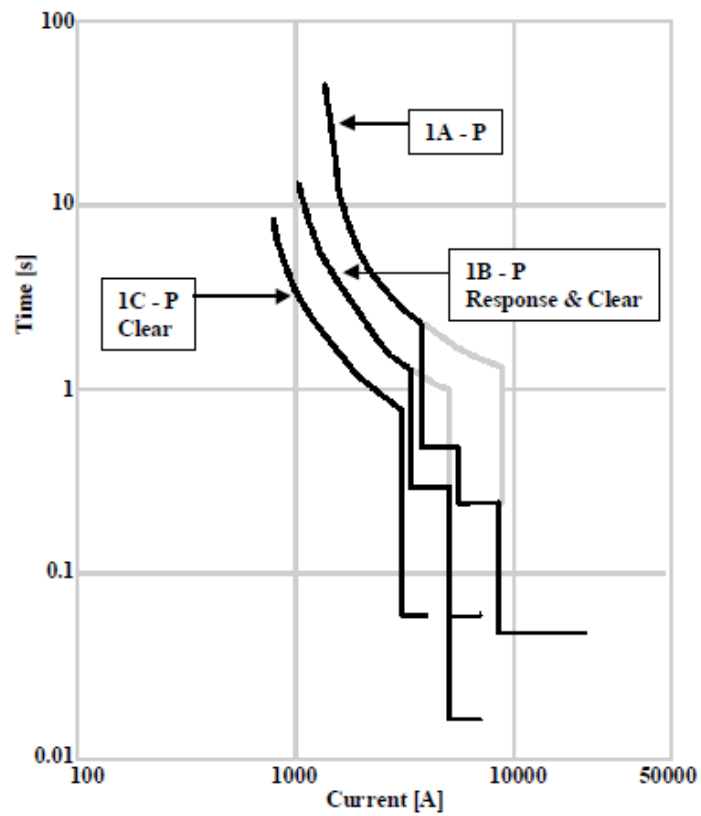
Figura 3-20. Coordinación de fase ---Ajuste convencional

Dispositivo 1B para una falla 5,000 A funcionará 1 s más rápido con ajustes mejorados que con la configuración convencional, mientras que el dispositivo 1A para fallas de 5,500 A - 8, 400A opera en 1.5 s más rápido. Este reduce significativamente los valores  $I^2t$  a través de los equipos de potencia, así como transformadores, que por lo tanto serán menos esforzados y tienen más vida útil. Para cuantificar los valores de  $I^2t$  que serán reducidos durante condiciones de corrientes de falla altas, un análisis comparativo fue realizado y los resultados presentados están en la **tabla 3.6**. Para una falla de 5,000 A, el nuevo dispositivo multifunción operará más rápido y reducirá los valores  $I^2t$  en 4.4 veces comparado con los dispositivos convencionales, y para una falla de 8,400 A, los nuevos dispositivos multifunción reducirán los valores  $I^2t$ , 7 veces en comparación con dispositivos convencionales.



**Tabla 3.6** Comparación de valores  $I^2t$  para dispositivos de protección nuevo multifunción y convencional

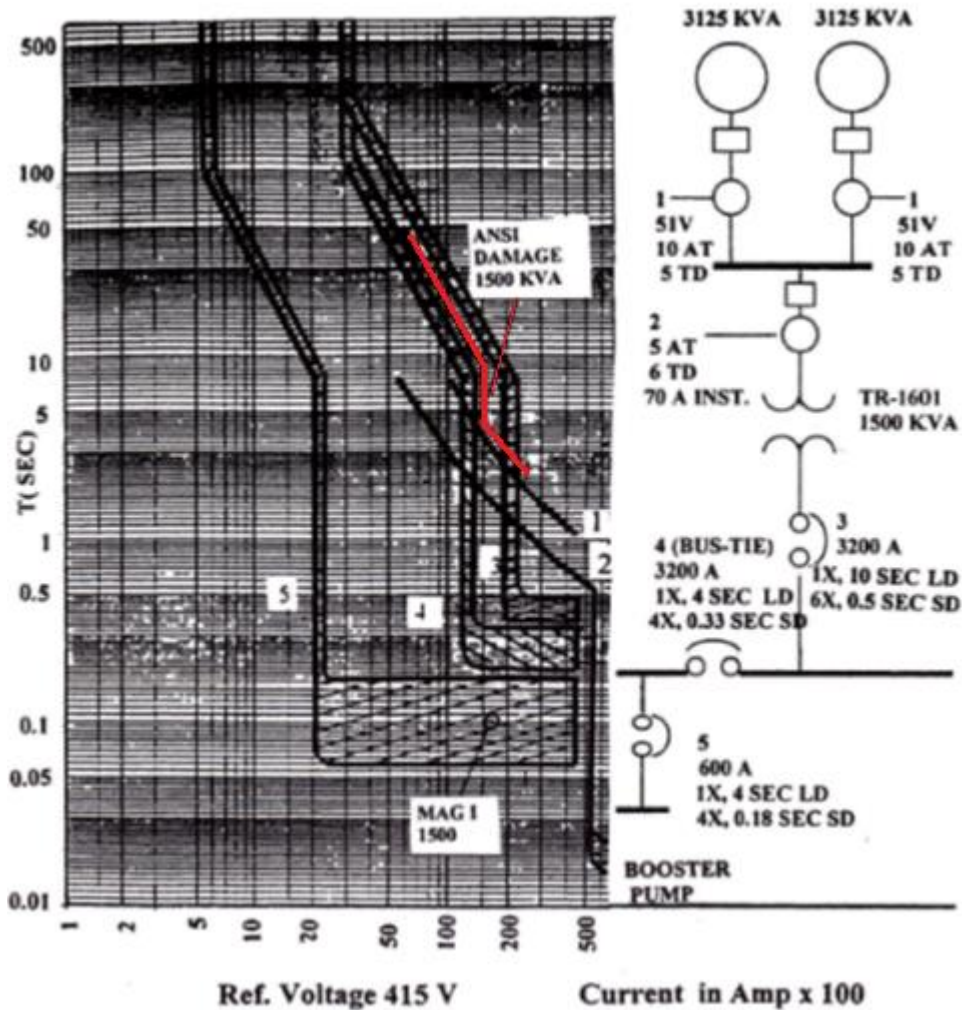
Dispositivo Protección	$I^2t[A^2s]$			Relación
	Corriente Falla	Ajustes Estándar	Ajustes Mejorado	
1B	5,000 A	33,000,000	7,500,000	4.4
1A	5,500 A	70,000,000	15,000,000	4.6
	8,400 A	120,000,000	17,000,000	7.0



**Figura 3-21.** Coordinación de fase – Ajuste mejorado

### 3.4.6 Coordinación cuando se incrementa la capacidad de carga y generación.

El siguiente problema es relacionado con los ajustes de dispositivos de protección y los nuevos niveles de corto circuito como es ilustrado en la **figura 3-22**. La figura muestra la configuración vieja y las curvas de coordinación de las bombas *Booster*. Estas bombas fueron originalmente alimentadas a través de un transformador, y el interruptor bus-enlace mostrado en la figura se estableció en “normalmente cerrado”. Como se muestra en las curvas que se presentan en la **figura 3-22**, un problema de coordinación aparece en el rango entre 5 – 15 kA.



**Figura 3-22.** Bombas Booster: parte de la red de una planta industrial de aceite y sus curvas de coordinación.

Estas bombas en la nueva situación son alimentadas a través de 2 transformadores. Con las nuevas unidades de generación acopladas, el nivel de corto circuito puede incrementarse a un nivel peligroso. El nuevo valor de corriente de corto circuito es más alto que la capacidad de corto circuito de algunos interruptores de carga. Para evitar reemplazar estos elementos, fue recomendado ajustar el interruptor de enlace en “normalmente abierto” como un modo de limitar la corriente de corto circuito [40]. El interruptor será cerrado solamente si uno de los dos transformadores esta fuera.

Teniendo el interruptor bus-enlace en la posición “normalmente abierto” no resuelve todos los problemas, por lo que el reajuste de los dispositivos de protección fue necesario. Para eliminar la interferencia entre el circuito interruptor 3 y el circuito interruptor 4, los ajustes de disparo retardo-largo (LD) y el retardo corto (SD) de los tres interruptores fueron ajustados como se muestra en **figura 3-23**.

Se puede ver en la **figura 3-23** que la coordinación entre los diferentes dispositivos de protección es ahora mucho mejor pero no perfecta. Todavía hay un problema de coordinación entre el relevador 2 y el circuito interruptor 3. Una posible solución para lograr la coordinación entre el interruptor 3 y el relevador 2 es aplicar una curva flexible en el relevador 2 con un relevador digital en el cual se pueden definir sus propias curvas características. Esto da al ingeniero de protección una amplia flexibilidad para resolver cualquier problema de coordinación.

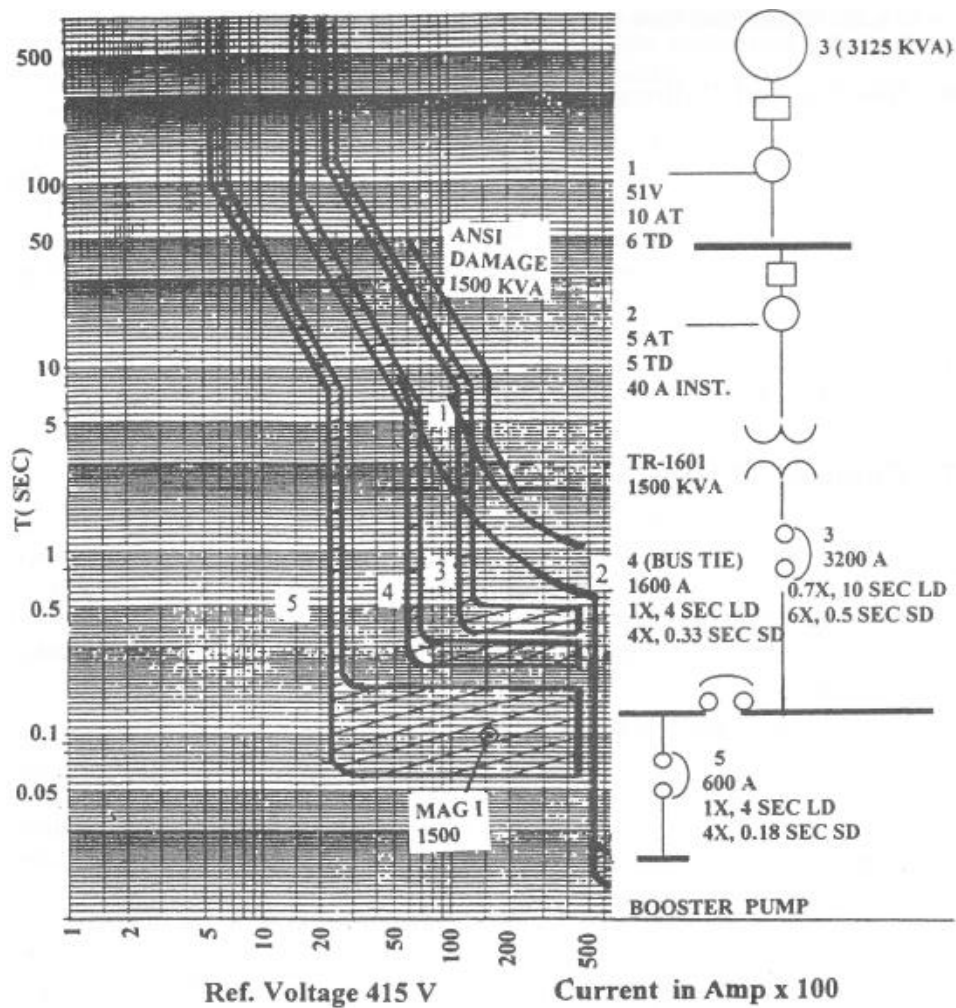
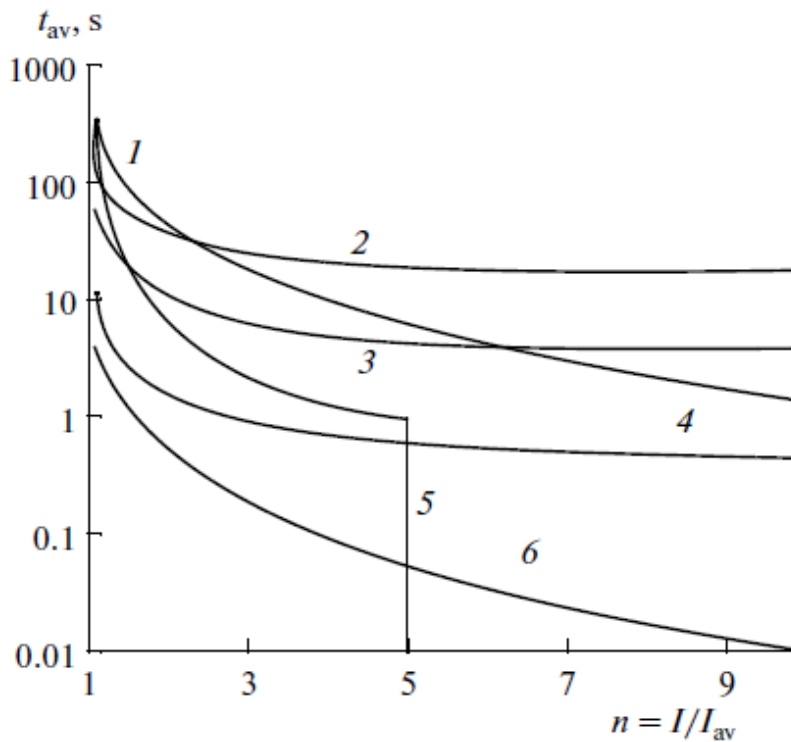


Figura 3-23. Coordinación de curvas con sistema modificado.

### 3.4.7 Limitación del relevador electromecánico y mejora con relevador estático.

Cuando se construyen relevadores de protección y sistemas de automatización (RPA), otro importante inconveniente de los relevadores electromecánicos se manifiesta; es decir, características tiempo-corriente son de un solo tipo, así que no se pueden ajustar tan bien a las características de relevadores fuera de uso, motores eléctricos, interruptores automáticos y otros dispositivos de protección del nivel más bajo. La **figura 3-24** muestra que las características del relé RT\_80 están en pobre acuerdo con las características del motor de inducción y el interruptor en baja sobrecarga.



**Figura 3-24.** Comparación de características de relevador RT-80 y equipo adjunto: (1) características de sobrecarga de motor de inducción (modelo exponente simple); (2) características de relevador RT-80 ( $t_{10}=16$  s); (3) características relevador RT-80 ( $t_{10}=4$  s); (4) características relevador RT-80 ( $t_{10}=0.5$  s); (5) características circuito interruptor; (6) características fusible PKT.

Ya que esta clase de relevadores de sobrecorriente han sido utilizados durante mucho tiempo en los esquemas de protección de redes de distribución, es relevante para el desempeño de un relevador que carece de estas deficiencias análogas electromecánicas que tenga un conjunto de características tiempo-corriente suficientes y necesarias que sea flexible con las características de protección del equipo adjunto [16].

#### *Mejoras logradas con el relevador estático*

- (1) El nuevo relevador estático de sobrecorriente RST80 tiene las siguientes ventajas técnicas significativas en contra parte del electromecánico:
  - a) No hay necesidad para mantenimiento especial o trabajo asociado con el desensamble del relé y su ajuste de mecanismos.
  - b) Derivado/no derivado de corrientes arriba de 200 A.

- c) Rango de temperatura de operación inicia desde  $-40^{\circ}\text{C}$ .
  - d) Tres tipos de características tiempo-corriente (RT-80, B, C) y una característica independiente.
- (2) La capacidad de seleccionar uno de varios tipos de características tiempo-corriente del relevador RST80 hace posible buscar un mejor acuerdo con las características de la protección de equipos adjuntos con las características de relés electromecánicos.
- (3) No hay “mejor” característica para todas las situaciones y, en cada caso, será seleccionado tomando en cuenta los parámetros de seguridad del equipo adjunto.

### **3.4.8 Mejora de coordinación convencional y característica estándar.**

Un nuevo método de coordinación avanzada para una protección optimizada de ajuste de tiempo basado en una nueva característica de disparo no estándar para relevadores de protección de sobrecorriente se presenta en [17]. Está dirigido para disparo de falla selectiva con tiempo de disparo más corto que con características estándares y métodos de coordinación convencionales. Una comparación con las características estándares y métodos de coordinación convencionales muestran una ventaja notable de ajustes en sus tiempos de disparo promedio y máximo lo cual puede ser logrado usando este nuevo método [17].

#### *Características de sobrecorriente convencional*

En la **figura 3-25** se muestra una estructura de red de alimentación-simple típica representando el gráfico nivelado y los tiempos de disparo efectivos  $t_{peff}$  de los relevadores aplicados a la red. El comportamiento de la corriente de falla trifásica  $I_{sc3p}$  y la característica de disparo efectivo  $t_{peff}(I)$  de cada relevador de sobrecorriente de tiempo definido (DTC) y de cada relevador de tiempo mínimo definido inverso (IDMT) en estaciones 1, 2, y 3, dependiendo de la ubicación de la falla río abajo está ilustrado debajo del arreglo. En caso de relevadores DTC en **figura 3-25 (b)**, las características de disparo efectivo son independientes de la ubicación de falla. El intervalo de tiempo de ajuste  $CTI$

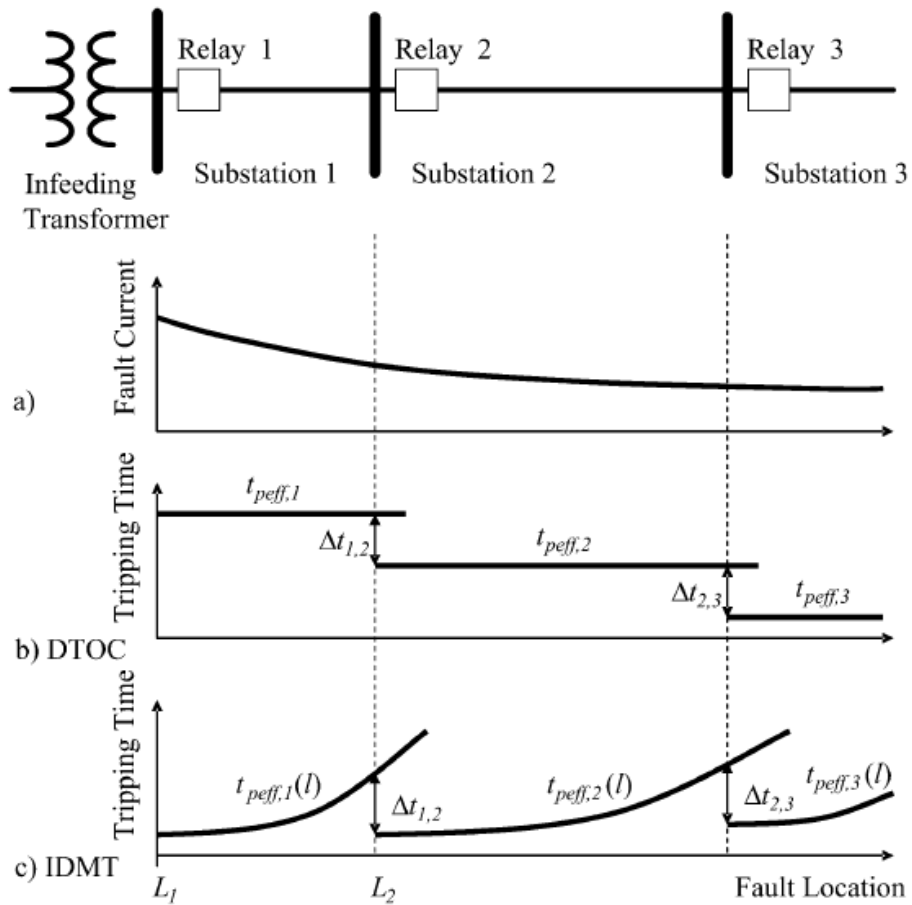
es constante para todas las ubicaciones de falla río abajo y la selectividad es censurada en cualquier caso. Cuando se mueve la falla agua arriba, la corriente de falla se incrementa en **figura 3-25 (a)**, pero el tiempo de disparo también incrementa causado por el tiempo de ajuste en **figura 3-25 (b)**. Esto es contradictorio; las fallas más fuertes deberán ser liberadas rápidamente.

Un relevador IDMT viene a cubrir este problema en [36]. El tiempo de disparo decrece mientras la ubicación de falla se mueve río arriba **figura 3-25 (c)** y la corriente de falla incrementa. Por otro lado, el tiempo de ajuste *CTI* debería ser checado en cada ubicación del relevador para ser suficientemente selectivo [36]. Más los relevadores IDMT tienden a tener tiempos máximos de disparo más altos con respecto a los relevadores DTOC. Además las características estándar IEC o ANSI, los relevadores numéricos provén la oportunidad de características de disparo de tiempo-definido lo cual no están sujetos a cualquier estándar [41].

En este respecto, una nueva característica de disparo, la cual une o junta los pros de IDMT— tiempo de disparo reducido a corrientes más altas y DTOC—selectividad a pesar de la corriente, es posiblemente realizable.

#### *Nueva característica y coordinación avanzada.*

Las siguientes tres restricciones son estipuladas para unir los pros de calibración DTOC y IDMT. Los tiempos de ajuste serán constantes y, por consiguiente, independientes de la ubicación de falla y corriente de falla para censurar selectividad sin ninguna pérdida de tiempo de disparo dada por las características DTOC. Además, la nueva característica de disparo dependerá sobre la corriente de falla así como la característica IDMT reduciendo el tiempo de disparo cuando la falla se mueve más cerca de la fuente.



**Figura 3-25.** Estructura de red típica y gráficos: comportamiento de a) corriente de falla trifásica, b) tiempo de disparo definido efectivo, c) tiempo de disparo inverso efectivo.

El siguiente planteamiento de una nueva característica de disparo es propuesto:

$$t_{p,n}(I_{sc}) = a \cdot \log(I_{sc}) + b_n \quad (3.9)$$

Está basado sobre la función logarítmica y los coeficientes **a** y **b<sub>n</sub>**.

El nuevo método de optimización ha sido aplicado en la gráfica de ajuste de la **figura 3-25**. Los cálculos han sido realizados usando una caja de herramienta de cálculo de MATLAB. Los coeficientes resultantes en  $a = -1.05$ ,  $b_1 = 1.33$ ,  $b_2 = 0.98$ , y  $b_3 = 0.63$  correspondientes a las siguientes 3 características de disparo de los relevadores 1, 2 y 3:

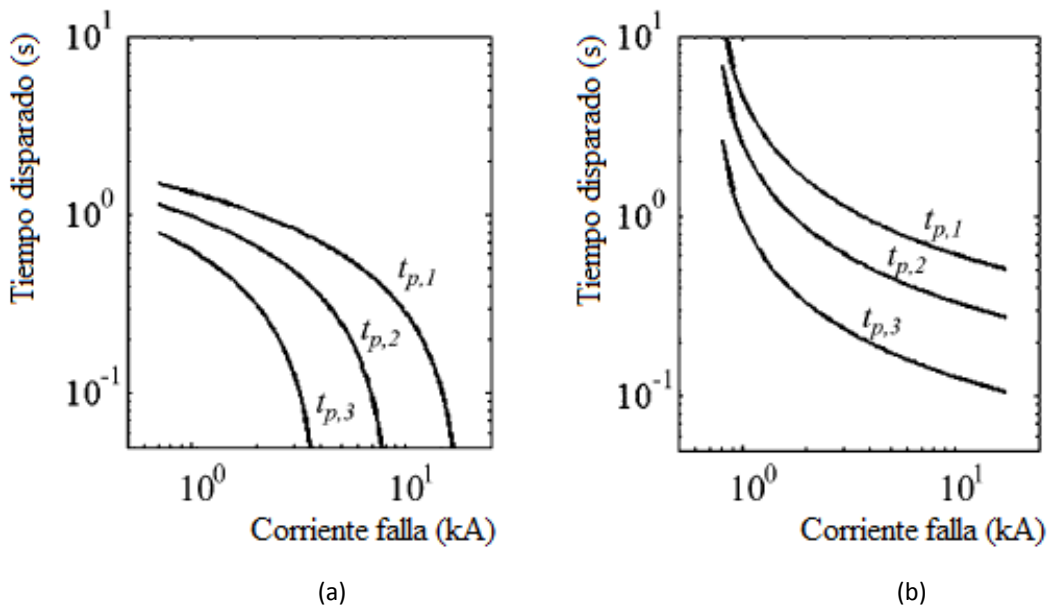


$$\begin{aligned}
 t_{p,1}(I_{sc}) &= -1.05 \log(I_{sc}) + 1.33 \\
 t_{p,2}(I_{sc}) &= -1.05 \log(I_{sc}) + 0.98 \\
 t_{p,3}(I_{sc}) &= -1.05 \log(I_{sc}) + 0.63
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

Ver en la **figura 3-26(a)** en comparación con la característica de disparo IDTM en **figura 3-26(b)**.

*Consideraciones en la aplicación de la nueva característica logarítmica*

En esta nueva metodología se mejora la coordinación en las corrientes máximas de falla, reduciendo tiempos de disparo y se tiene que la forma de la curva en esta región es como un equivalente a la unidad instantánea. Pero en la parte media de la curva se suben o incrementan los tiempos de respuesta y no se sigue la forma típica de las curvas estándares tipo exponencial con curvatura convexa. Por lo tanto, en los valores mínimos de la corriente de falla se pierden la forma asintótica de las curvas características estándares; y se puede dificultar una buena coordinación con otras curvas estándares de otros dispositivos de protección sobrecorriente en la parte de corrientes de sobrecarga y corrientes mínimas de falla.



**Figura 3-26.** (a) Nueva Característica de disparo no estándar en comparación con (b) la característica de disparo IEC-estándar IDTM.

# Capítulo 4

## Diseño de un nuevo algoritmo al relevador de sobrecorriente

---

### 4.1 Introducción

La continuidad de servicio es uno de los índices más importantes en los sistemas de distribución eléctrica, permite que los consumidores estén operando sin afectar sus procesos. Los sistemas de distribución son de naturaleza dinámica debido a las fluctuaciones de la demanda a lo largo del día, a los cambios frecuentes de configuración topológica, y a los altos valores transitorios de corriente en los alimentadores al restablecer el servicio por las condiciones de arranque simultáneas de carga; la corriente de carga entonces, también presenta un comportamiento dinámico. Por otra parte, la corriente de falla está sujeta a cambios de configuración topológica, los cambios de puntos de ocurrencia de falla, y los cambios de la impedancia de falla. Por lo tanto, las protecciones deben ser capaces de atender esa dinámica del sistema. Estas condiciones hacen difícil la operación apropiada de las protecciones de sobrecorriente convencionales.

Tradicionalmente, los ajustes de los relevadores son establecidos para las condiciones máximas de falla o carga de la red eléctrica. Así que para las condiciones de operación restantes se tienen ajustes que no son adecuados, reflejándose en una reducción de la sensibilidad del relevador y un incremento en los tiempos de operación. Y esto nos ha llevado a buscar otras soluciones para mejorar la protección de sobrecorriente.

El diseño del relevador propuesto de sobrecorriente permite obtener mediante curvas no convencionales una coordinación con menor tiempo de operación en todo el intervalo de corriente. La forma de la curva es diseñada para cada problema específico de

coordinación, esto resulta muy conveniente dado el gran número de curvas de daño y restricciones que se presentan en la coordinación de sistemas industriales. El modelo y diseño presentado en este capítulo parte de las ecuaciones características para relevadores de sobrecorriente de tiempo-inverso del estándar [43], y se establece la curva de tiempo dependiendo de las necesidades de la coordinación en casos típicos de equipos y sistemas. Se obtiene una mejor coordinación con esta propuesta de diseño, bajo la consideración de límites y curvas de daño de los equipos primarios como son: transformadores, líneas o cables y motores.

La metodología propuesta consiste en las siguientes etapas: primero se busca un modelo matemático de la curva de tiempo no convencional para obtener una reducción en el tiempo de operación; la formulación utilizada debe basarse en la forma generalizada para garantizar la compatibilidad funcional con los relevadores convencionales. La segunda etapa consiste en utilizar algoritmos de ajuste de curvas para obtener la mejor alternativa de un conjunto de modelos. Finalmente se pondera el beneficio en la red eléctrica mediante el cálculo de esfuerzos y la calidad de voltaje en la red eléctrica.

## **4.2 Modelo matemático de la característica**

Se propone implementar una nueva función característica no convencional al relevador de sobrecorriente que permita una mayor flexibilidad en la forma de la curva en todo el intervalo de corriente. Esta nueva familia de curvas de tiempo permitirá mejorar la aplicación en la coordinación de sistemas industriales, tanto en las curvas de límites de esfuerzos de los equipos primarios como en las curvas de tiempo de otros dispositivos de protección de sobrecorriente. La aplicación de esta nueva familia de curvas reducirá los daños en los equipos primarios en situaciones de corriente de falla, también reducirá los tiempos de operación en los diversos dispositivos de protección de sobrecorriente de sistemas eléctricos industriales a fin de mejorar la calidad de voltaje de la red. Para la definición de esta nueva función en el relevador de sobrecorriente se tomará como base

el modelo electromecánico del relevador sobrecorriente de disco de inducción que se presenta en el siguiente inciso.

#### **4.2.1 Modelo definido por el estándar IEEE Std C37.112-1996.**

El principio de funcionamiento del relevador de inducción se fundamenta en una estructura de inducción electromagnética donde el par que produce es proporcional al cuadrado de la corriente que toma la bobina, transformándose en el movimiento angular de una masa-resorte-amortiguador magnético (disco de inducción). En la **figura 4.1** se muestran esquemas típicos del relevador de sobrecorriente tipo disco de inducción.

La ecuación básica diferencial dependiente del tiempo de retardo, que representa al modelo es la expresión (4.1).

$$K_I I^2 \equiv m \frac{d^2\theta}{dt^2} + K_d \frac{d\theta}{dt} + \frac{\tau_F - \tau_s}{\theta_{\max}} \theta + \tau_s \quad (4.1)$$

Donde

- $I$  es la corriente de entrada
- $\theta$  es el recorrido o viaje del disco
- $\theta_{\max}$  es el máximo recorrido del disco
- $K_I$  es la constante que relaciona par a corriente
- $m$  es el momento de inercia del disco
- $K_d$  es el factor de amortiguamiento magnético
- $\tau_F$  es el par del resorte en máximo recorrido
- $\tau_s$  es el par inicial del resorte.

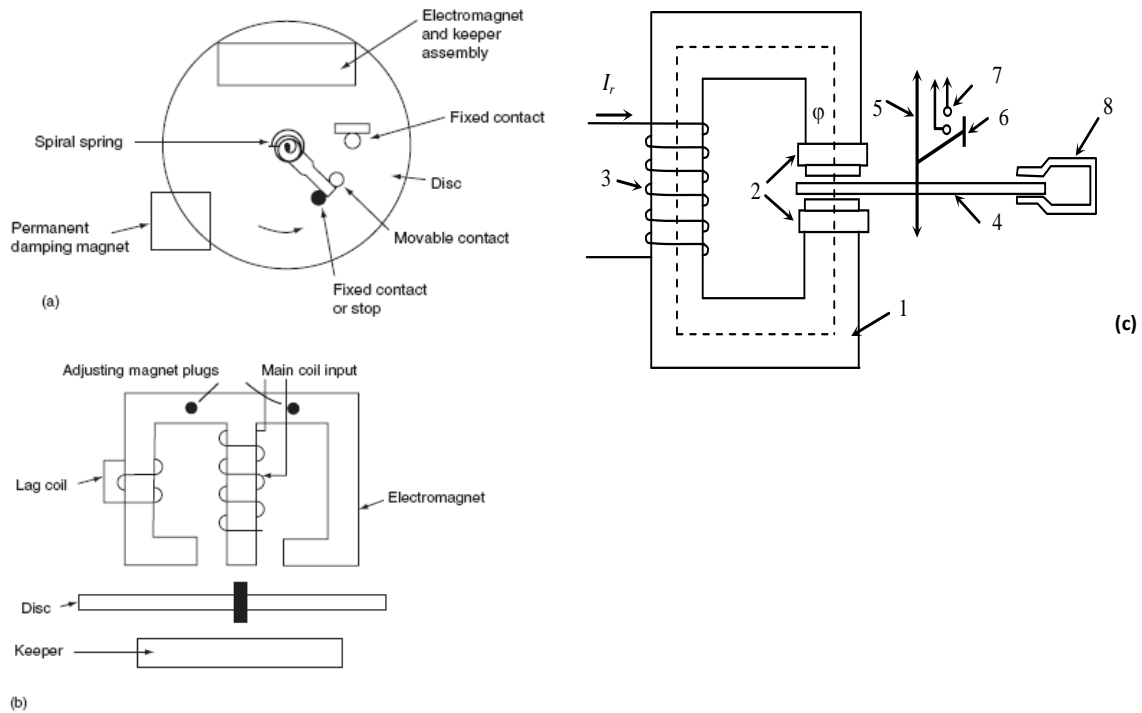
El par neto en el disco de inducción es el resultado del par magnético menos el par de retención del resorte.

$$K_I I^2 - \tau_s \quad (4.2)$$

La ecuación (4.1) es simplificada, despreciando el pequeño momento de inercia del disco de inducción y tenemos,

$$\tau_s (M^2 - 1) = K_d \frac{d\theta}{dt} \tau_s \quad (4.3)$$

Donde  $M$  es la relación de corriente de entrada  $\frac{I}{I_{pickup}}$



**Figura 4-1.** Relevador sobrecorriente tipo disco de inducción inverso: (a) vista superior, (b) vista de lado, y (c) partes de un relevador de inducción tipo polo sombreado: 1- núcleo magnético, 2- bobina de sombra, 3- devanado, 4- disco, 5- flecho o eje 6- puente contacto móvil, 7- contactos, 8- magneto permanente.

La solución de la ecuación (4.3) carece del término de segundo orden, teniendo como resultado que no hay tiempo de aceleración o desaceleración. De tal manera que, en esta representación, la velocidad final es alcanzada en un periodo de tiempo insignificante, y también que hay desplazamiento insignificante. Esta simplificación es válida en más aplicaciones. La ecuación (4.3) integrada,

$$\theta = \int_0^{T_0} \frac{\tau_s}{K_d} (M^2 - 1) dt \quad (4.4)$$

El tiempo de respuesta en la ecuación (4.4) es dado por,

$$t(I) = \frac{A}{(M^2 - 1)} \quad (4.5)$$

Donde  $t(I)$  es la ecuación característica tiempo-corriente y la constante  $A$  igual  $K_d \frac{\theta}{\tau_s}$ .

En el **apéndice A** se presenta el desarrollo completo del modelo **estándar IEEE Std C37.112-1996**.

#### 4.2.2 La característica de reposición

En algunas aplicaciones podría ser una ventaja para restaurar el tiempo integral en un ciclo. Sin embargo, la característica opcional de reposición también puede ser importante cuando se tiene una coordinación de restaurador con relevadores de inducción. En la ecuación (4.5) se define las características de operación y reposición del relevador de sobrecorriente de inducción para ambas corrientes por arriba y por debajo de corriente arranque. Si un disco de inducción ha de iniciar su desplazamiento dentro de su área de reposición cuando la corriente aplicada se reduce a cero, el disco será conducido en una dirección negativa hacia atrás en el área de reposición. Esto es representado en la ecuación (4.5) pero poniendo  $M = 0$ , lo cual produce un número negativo indicando el tiempo de reposición y la rotación del disco en el sentido de restablecer. Con esta sustitución, la ecuación (4.6) da el tiempo de restaurado  $t_r$ :

$$|t_r| = \frac{K_d \theta}{\tau_s} \quad (4.6)$$

Así la característica de reposición para cualquier valor de  $M$  entre cero y uno es:

$$t = \frac{t_r}{M^2 - 1} \quad (4.7)$$

La ecuación dinámica (4.4) y la ecuación característica (4.5) son importantes a la vez ellas especifican ahora una característica inversa tiempo-corriente que podría ser implicada en un orden, tal para asegurar la coordinación con relevadores de

sobrecorriente tiempo-inverso existentes para cualquier valor de interrupción de corrientes de falla, tales como fallas de muy baja resistencia y de terminal remota.

#### 4.2.3 *Curvas formadas por saturación.*

El par debido a la corriente es proporcional al cuadrado del flujo causado por la corriente, y la derivación previa asume una relación lineal entre el flujo y la corriente. Tomando en cuenta la saturación del electro-magneto, la cual forma las características inversas de tiempo-corriente, el grado de saturación usado para producir una curva particular puede ser determinado por sustitución del flujo normalizado en  $M$  de la ecuación (4.7), teniendo:

$$t = \frac{t_r}{\left(\frac{\phi}{\phi_{pu}}\right)^2 - 1} \quad (4.8)$$

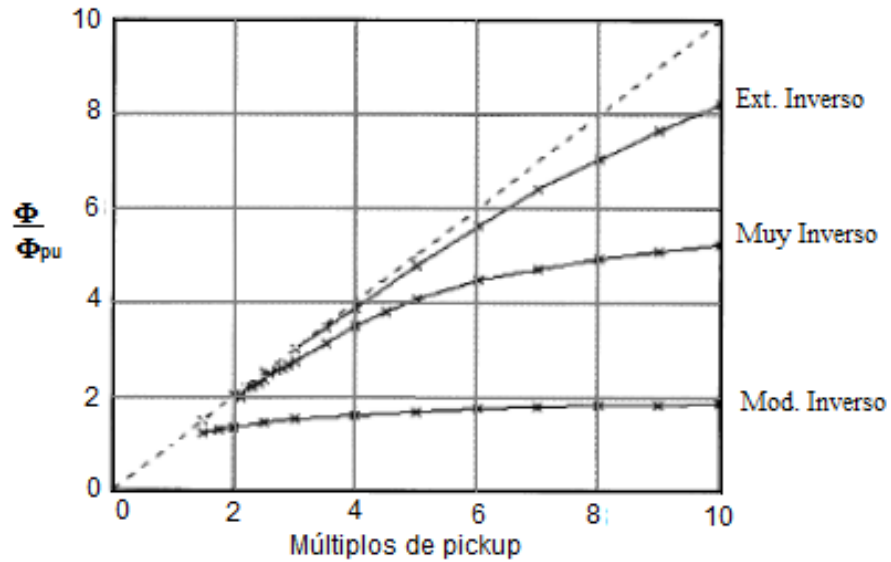
Donde  $\frac{\phi}{\phi_{pu}}$  es el flujo normalizado  
 $t_r$  es el tiempo reposición para  $I = 0$   
 $t$  es el tiempo para operar

De la ecuación (4.8) el flujo normalizado en términos del tiempo de operación y de restablecimiento es

$$\left(\frac{\phi}{\phi_{pu}}\right) = \sqrt{\frac{t_r}{t} + 1} \quad (4.9)$$

La curva de flujo normalizado  $\frac{\phi}{\phi_{pu}}$  contra múltiplo de corriente pickup  $M$  puede ser determinada por la posición que guarda el tiempo total de restablecimiento  $t_r$  en corriente igual a cero y entonces sustituyendo valores de tiempo de operación correspondiente a múltiplos de corriente pickup. La gráfica de flujo normalizado para un relevador de sobrecorriente del tipo-inducción extremadamente inverso, muy inverso y

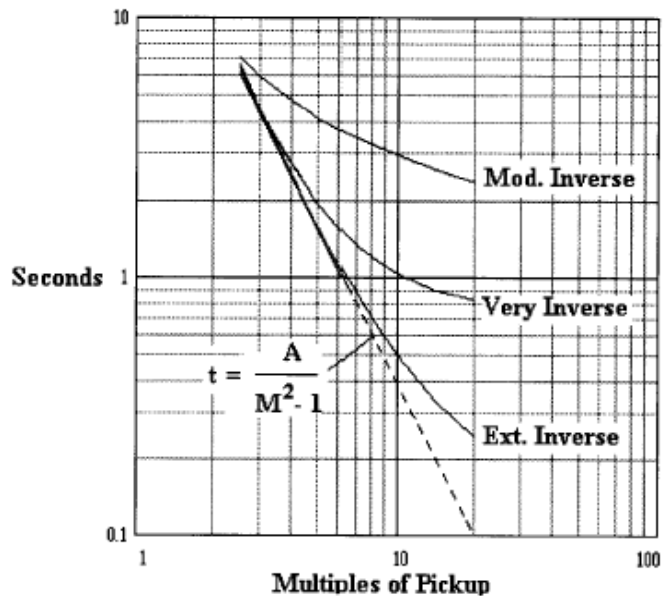
moderadamente inverso son mostrados en **figura 4-2** resultando características que son comparables con la **figura 4-3**.



**Figura 4-2** Flujo normalizado en relevadores extremadamente inverso, muy inverso y moderadamente inverso.

La gráfica de la **figura 4-2** muestra la técnica electromecánica usando grados específicos de saturación para producir una familia de curvas características tiempo-corriente mostrada en la **figura 4-3** en el orden siguiente: moderadamente, muy y extremadamente inversa.





**Figura 4-3** Comparación de características extremadamente, muy y moderadamente inversa.

El relevador extremadamente inverso empieza su saturación en cuatro múltiplos de pickup, muy inverso en dos múltiplos (mitad del valor previo), y moderadamente inverso en un pickup (otra vez, mitad del valor previo). La derivación muestra la característica de inducción, que si no fuera por la saturación deliberada, la característica sería una línea recta loglog de un fusible. Sin embargo, la curva está formada por la saturación del electroimán en un múltiplo específico de corriente pickup. También se ha demostrado que la saturación es el medio que, en efecto, incorpora el componente de tiempo definido para formar una curva práctica de coordinación. Por lo tanto, agregando un término constante de tiempo definido a la ecuación (4.5) se forma la ecuación característica de inducción (4.10)

$$t(I) = \frac{A}{M^2 - 1} + B \quad (4.10)$$

Las constantes A y B pueden ser elegidas para emular con precisión las características de tiempo-corriente de inducción tiempo-corriente extremadamente y muy inversa. Una emulación exacta de la característica moderadamente inversa puede ser

hecha por cambio del exponente de 2 a 0.2 con valores específicos para A y B. La ecuación (4.10) es la ecuación característica de disparo que emula la saturación ocurrida para corrientes sobre un valor de pickup. Sin embargo, la característica de reposición permanece en la ecuación (4.7) ya que la saturación no se produce en corrientes debajo de la corriente de pickup.

Las constantes **A** y **B** y exponente **p** determinan la forma de curva de las características de disparo.

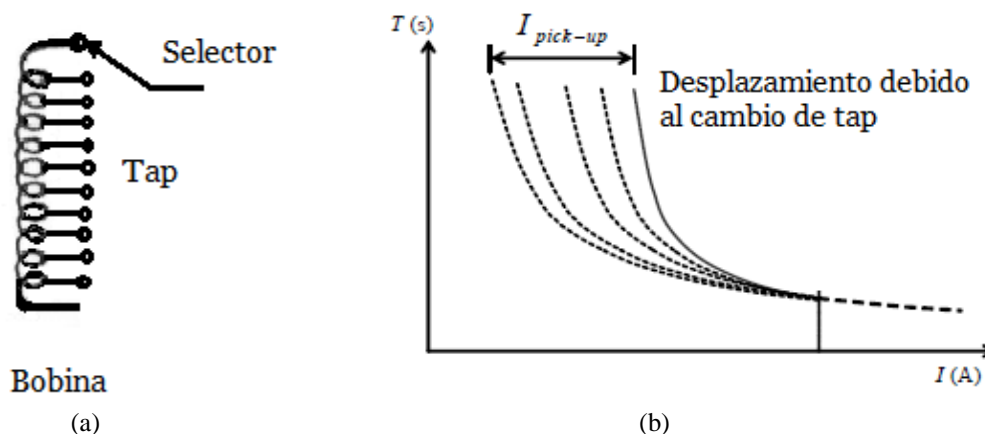
**Tabla 4.1 – Constantes y exponentes para características Estándares\***

Característica	A	B	p	$t_r$
Moderadamente inversa	0.0515	0.1140	0.020	4.85
Muy inversa	19.61	0.491	2.000	21.6
Extremadamente inversa	28.2	0.1217	2.000	29.1

\*Para el rango especificado de M, el número de dígitos representado para cada constante es tal que un cambio de unidad en el último dígito especificado causará un cambio no más grande que 0.5% en el cálculo subsecuente del cambio de tiempo relativo ( $\Delta t/t$ ).

#### **4.2.4 Definición de las asíntotas de la curva inversa tiempo-corriente**

Las asíntotas de la característica inversa de la curva del relevador de sobrecorriente 51, se obtienen en los ajustes de tap y dial del relevador de sobrecorriente de disco de inducción. El par ejercido en el disco del relevador depende del flujo magnético que incide en él, y este es directamente proporcional a (NI) amperios-vuelta; esto es, si se aumenta el número de vueltas N, la corriente necesaria para hacer operar el relevador disminuye y viceversa. Para que se produzca el mismo par se necesitan los mismos amperios-vuelta (NI); esa condición es la que permite variar la corriente mínima de operación ( $I_{pickup}$  corriente de arranque), es decir al variar el *tap* se varía el número de espiras, y por lo tanto la corriente mínima de operación  $I_{pickup}$ . En la **figura 4-4** se muestra el efecto de cambio del *tap* donde las características de operación se desplazan de izquierda a derecha con el cambio de la corriente  $I_{pickup}$ , presentándose el efecto asintótico sobre los valores de corriente de arranque definidos  $I_{pickup}$  como se muestra en la **figura 4-4b**.



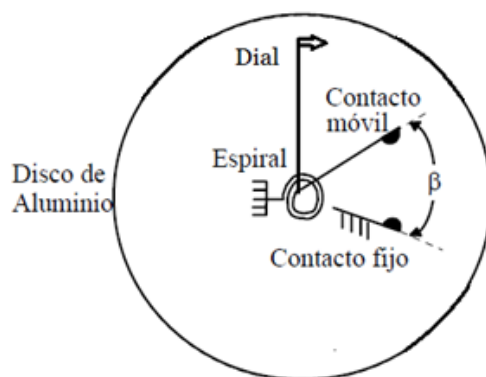
**Figura 4-4:** Ajuste relevador de sobrecorriente a) cambio de tap en la bobina y b) desplazamiento de la característica de tiempo inverso.

El ajuste de tiempo dial nos define la parte asintótica de la curva inversa en el tiempo mínimo para la máxima corriente de corto circuito. El tiempo de operación, a su vez depende de la posición de arranque del disco, si el disco arranca de una posición más alejada se demora más en llegar a la posición de cierre de contactos para la misma corriente. Esta circunstancia se aprovecha para cambiar el tiempo de operación del relevador a través del ajuste de la palanca (dial), en la **figura 4-5a** se muestra el efecto de cambio de tiempo de operación con la misma corriente de arranque  $I_{pickup}$ . El ajuste del relevador de sobrecorriente 51 significa fijar su *tap* y su *dial*.

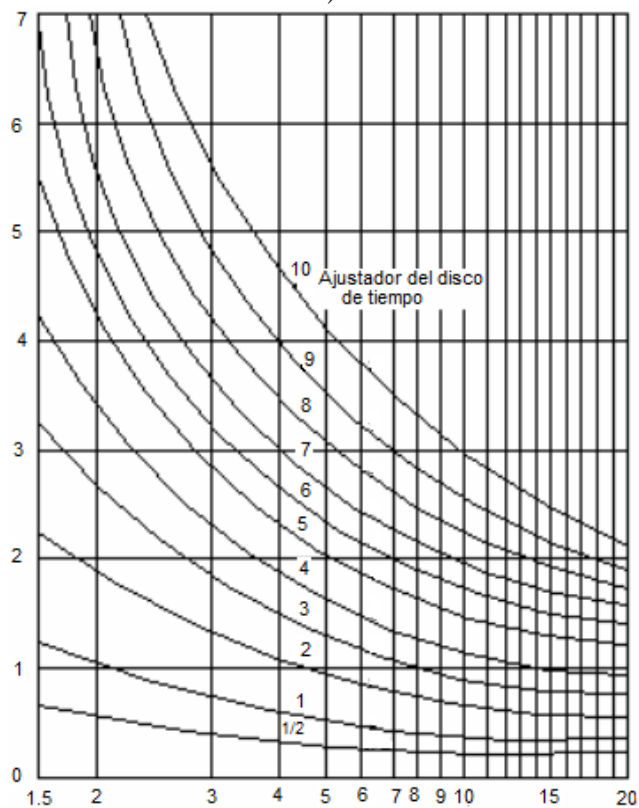
#### *Multiplicador ajuste de tiempo*

Esta palanca de tiempo (*dial*) gira el disco y su acompañamiento de contacto móvil más cerca al contacto fijo, reduciendo así la cantidad de distancia a recorrer por el contacto móvil, por lo tanto acelerar el tiempo de disparo del relé.

Esto tiene el efecto de mover la curva inversa de abajo hacia arriba como se muestra en la **figura 4-5b** siendo el tipo más común utilizado, es decir la curva inversa normal. Su característica muestra un tiempo de funcionamiento de 3s a 7 veces el tapón de ajuste de corriente *pickup*, para una palanca de tiempo (dial) ajuste 9. El procedimiento de cálculo del dial para el ajuste de la coordinación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso 51 se presenta en el apartado 3.2.



a)

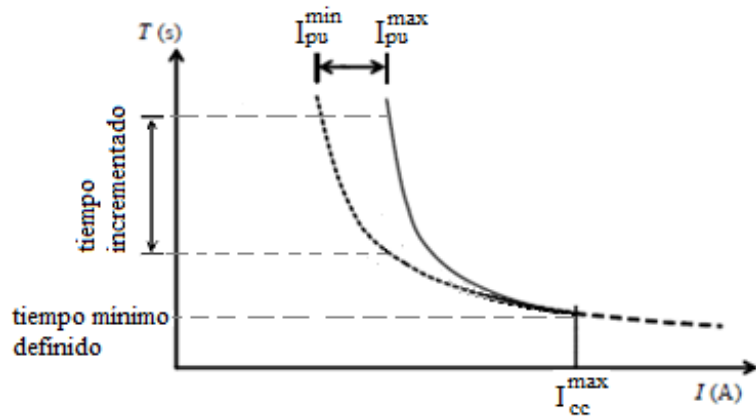


b)

**Figura 4-5** Ajuste de dial a) disco de inducción con su palanca de tiempo, b) gráfica de una curva inversa con diferente número de dial.

En la parte asintótica de la corriente de arranque  $I_{pickup}$ , la curva inversa presenta una desventaja cuando se ajusta una cierta curva de tiempo inverso con un valor más grande de corriente  $I_{pickup}$ , por lo que el tiempo de operación del relevador se incrementa también como se muestra en la **figura 4-6**. En la curva de línea discontinua con bajo *pickup* y la

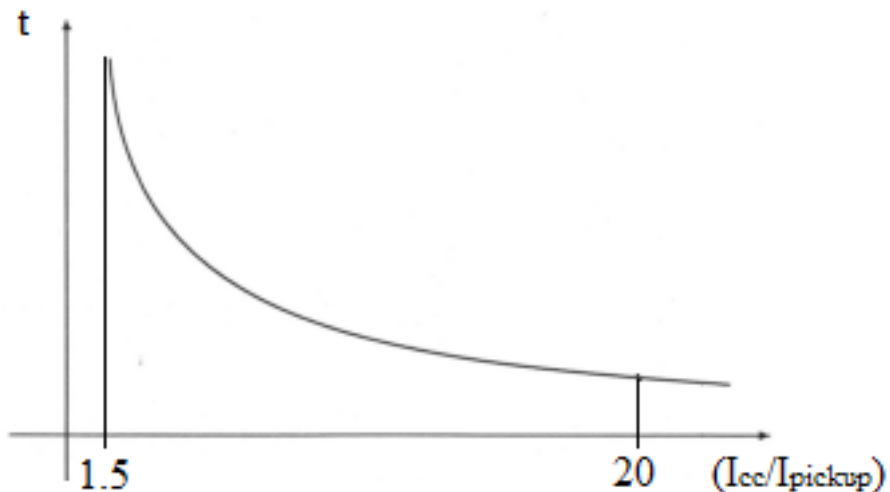
curva con línea continua con alto *pickup* se aprecia el incremento de tiempo de operación con respecto a la curva ajustada a bajo *pickup*.



**Figura 4-6** Curva de tiempo inverso con diferente corriente pickup y tiempo mínimo definido

La corriente en el secundario del transformador de corriente (TC) en falla no debe exceder de 100 A por ello las curvas que ofrece el fabricante son mostradas en múltiplos de corriente, desde 1.5 hasta 20, como lo señala la ecuación (4.11) y la **figura 4-7**.

$$\frac{I_{CCmax}}{20} \leq 100 \quad (4.11)$$



**Figura 4-7** Curva de tiempo inverso con margen de corriente de falla estándar normalizada

### 4.3 Modelo propuesto con curva característica flexible no convencional

La definición de  $A(I_k)$  constante tiene una relación física directa con los relevadores electromecánicos donde el disco de inducción es el único componente que es desplazado por la interacción de las corrientes y flujos inducidos en el disco. Así, la distancia angular de recorrido del disco hacia el cierre de contactos, la acción del magneto amortiguador y la fuerza del muelle de retención que son parámetros que definen  $A$  en la ecuación (A.9) del apéndice A y en [43, 44], son constantes. En este trabajo se propone modificar la función  $A(I_k)$  de tal forma que sea variable y dependa de la corriente de entrada, con esto se logra incrementar los grados de libertad de la expresión analítica que define la curva de tiempo del relevador. Para el equivalente electromecánico (**figura 4-8**) es necesario asignar un comportamiento dinámico a la palanca del *dial*, de tal forma que  $\theta$  este en función de la corriente  $\theta(I_k)$ . El objetivo es definir funciones de  $A(I_k)$  que puedan alterar la respuesta dinámica del relevador pudiendo acelerar o retardar su tiempo de operación dependiendo de la aplicación específica.

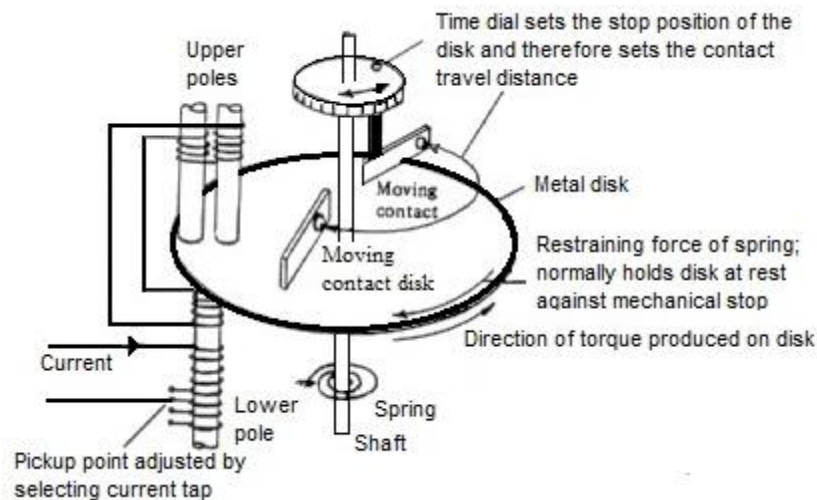


Figura 4-8. Esquema análogo de un relevador electromecánico con el relevador propuesto.

Haciendo uso de la versión digital del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso en [46] y comparando la función de salida del acumulador o integrador  $G_k$  y la función de

la palanca  $A(I_k)$ , así como el desarrollo analítico de las funciones en forma discreta, obtenemos la ecuación dinámica (4.20) para este modelo propuesto.

### ***Relevador digital de tiempo de sobrecorriente***

El modelado de los relevadores digitales debe emular la operación de los relevadores electromecánicos [45]. La **figura 4-9** muestra un diagrama simplificado de una versión generalizada del relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso por medio de funciones en [28]. La función generador recibe el fasor  $I_{sys}$  como una entrada, lo cual representa la componente fundamental de la corriente. Los valores del ajuste  $I_{pickup}$  desde las señales de salida de  $H(I)$  la cual es la función que representa el desplazamiento del disco principal y  $A$  es la constante que representa el ajuste de la palanca dial, donde  $I = I_{sys}/I_{pickup}$  es el múltiplo de corriente pickup [55]

$$A = \frac{K_d \theta}{\tau_s} \quad (4.12)$$

Donde  $K_d$  Magneto amortiguador

$\theta$  Desplazamiento dial

$\tau_s$  Resorte retención

Cuando la condición de operación es completada,  $I_{sys} > I_{pickup}$ , el integrador introduce el tiempo variable dentro del proceso. La señal de salida del integrador es definida como sigue:

$$G_K = \Delta t \sum H(I_K) \quad (4.13)$$

Donde  $G_k$  representa el valor acumulado del integrador en el instante de procesamiento de la muestra  $k$ , y  $\Delta t$  es el periodo de muestreo.

La condición de operación es cumplida cuando la amplitud de la señal  $G_k$  es igual a  $A$ . La señal de disparo es generada por lo tanto,

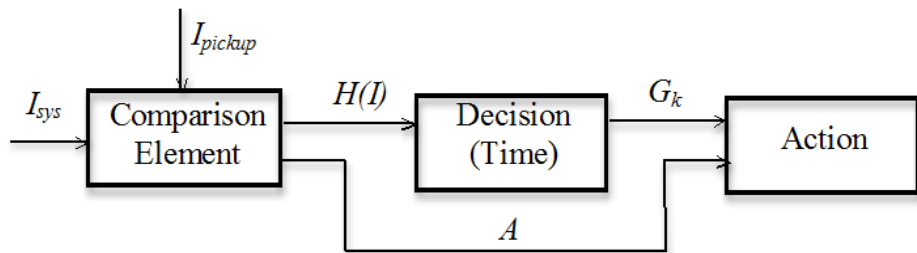
$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} H(I_k) = A \quad (4.14)$$

El relevador es operado en el instante que  $k$  alcanza un valor igual a  $k_{op}$  y satisface la ecuación (4.14). Esta ecuación considera la integración de una corriente de falla dinámica para preservar la coordinación entre relevadores.

La curva de tiempo es creada pero considerando una corriente de falla constante. En esta condición,  $I=valor\ constante$ . Así que

$$\begin{aligned} (k_{op}\Delta t)H(I) &= A \\ T(I)H(I) &= A \\ T(I) &= \frac{A}{H(I)} \end{aligned} \quad (4.15)$$

De acuerdo a [28],  $H(I)$  es  $I^n - 1$ . Por consiguiente, el tiempo de saturación,  $B$ , es incluido.



**Figura 4-9.** Versión digital del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso

### **Modelo propuesto relevador de sobrecorriente**

La definición de la constante  $A$  tiene una relación física directa con el relevador electromecánico, en el cual el disco de inducción es el componente que está en movimiento por la interacción de las corrientes inducidas. Por consiguiente, la distancia



angular del movimiento del disco para el cerrado de los contactos, la acción del magneto amortiguador y el resorte de retención, los cuales son parámetros que están definidos [55], son constantes. En este trabajo de tesis se propone modificar la función  $A$  tal que sea variable y dependa de la corriente de entrada. Esto asume incrementar los grados de libertad de la expresión analítica que define la curva de tiempo del relevador. El relevador electromecánico equivalente en **figura 4-8** fue usado para asignar un comportamiento dinámico de la palanca dial, tal que  $\theta$  sea una función de la corriente,  $\theta(I)$ .

$$A = \frac{K_d \theta(I)}{\tau_s} \quad (4.16)$$

El objetivo fue definir funciones,  $A(I)$ , que puedan alterar la respuesta dinámica del relevador y acelerar o reducir el tiempo de operación dependiendo de la aplicación específica. Por lo tanto, el relevador digital de sobrecorriente de tiempo es modificado como resultado del cambio en la condición de operación y la manipulación dinámica de  $A(I)$ , lo cual depende de la corriente  $I$ , como se muestra en **figura 4-10**.

Sustituyendo (4.15) en (4.14) resulta en lo siguiente:

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{A}{T(I_k)} = A \quad (4.17)$$

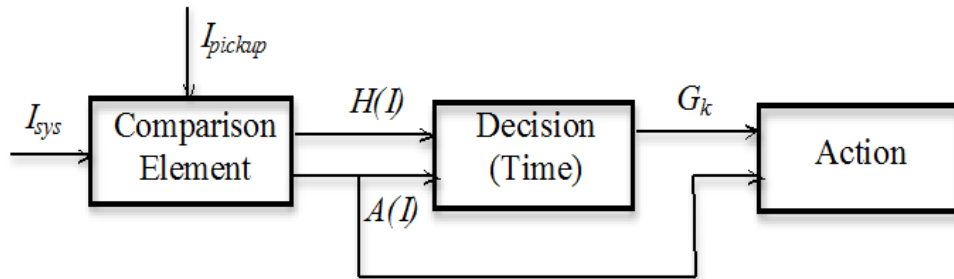
$A$  es una función constante. Así que,

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{1}{T(I_k)} = 1 \quad (4.18)$$

Por tanto, se propone considerar  $A$  como una función variable. Si consideramos que  $A$  dependa sobre la corriente  $I$ , la ecuación (4.19) puede ser presentada.

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{A(I_k)}{T(I_k)} = A(I) \quad (4.19)$$

Durante la condición de operación,  $A(I_k) = A(I)$ , la curva de tiempo,  $T(I)$ , no es completamente modificado en el modelo propuesto, pero ciertas cantidades definidas en la curva de tiempo del relevador son mantenidas, tal como el comportamiento asintótico de la corriente pickup, esto para cumplir la similitud requerida para curvas de tiempo de otros dispositivos de protección y curvas de daño de equipos eléctricos primarios. Por consiguiente, las curvas obtenidas con el modelo propuesto toman la esencia de los relevadores convencionales y contiene funciones que siguen el incremento de los grados de libertad.



**Figura 4-10.** Versión digital del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso con función variable de tiempo dial.

La función dinámica del modelo propuesto se puede extender como,

$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{A(I_k)}{\frac{A(I_k)}{H(I_k)} + B} \cong A(I_k) \quad (4.20)$$

La función  $H(I_k)$  en las ecuaciones 4.13 y 4.20 es el denominador del modelo definido en [21, 22].

$$H(I_k) = M^P - 1 \quad (4.21)$$

Esta función  $H(I_k)$  no es modificada en el modelo propuesto ya que le define cualidades deseadas en la curva de tiempo del relevador, como el comportamiento asintótico con la corriente de ajuste, su similitud con curva de tiempo de otros dispositivos de protección y curvas de daño de equipo primario. Así las curvas obtenidas con el modelo propuesto mantienen la esencia de los relevadores convencionales pero contiene funciones que le permiten incrementar sus grados de libertad para adecuarse a las diferentes condiciones de la coordinación principalmente en sistemas industriales.

La función  $A(I_k)$  para el relevador de sobrecorriente puede definirse dependiendo del problema de coordinación analizado. No es objetivo del presente trabajo presentar que expresión es la más adecuada para cada aplicación, sin embargo el proceso puede simplificarse mediante multifunciones en los programas de coordinación. Ya sea ampliando el catálogo de curvas disponibles que los definidos en [21, 22], o mediante la incorporación de rutinas de ajuste de curvas [45] a los programas de coordinación donde se obtendrán los parámetros y la expresión con mejor ajuste a la curva de tiempo deseada. Así se podrá definir la curva de tiempo en la carta de coordinación y obtener el modelo. Es importante que el modelo matemático del relevador que debe tener, además de las características de protección señaladas, suficiente simplicidad para poder ser implementada en el relevador, las expresiones polinomiales por ejemplo presentan una buena opción para el ajuste de relevadores e incluso de fusibles, pero presentan expresiones de grados elevados [12] dificultando su implementación.

La función estándar del relevador de sobrecorriente puede ser modificada con cierta dinámica al permitir que el numerador  $A$  sea una función dependiente de la variable de la corriente de falla  $I$ , en la cual físicamente se tendría un relevador con palanca variable, de tal manera que la distancia entre los contactos sea variante y por lo tanto también lo sea el tiempo de operación. Por consiguiente tendremos características  $t-I$  que dejarían de ser típicas como las tres establecidas por el estándar y se manejaría como una función general que se podría adaptar según las necesidades de la protección de sobrecorriente. A

continuación se evalúan a diferentes tipos de expresiones de  $A(I)$  para ver cuáles de ellas son más apropiadas al compararlas con la estándar:

a) tipo estándar de la forma  $A(I) = A$

b) tipo exponencial de la forma  $A(I) = Ae^{-I/c}$

c) tipo logaritmo de la forma  $A(I) = A \ln(I/c)$

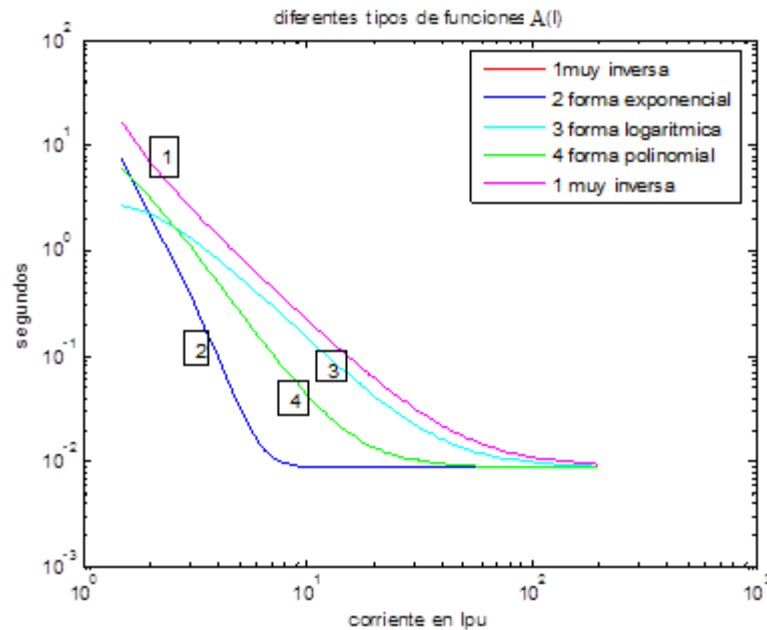
d) tipo polinomio de la forma  $A(I) = A_1 + A_2e^{-I} + A_3Ie^{-I}$

Lo inverso de la función  $T(I)$  está dado por el denominador que es la misma expresión presentada en (4.21).

#### **4.3.1 Evaluación de diferentes formas del numerador $A(I)$ y selección de la nueva función del relevador**

La forma estándar es la curva de tiempo muy inversa, esta se toma como referencia para la comparación con tres formas de curvas propuestas mediante las nuevas formas del numerador para la ecuación característica del relevador. La evaluación gráfica de las curvas estándar, exponencial, logarítmica y polinomial se muestran en la **figura 4-11**. La forma exponencial puede reducir los tiempos fuertemente en la parte intermedia de la curva y un poco menos en la parte de corrientes cerca de la corriente de arranque; pero en la corriente máxima no disminuye el tiempo porque está limitado por el tiempo definido  $B$  y esto sucede también para las otras curvas. La forma logarítmica reduce muy poco los tiempos en la parte intermedia y para corrientes cerca de la corriente de arranque se pueden reducir más los tiempos, cuando se busca cambiar el parámetro del logaritmo para disminuir más los tiempos la curva se colapsa en el lado de los valores de la corriente cerca de la corriente de arranque y esto es un problema fuerte para el ajuste de curvas. La forma polinomial tiene buenas reducciones de tiempo casi en todo el rango de corriente, pero también en las máximas corrientes no se puede reducir el tiempo porque queda definido por  $B$ . Las funciones presentadas son incluidas para mostrar los diferentes grados de inversión obtenidos mediante la inclusión de expresiones simples; para una

aplicación específica de coordinación se tendrá un catálogo de funciones que permitan obtener el mejor modelo dependiendo del problema específico de coordinación.



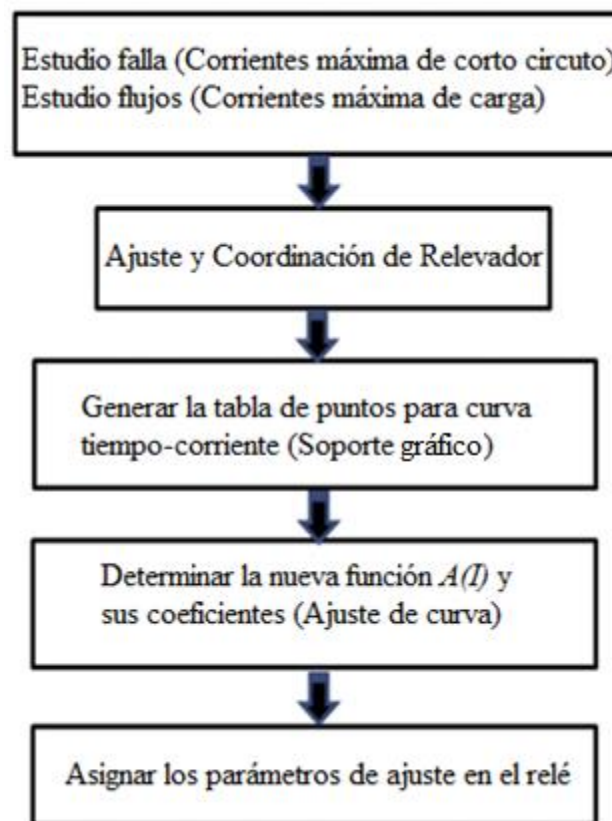
**Figura 4-11** Diferentes formas de  $A(I)$  numerador de la ecuación característica RSC

#### 4.4 Metodología para el diseño de un nuevo algoritmo al relevador de sobrecorriente

La metodología propuesta consiste en las siguientes etapas: primero se busca un modelo matemático donde la curva característica resultante tenga más flexibilidad, la formulación utilizada debe basarse en la forma generalizada y obtener una relación en los tiempos de operación para garantizar compatibilidad funcional con relevadores convencionales. La segunda etapa consiste en utilizar algoritmos de ajuste de curvas para obtener la mejor alternativa de un conjunto de modelos. Finalmente se pondera el beneficio en la red eléctrica mediante la reducción de esfuerzos y la calidad de voltaje de la red eléctrica.

La metodología para diseñar una nueva curva característica no estándar en el relevador de sobrecorriente es para que se logre una mejor coordinación con las curvas

características de los otros relevadores; dispositivos de protección de sobrecorriente (fusibles, restauradores e interruptores automáticos de bajo voltaje) que se encuentran en operación en el sistema de distribución industrial de potencia eléctrica con algunas limitaciones en la coordinación de su protección, y también por la dinámica de operación de sus elementos, equipos y cargas de la red industrial. En la **figura 4-12** se representa el diagrama con la metodología para el desarrollo del nuevo algoritmo del relevador de sobrecorriente. Se toma como base la función generalizada del relevador definida en [46].



**Figura 4-12** Metodología de diseño del nuevo algoritmo relevador de sobrecorriente RSC.

#### **4.4.1 Función no convencional del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso.**

Una primera alternativa de coordinación es usar la forma generalizada de la ecuación estándar del relevador de sobrecorriente (4.22).

$$T(I) = F(I) = \frac{A(I)}{H(I)} + B \quad (4.22)$$

Despejando el numerador de función generalizada (4.22), el cual modifica la palanca del relevador de sobrecorriente y a la vez influye en el tiempo de operación del relevador, y conociendo el valor de  $H(I)$  por lo tanto tenemos la ecuación (4.23).

$$A_k(I) = T_k(I) \cdot H_k(I) \quad (4.23)$$

Donde

$k$  es el índice que enumera los valores, el  $k$ -ésimo punto.

$I$  es el múltiplo de la corriente de falla  $I_{fault}$  con respecto a la corriente de arranque  $I_{pickup}$ .

$T_k(I)$  es el tiempo modificado en el  $k$ -ésimo punto, correspondiente al múltiplo de corriente

$H_k(I)$  es el término de la curva inversa del relevador en el  $k$ -ésimo punto, correspondiente al múltiplo de corriente.

$A_k(I)$  es la función modificada que mueve la palanca del relevador.

**Tabla 4.2** Tabla vacía que muestra cómo se generan los valores de las funciones del relevador digital de los  $k = 1, 2, \dots, m$  puntos.

$k$	$I = \frac{I_F}{I_{pu}}$	$T_k(I)$	$H_k(I)$	$A_k(I) = T_k(I) * H_k(I)$
1				
2				
:				
m				

Los valores de datos de puntos de  $A_k(I)$  obtenidos en la Tabla 4.2, se grafican para observar su tendencia y determinar los parámetros de la nueva función  $A(I)$  usando regresión lineal o no-lineal. El segundo camino es usar la forma base de la ecuación característica del estándar [43], pero agregando otros parámetros y el término exponencial, para que la palanca se esté moviendo, como se presenta en la ecuación (4.24).

$$T(I) = \left[ \frac{A \cdot e^{-(I/c)}}{I^n - 1} + B \right] \cdot TD \quad (4.24)$$

Donde

$T(I)$  es la variable dependiente tiempo, en función de  $I$ .

$I$  es la variable independiente múltiplos de la corriente de falla  $I_{\text{fault}}$  con respecto a la corriente de arranque  $I_{\text{pickup}}$ .

$TD$  es el tiempo dial que es constante.

$A$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c$  es el parámetro que modifica la palanca, dependiendo del cambio de corriente  $I$ .

$B$  es el parámetro de tiempo definido

$n$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

Para obtener la nueva ecuación característica no-estándar del relevador de sobrecorriente, estimaremos los parámetros  $A$ ,  $c$ ,  $N$  y  $B$  para ajustar ciertos datos de puntos de una curva característica del relevador sobrecorriente 51 tiempo-inverso. La función propuesta para la nueva ecuación característica es no lineal, para lo cual se aplicará un método de regresión no lineal para la estimación de sus parámetros.

#### **4.4.2 Estimación de los parámetros de la forma propuesta $T(I)$ .**



Para la función  $T(I)$  no-lineal, la estimación de sus parámetros se hace usando la regresión no-lineal con ciertos datos de entrada tiempo-corriente y la formulación según [47]. El método Gauss-Newton es un algoritmo que realiza una minimización de la suma de los cuadrados de los residuos entre datos y ecuaciones no lineales. El concepto del método se fundamenta en la técnica de una expansión de serie de Taylor que es usada para expresar la ecuación no lineal original en una forma aproximada lineal.

A continuación se presenta el desarrollo del método Gauss-Newton, primero la relación entre la ecuación no lineal y los valores de datos T-I, lo cual puede ser expresado en forma general por la ecuación (4.25).

$$T_i = f(I_i; A, c, n, B) + e_i \quad (4.25)$$

Donde  $T_i$  es un valor medido de la variable dependiente,  $f(I_i; A, c, n, B)$  es la ecuación la cual es una función de la variable independiente  $I_i$  y una función no lineal de los parámetros  $A, c, n, B$  y  $e_i$  es un error de redondeo. Por conveniencia, este modelo (ecuación 4.25) puede ser expresado en forma abreviada omitiendo los parámetros, como se muestra en la ecuación (4.26).

$$T_i = f(I_i) + e_i \quad (4.26)$$

El modelo no lineal puede ser expresado en una serie de Taylor, redondeando los valores de los parámetros y restringiendo después a la primera derivada. El desarrollo de esta técnica se presenta en el **apéndice B**.

El procedimiento es repetido hasta que la solución converja, esto es hasta que se obtenga un valor por debajo de un criterio de convergencia aceptable, el cual es de 0.1%.

$$|\epsilon_0|_A = \left| \frac{A_{j+1} - A_j}{A_{j+1}} \right| 100\%$$

$$|\epsilon_0|_c = \left| \frac{c_{j+1} - c_j}{c_{j+1}} \right| 100\%$$

$$|\epsilon_0|_n = \left| \frac{n_{j+1} - n_j}{n_{j+1}} \right| 100\% \quad \text{y}$$

$$|\epsilon_0|_B = \left| \frac{B_{j+1} - B_j}{B_{j+1}} \right| 100\%$$

## 4.5 Evaluación de la curva característica no convencional

Es importante comprobar el ajuste de la curva no convencional, la cual es modelada como una función de tipo exponencial y se determinan sus parámetros, por tal motivo se hizo una comparación de la nueva función estimada con los datos de su origen y se evalúa el porcentaje de error de desviación para observar si se cumple con lo establecido por la norma IEEE.

### 4.5.1 Ajuste de curvas

Existen dos métodos para representar digitalmente las características tiempo-corriente [47]. Uno de esos métodos consiste en almacenar en memoria pares de valores de tiempo - corriente y determinar el tiempo de operación correspondiente a un valor de corriente por interpolación directa. Este método es aplicable a dispositivos con características relativamente fijas y con pocos ajustes. Para dispositivos con muchos ajustes, como relevadores, se requiere de mucha memoria para el almacenamiento de datos. El segundo método es el de ajuste de curvas que consiste en seleccionar una ecuación apropiada, determinar y almacenar los coeficientes que producen un ajuste satisfactorio. Este es el método más utilizado y es el que se aplica en este trabajo.

Existen en general dos métodos para el ajuste de curvas, cuya aplicación depende del error asociado con los datos [47]:

*Regresión de mínimos cuadrados:* Es apropiado para datos de entrada con ruido. Se deriva una curva que representa la tendencia general de los datos de puntos individuales que pueden ser incorrectos, el algoritmo no trata de intersectar cada punto.

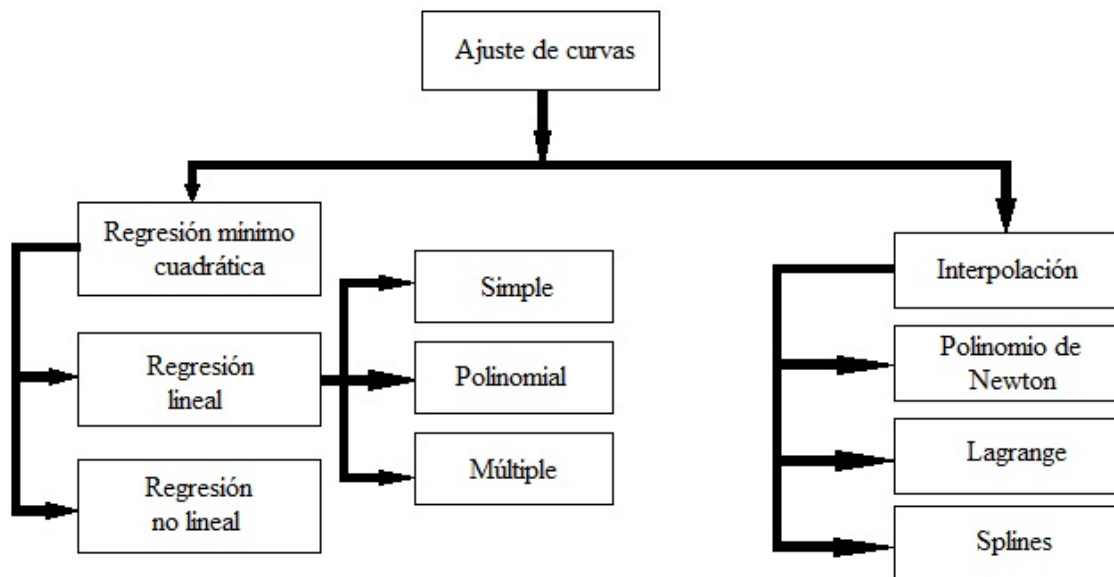
*Interpolación:* Es apropiada cuando los datos de entrada se conocen con exactitud. El proceso consiste en ajustar una o varias curvas que pasen directamente a través de cada uno de los puntos. Se hace una estimación de valores entre puntos discretos bien determinados.

El diagrama de bloques de la **figura 4-13** presenta la clasificación de los algoritmos de ajustes de curvas. El objetivo de los algoritmos de regresión mínimos-cuadrados es reducir el error entre los valores estimados y los datos, utilizando técnicas de optimización mínimo-cuadrática. En la regresión lineal el modelo depende linealmente de los coeficientes o parámetros a determinar. La ecuación de ajuste puede ser una línea recta (regresión lineal simple) o un polinomio (regresión polinomial). También existe la regresión lineal múltiple, donde se tienen dos o más variables independientes en la función. En la regresión no lineal el modelo es una función no lineal de los parámetros o coeficientes.

Los algoritmos de interpolación son apropiados para ajustar valores intermedios entre datos exactos. Para lograr tal propósito se utilizan polinomios, el algoritmo de Newton es preferible cuando el orden del polinomio es desconocido; cuando se conoce el orden, el algoritmo de *Lagrange* es el más adecuado. El algoritmo denominado *Splines* utiliza polinomios de orden pequeños para interpolar subconjuntos de datos. Este es adecuado cuando los datos tienen cambios abruptos.

Las características tiempo-corriente de relevadores de sobrecorriente publicadas por los fabricantes tienen pequeños errores. Una fuente de error es que esas características son curvas promedio, resultantes de pruebas a relevadores. También se introducen errores en la lectura de los valores a partir de las curvas, que por lo general son de tipo

logarítmico. Para reducir el efecto de esta última fuente de error, el Comité de Protecciones del IEEE ha recomendado que los fabricantes agreguen las tablas de valores de tiempo-corriente, además de las curvas de los relevadores [48]. Muchos fabricantes de relevadores digitales publican las ecuaciones de las características tiempo-corriente, por lo que resuelve este problema.



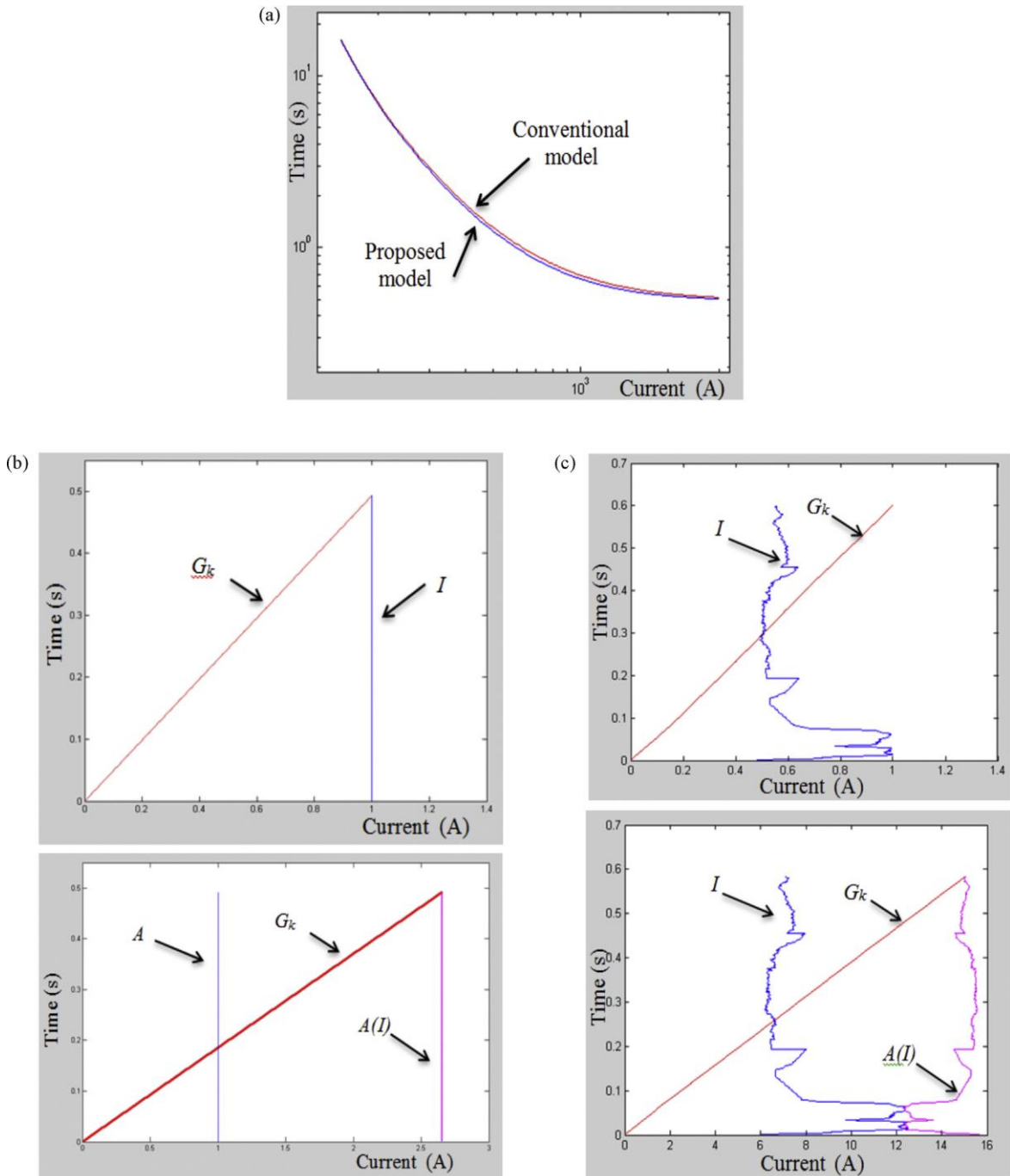
**Figura 4-13** Clasificación de algoritmos de ajustes de curvas.

La presencia de estos errores en los datos hace recomendable utilizar técnicas de regresión mínimo-cuadrática para el ajuste de curvas de relevadores. En este trabajo se utiliza la regresión no lineal para el ajuste de ecuaciones de tipo exponencial, y regresión lineal polinomial para el ajuste de ecuaciones de tipo polinomial. La formulación de estos dos algoritmos de ajuste se presenta en el **Apéndice B**.

#### **4.5.2 Criterio de evaluación sobre desviación de ajuste de curvas.**

La evaluación del comportamiento dinámico del modelo para corrientes de falla constantes y dinámicas se muestra en la **figura 4-14**. Se evalúa que el criterio de operación

se cumpla en el modelo del relevador propuesto comparándolo con el modelo de un relevador convencional.



**Figura 4-14.** Comportamiento dinámico del modelo propuesto en comparación del modelo convencional. a) Curvas de tiempo, b) Salida del integrador con señales constantes  $T_{op}=0.49$  s, c) Salida del integrador con señales dinámicas  $T_{op}=0.58$  s.

El modelo propuesto se define por medio de la función  $A(I)$  para que resulte en una curva muy similar a la curva muy inversa del estándar en [43] (**figura 4-14a**); teniendo la misma curva de tiempo, el proceso de integración de ambos modelos resulta en los mismos tiempos de operación tanto para corrientes constantes (**figura 4-14b**) como para corrientes variables (**figura 4-14c**), confirmando que la aplicación del modelo propuesto tendrá las mismas características funcionales de los relevadores convencionales, como es mostrado en este caso base.

No existen definiciones de criterios de exactitud, pero se acepta [48, 49, 50, 12] como un buen ajuste aquel en que, para cualquier valor de corriente, el tiempo calculado por la ecuación tenga un error no mayor de tres ciclos con respecto al valor exacto. Para corrientes que representan múltiplos elevados de la corriente de arranque, el error puede exceder este límite, pero no debe ser mayor del 5%.

Estos requerimientos de exactitud se aplican por lo general a partir del múltiplo 2, aun cuando los fabricantes dan las características tiempo-corriente comenzando en el múltiplo 1.5. Se considera que la región de las curvas para múltiplos entre 1 y 2 tiene cierta incertidumbre, y no es de utilidad para coordinación [48, 12]. No obstante lo anterior, en este trabajo se evaluó las curvas en todo el intervalo de valores de corrientes dado por los fabricantes.

*Ejemplo 1. Simulación de ajuste de curva forma exponencial.*

Valores de los parámetros de la nueva función característica tipo exponencial determinados en la corrida del programa de regresión no lineal que corresponde a la gráfica de la **figura 4-15**.

$TD = 0.5$  es el tiempo dial que es constante.

$A = 3.1393$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c = 3.7976$  es parámetro que modifica la palanca, dependiendo del cambio de corriente  $I$ .

$B = 0.8027$  es el parámetro de tiempo definido

$N= 0.3704$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

La expresión de la función característica tipo exponencial no convencional es

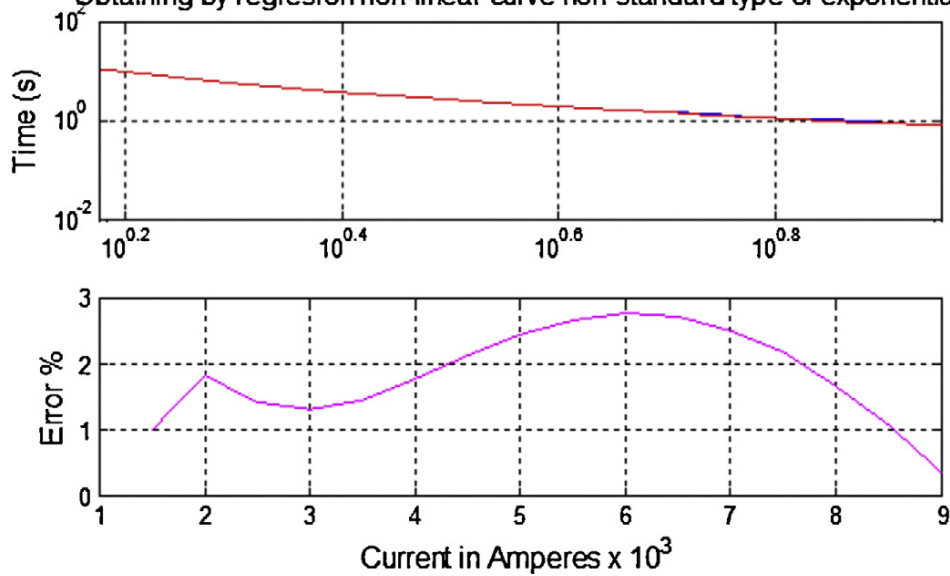
$$T(I) = \left[ \frac{A \cdot e^{-(I/c)}}{I^N - 1} + B \right] \cdot TD$$

Y los valores de sus parámetros en la función  $T(I)$

$$T(I) = \left[ \frac{3.1393 \cdot e^{-(I/3.7976)}}{I^{0.3704} - 1} + 0.8027 \right] \cdot TD$$

**Coefficients A = 3.1393 B = 0.8027 c = 3.7976 N = 0.3704**

Obtaining by regresion non-linear curve non-standard type of exponential



**Figura 4-15.** Estimación de parámetros ajuste de curva tipo exponencial y curva de por ciento de error

*Ejemplo 2. Simulación de ajuste de curva forma polinomial.*

Valores de los coeficientes de la nueva función característica tipo polinomial determinados en la corrida del programa de regresión no lineal que corresponden a la gráfica de la **figura 4-16**.

$a_0 = 1.16$  es el coeficiente del primer término del polinomio

$a_1 = 281.6783$  es el coeficiente del segundo término del polinomio

$a_2 = 19.992$  es el coeficiente del tercer término del polinomio

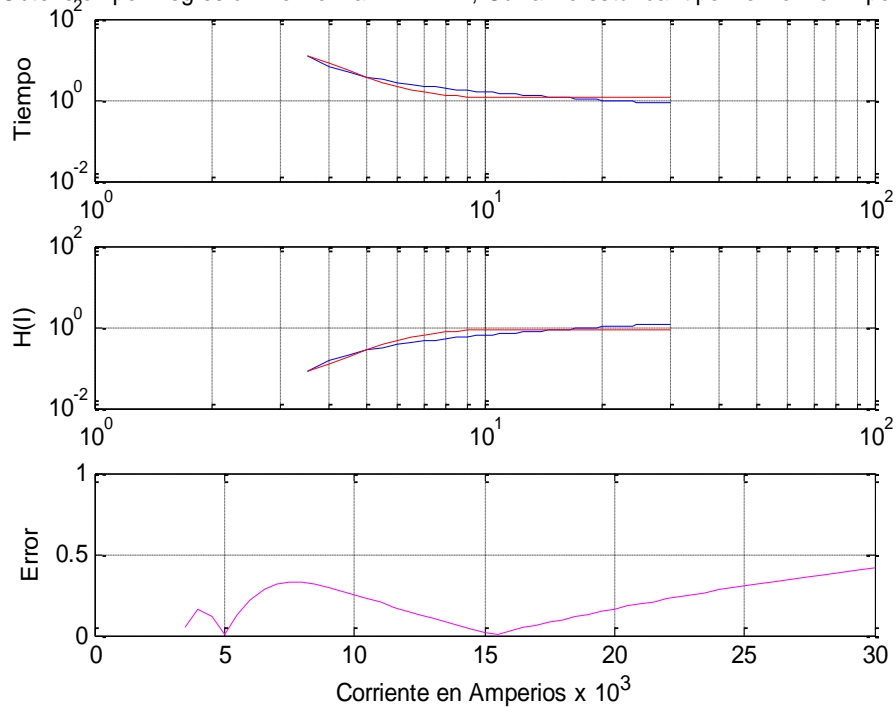
La expresión de la función característica tipo polinomial no convencional es

$$T(I) = a_0 + a_1 e^{-I} + a_2 \cdot I e^{-I}$$

Y los valores de sus parámetros en la función  $T(I)$

$$T(I) = 1.16 + 281.6783 e^{-I} + 19.992 \cdot I e^{-I}$$

Obtención por Regresión Polinomial MATLAB, Curva No-estándar tipo Polinomio-Exponencial



**Figura 4-16.** Estimación de coeficientes ajuste de curva tipo polinomial y curva de error.

En las gráficas de las **figuras 4-15 y 4-16** se muestran los resultados de la evaluación de ajustes de las curvas para los modelos una función exponencial y polinomial



respectivamente, donde observamos que la expresión tipo exponencial cumple muy bien con el porcentaje de error de ajuste recomendado por los estándares y también de las recomendaciones dadas anteriormente según las referencias [48, 49, 50, 12]. Mientras que la expresión polinomial evaluada no cumple con el error de menos de 3% en este caso, no siempre así sucede.

#### 4.6 Condición de operación del relevador de sobrecorriente

Para describir la condición de operación usando la característica del relevador con palanca variable es necesario deducir la ecuación de igualdad para cuando se cumpla la operación. Para esto se debe usar la recomendación del estándar de características de operación del relevador de sobrecorriente [43] y la referencia [46].

Los pasos para deducir la ecuación de igualdad de operación usando el valor acumulado del integrador  $G_K$  en el instante de procesar la muestra  $k$ , donde  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo, se muestran en la ecuación (4.27).

$$G_K = \sum_{K=1}^K H(I_K) \Delta t = \Delta t \sum_{K=1}^K H(I_K) \quad (4.27)$$

La ecuación de operación se cumple cuando el valor acumulado  $G_k$  es igual a la función de la palanca variable  $A(I_k)$ , como se muestra en ecuación (4.28).

$$G_K = \Delta t \sum_{K=1}^{K_{op}} H(I_K) = A(I_K) \quad (4.28)$$

La operación del relevador tiene lugar en el instante en que  $K$  alcanza un valor igual a  $K_{op}$  y se cumple la ecuación (4.28). El tiempo de operación es dado por la ecuación (4.29).

$$T = K_{op} \Delta t \quad (4.29)$$

Despejando  $\Delta t$  en la ecuación (4.28) y sustituyendo en la ecuación (4.21), se obtiene la ecuación característica tiempo-corriente  $T = F(I_K)$  del relevador digital, como se muestra en ecuación (4.30).

$$T = \frac{K_{op} A(I_K)}{\sum_{K=1}^{K_{op}} H(I_K)} \quad (4.30)$$

O

$$T = F(I) = \frac{A(I)}{H(I)} \quad (4.31)$$

Dentro de cada periodo de muestreo la corriente permanece constante en el valor calculado en la muestra anterior, por tanto, la ecuación (4.31) también puede escribirse para  $I = I_K$  (periodo de muestreo correspondiente a la muestra  $K$ ), como se muestra en ecuación (4.32).

$$F(I_K) = \frac{A(I_K)}{H(I_K)} \quad (4.32)$$

Despejando  $H(I_K)$  en (4.34) y sustituyendo en (4.30), así como también se sustituye  $T$  de la ecuación (4.29) en la ecuación (4.30), se obtiene la ecuación (4.33).

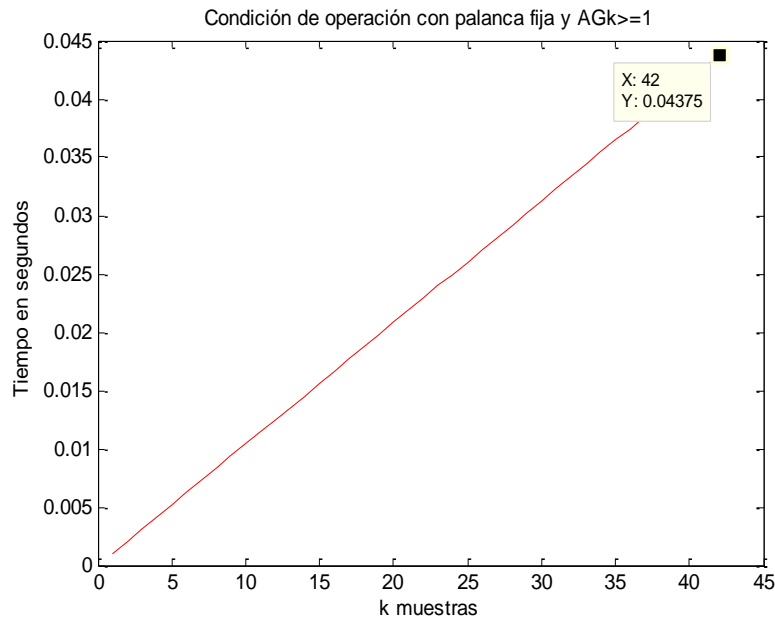
$$\frac{A(I_K)}{\Delta t \sum_{K=1}^{K_{op}} \left[ \frac{A(I_K)}{F(I_K)} \right]} = 1 \quad (4.33)$$

#### **4.6.1 Evaluación de la operación con palanca constante.**

La ecuación (4.33) es la ecuación generalizada del relevador digital de sobrecorriente de tiempo inverso. Esta ecuación equivale al caso particular en que el integrador es lineal como en los relevadores analógicos, en los relevadores digitales de sobrecorriente por lo general se hace la simplificación de  $A(I_{KF}) = K$ . Sustituyendo esta

condición en (4.33) se obtiene la forma digital de la expresión dinámica de la ecuación (4.10), en la ecuación (4.34). La evaluación de un relevador con palanca fija se muestra en la **figura 4.17** cumpliéndose la condición de operación en la  $k$  muestra  $X = 42$  y tomando un tiempo de  $Y = 0.04375$  segundos.

$$\sum_{K=1}^{K_F} \left( \frac{1}{F(I_K)} \right) \Delta t = 1 \quad (4.34)$$



**Figura 4-17.** Gráfica de la condición de operación de un relevador con palanca fija.

En la ecuación (4.35) se muestra la expresión de la integral para cada zona

$$\Delta G_K = \begin{cases} \Delta t \cdot H_o(I_K) \dots I_K \geq 1 \dots \text{Zona de Operacion} \\ \Delta t \cdot H_r(I_K) \dots 0 \leq I_K < 1 \dots \text{Zona de Re posicion} \end{cases} \quad (4.35)$$

Donde  $G_K = G_{K-1} + \Delta G_K$

La condición de operación  $H_o$  y reposición  $H_r$  se satisface cuando:

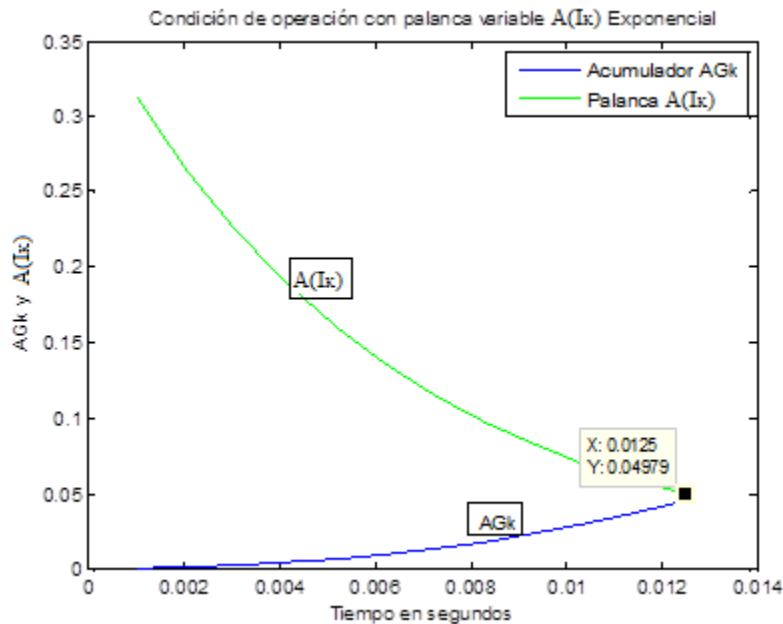
$$G_K = \sum_{K=1}^{K_{op}} H_o(I_K)\Delta t = 1 \quad \text{y} \quad G_K = \sum_{K=1}^{K_{op}} H_R(I_K)\Delta t = 0 \quad (4.36)$$

El contenido del integrador es limitado entre valores de cero y uno;

$$G_K = \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1 \end{cases} \quad (4.37)$$

#### 4.6.2 Evaluación de la operación con palanca variable

En la **figura 4-18** se muestra cuando se cumple la condición de operación cuando el acumulador del integrador  $G_K$  que corresponde al movimiento del disco hasta un cierto tiempo se iguala con  $A(I_K)$  que es la función de la palanca ajustable; pero considerando una tolerancia o intervalo de igualdad en un 10% dado por el estándar [43] de la diferencia entre  $G_K$  y  $A(I_K)$  donde  $G_K = \Delta t \sum_{K=1}^{K_{op}} H(I_K) = A(I_K)$ . El valor en que se cumple la igualdad tanto para la curva de  $G_K$  como para la curva de la función  $A(I_K)$  palanca variables es  $Y=0.04979$  y tiempo de operación correspondiente es  $X=0.0125$  segundos.



**Figura 4-18.** Gráfica de cumplimiento de operación de  $\Delta G_K$  acumulador= $A(I_K)$  palanca variable y tiempo de operación.

# Capítulo 5

## Coordinación de relevadores propuestos en redes industriales

---

### 5.1 Introducción.

La protección de sobrecorriente presenta limitaciones funcionales en determinadas condiciones de demanda máxima y corriente de falla mínima, manifestándose en tiempos de liberación de falla que afectan principalmente al equipo primario de la red eléctrica. En el capítulo 3 se presentaron varios casos de aplicación donde se tienen limitaciones de la protección de sobrecorriente; la metodología presentada en el capítulo 4 está fundamentada en el diseño funcional del relevador de sobrecorriente con una doble dinámica, resultando en curvas características con formas más flexibles y diversas.

En este capítulo se abordarán tres casos de sistemas eléctricos distintos donde se requerirá mejorar la protección de sobrecorriente, se aplicó este nuevo algoritmo propuesto y se determinó la forma de la curva definida para las necesidades del problema de coordinación, y se compararon los resultados con las limitaciones de las curvas estándares.

El primer caso que se analizó es el transformador categoría III con curva de sobrecorriente inversa no convencional. El segundo caso es en un alimentador principal de sistema industrial transformador-cable-carga donde se realiza la coordinación de protección de sobrecorriente entre tres elementos primarios. El tercer caso es el de un sistema de distribución y acometida de una planta industrial donde se requiere cambiar la forma de curva.

## 5.2 Caso I. Protección de transformador categoría III.

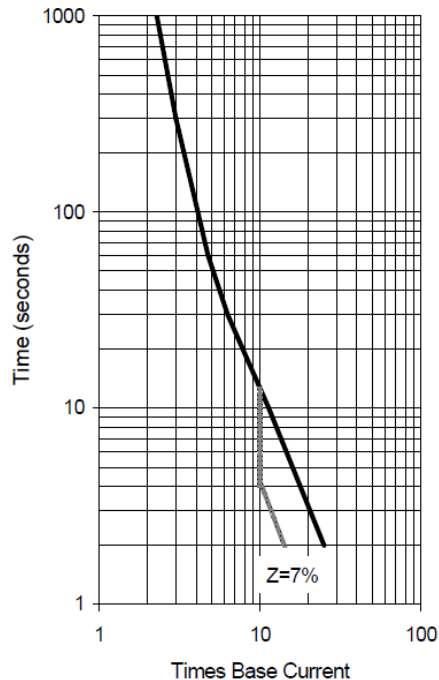
Las normas ANSI/IEEE [51] [52] proporcionan límites de funcionamiento para transformadores de potencia. Inicialmente, estos límites de funcionamiento sólo consideran los efectos térmicos de sobrecarga del transformador. Más tarde, el límite de capacidad fue cambiado para incluir el efecto mecánico de corrientes de falla más altas a través del transformador. La transformación de energía a través de falla produce fuerzas físicas que causan compresión, desgaste de aislamiento y desplazamiento inducido por la fricción en la bobina. Estos efectos son acumulativos y deberán considerarse durante la vida útil del transformador. La tabla 5.1 muestra cuatro categorías [52] para transformadores de potencia sumergidos en líquido, basados en los datos de placa del transformador.

**Tabla 5.1.** Categoría de transformadores de potencia

Categoría	Monofásico KVA	Trifásico KVA
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1667	501 a 5000
III	1668 a 10000	5001 a 30000
IV	Arriba 10000	Arriba 30000

La curva de daño por falla a través del transformador se limita a dos segundos. Para reconocer el carácter acumulativo de los daños, la norma complementa la curva de límite a través de la capacidad de falla para reflejar el daño mecánico. El cálculo de la curva de límite de capacidad de falla del transformador se determina por  $I^2t$  y se basa en la impedancia real del transformador. Para transformadores de categoría II, se considera el efecto mecánico a las corrientes de falla superiores al 70 por ciento de la corriente máxima de corto-circuito. Para transformadores categoría III y IV, se considera el daño por corrientes superiores al 50 por ciento de la corriente máxima de cortocircuito. La **figura 5-1** muestra la curva de límite de capacidad a través de la falla de un transformador de

categoría II con impedancia de 7%. El cálculo  $I^2t$  es a la corriente máxima de cortocircuito por un tiempo de 2 segundos.



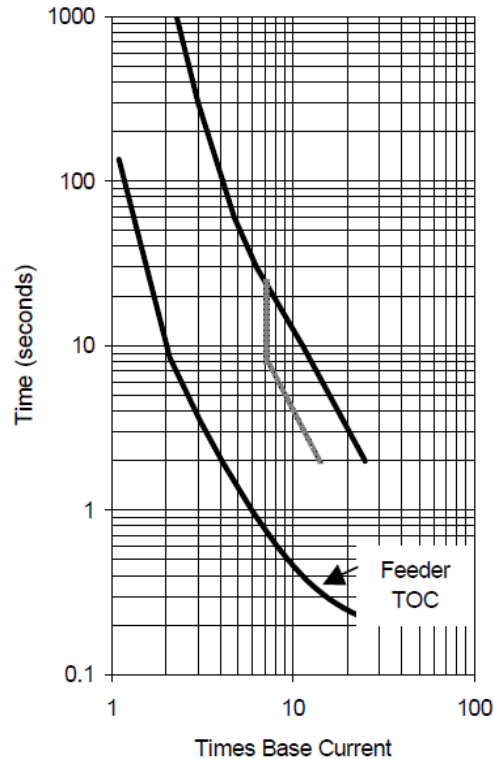
**Figura 5-1.** Curva límite de capacidad de falla a través del transformador sumergido en líquido categoría II con fallas frecuentes.

Después de determinar la curva límite según la capacidad de la falla a través de un transformador, se selecciona una característica tiempo-sobrecorriente del relevador para coordinarse. En aplicaciones de transformador de distribución donde un número de alimentadores están conectados al bus de baja tensión, el relevador alimentador viene como la primera línea de defensa. El estándar IEEE C37.91 recomienda [53] ajustar la característica tiempo-sobrecorriente inversa del relevador alimentador para coordinar con la curva de límite de capacidad de la falla a través del transformador, como se muestra en la **figura 5-2**.

### **5.2.1 Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares.**

En los sistemas eléctricos de potencia se encuentran muchas subestaciones con transformadores categoría III, como se muestra en la **figura 5-3** de la norma IEEE de

protección de transformadores [53, 42] que se aborda en este caso I. Como se presenta en la **figura 5-3** se necesita modificar la forma de la curva de la protección por lado primario del transformador para mejorar la coordinación obtenida con la curva estándar, resultando en una disminución del CTI, así como en una reducción de los esfuerzos mecánicos a que está expuesto el transformador alargando su vida.



**Figura 5-2.** Coordinación de curva límite de capacidad de falla a través de transformador categoría III y IV con característica inversa tiempo-corriente del alimentador TOC.

La curva complemento del límite de falla a través del transformador corresponde a su impedancia de 10% y una corriente de falla máxima trifásica de 5540 A referido al lado secundario. Las curvas de los dispositivos de protección de fase por el lado primario corresponden a relevadores de sobrecorriente con característica muy inversa, y su ajuste es Tap 8 y dial 3 con transformadores de corriente (TC) de relación 20:1. Las curvas de los dispositivos de protección de sobrecorriente 51 de cada fase por el lado secundario son de característica muy inversa y su ajuste es Tap 6 y dial 3, con TC de relación 60:1.



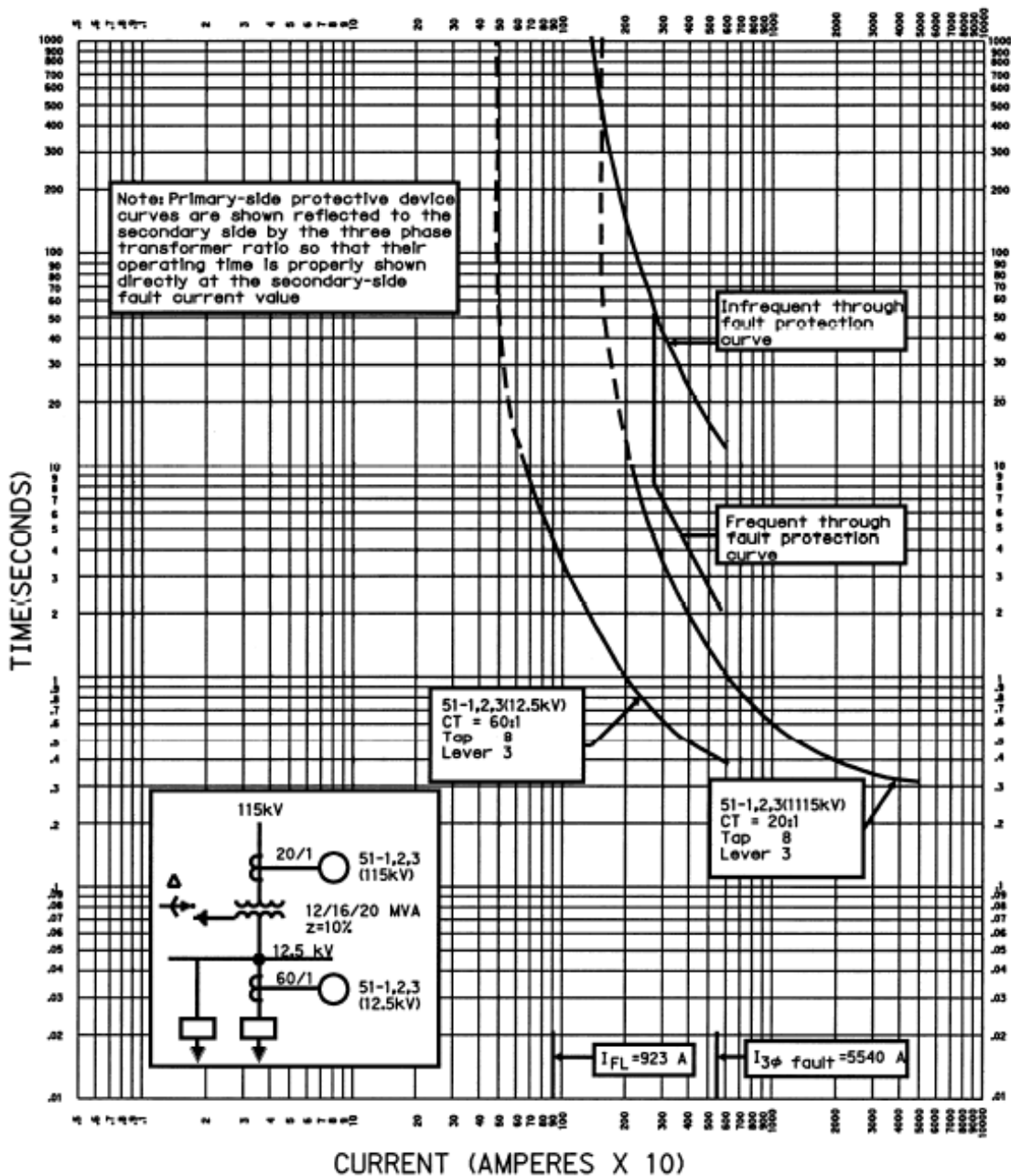
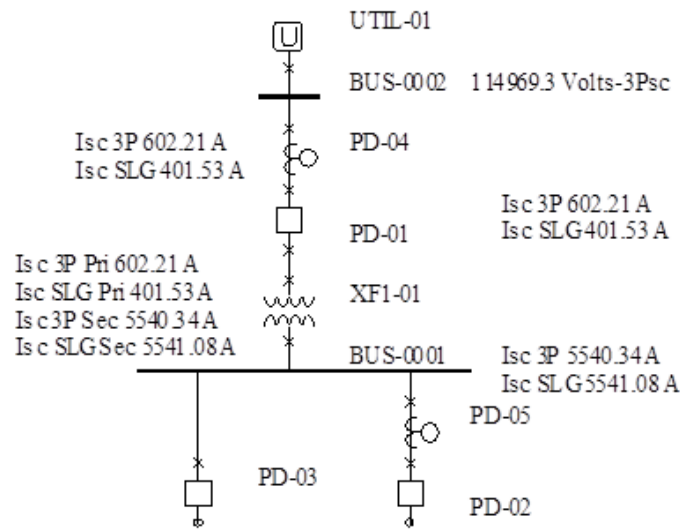
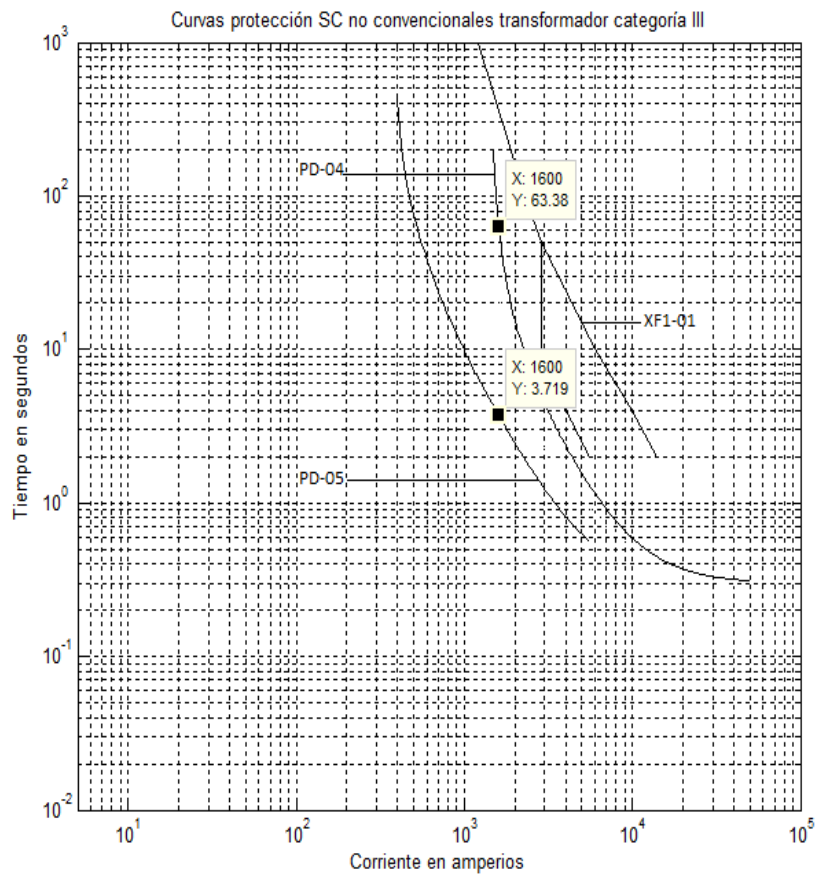


Figura 5-3. Protección de transformador categoría III de falla trifásica secundario.

En figura 5-4 se muestra la subestación eléctrica en la cual se realiza el estudio de corto circuito, en la figura 5-5 se obtiene la coordinación con curvas características estándares y se mide el  $CTI$  entre las protecciones primaria y respaldo, teniéndose un valor de tiempo relativamente grande en la parte de protección de sobrecarga y de fallas de bajo valor.



**Figura 5-4.** Subestación de potencia con transformador categoría III delta-estrella aterrizada de 115/12.5 kV y sus valores de circuito-corto.



**Figura 5-5.** Gráfica de coordinación del transformador de potencia categoría III con protección de sobrecorriente por el lado primario y secundario.

### 5.2.2 Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales.

Al definir un relevador de curva flexible no-estándar se logra adecuar mejor la protección a la curva de daño XF1-01 del transformador categoría III, la curva del relevador PD-04 se sustituyen por la nueva característica flexible PD-04ne. Se realiza la estimación de parámetros para el diseño del nuevo algoritmo de la función flexible no convencional, para determinar los parámetros de la función tipo exponencial aplicando regresión no lineal se realiza de acuerdo al **anexo A**. Al incluir la dinámica en la palanca, esta es representada en la ecuación 5.1.

Los valores de los coeficientes de la nueva función característica tipo exponencial del relevador PD-04ne determinado en la corrida del programa de regresión no lineal que corresponde a la gráfica de la **figura 5-6**, son:

$A = 3.08$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c = 25.332$  es el parámetro que modifica la palanca, dependiente de la corriente  $I$ .

$B = 0.27$  es el parámetro de tiempo definido

$N = 1.2$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

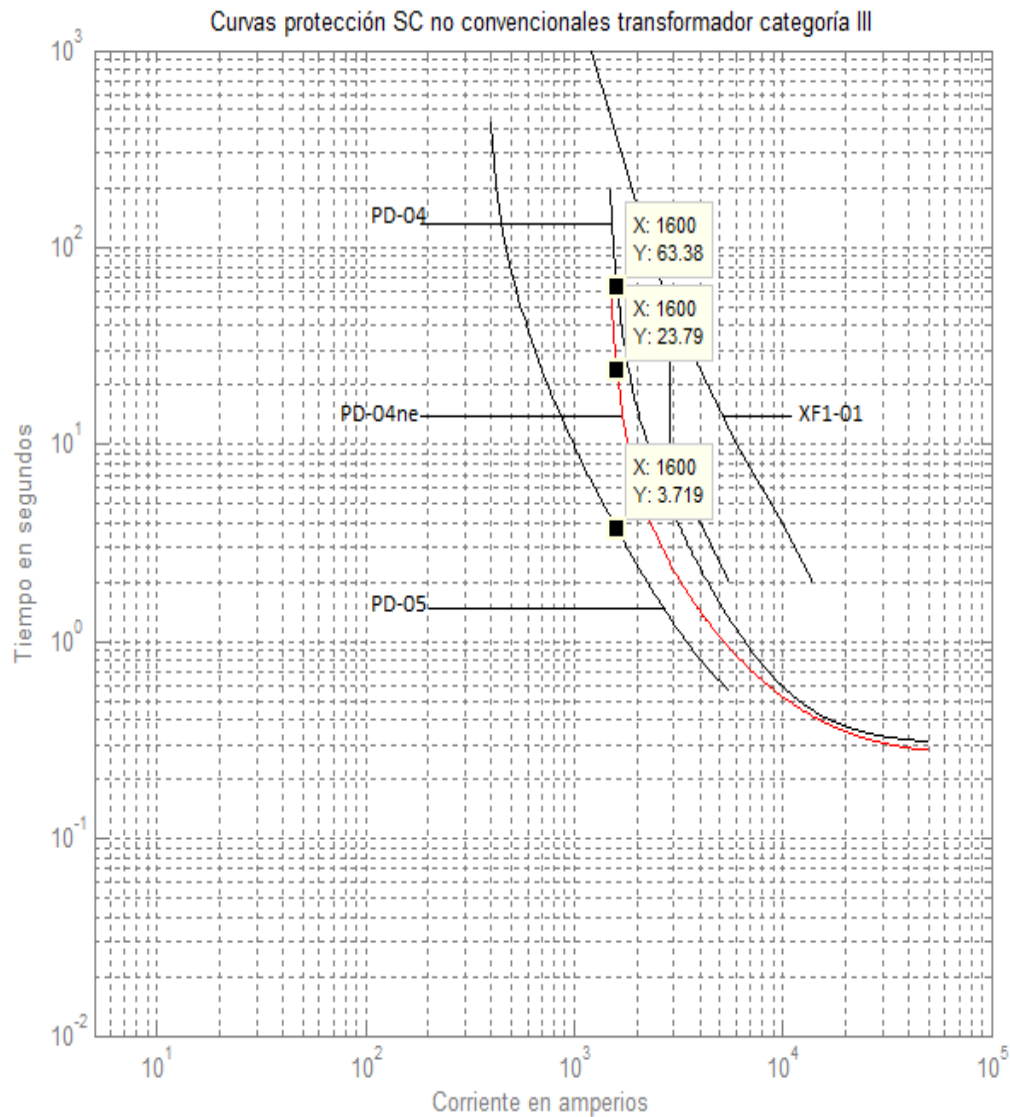
$$T(I) = \frac{A * e^{-I/c}}{I^N - 1} + B$$

$$T(I) = \frac{3.08 * e^{-I/25.332}}{I^{1.2} - 1} + 0.27 \quad (5.1)$$

#### *Prueba de ajuste de las nuevas curvas no convencionales.*

En la prueba de ajuste comparamos la función de tiempo no estándar definida a través de los puntos tiempo-corriente que mejora la protección y la función no estándar estimada con el modelo propuesto en capítulo 4 de una función de operación de doble dinámica como se presenta en el inciso 4.5.2. El resultado del ajuste con su porcentaje de

desviación y sus respectivos coeficientes de la función estimada, se muestran en **figura 5-7**.

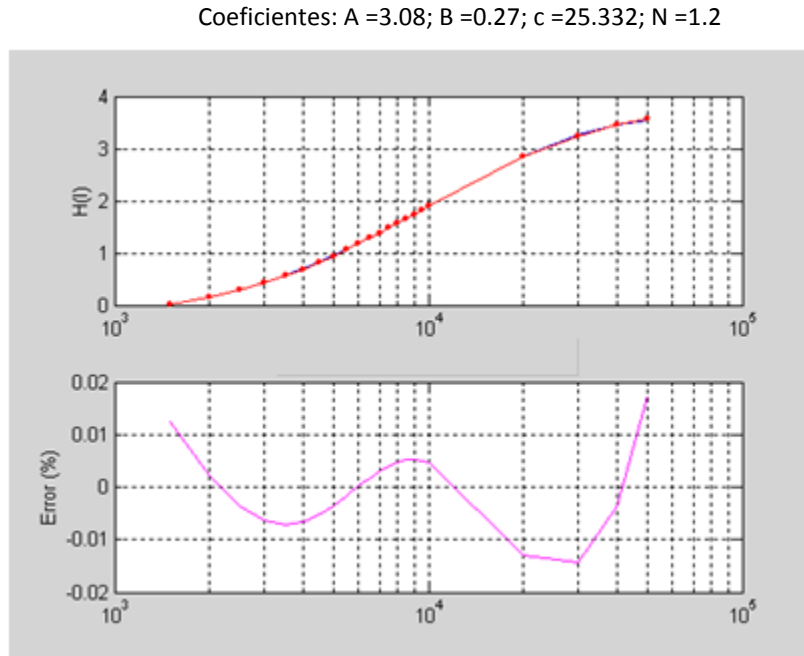


**Figura 5-6.** Comparación de tiempo en las características de protección de sobrecorriente estándar y no estándar de un transformador categoría III.

### 5.2.3 Resultados de la coordinación de protecciones con curvas no convencionales

En la gráfica de coordinación de la protección de sobrecorriente de un transformador de potencia categoría III a su curva de límite de falla con el relevador de característica convencional y no convencional, se muestra en la **figura 5-6**. Se observa la

mejora de la protección con un tiempo reducido, la disminución de esfuerzo mecánico y el efecto térmico admisible en el transformador con la característica no estándar PD-04ne del relevador de sobrecorriente cuando está presente la falla.



**Figura 5-7.** Curva de ajuste de un relevador de sobrecorriente no estándar para la protección de transformador de potencia categoría III.

*Mejora de índices de reducción de tiempo de operación del relevador y disminución de esfuerzos mecánicos y efectos térmicos en el equipo primario.*

En la **tabla 5.2** se muestran los índices de tiempo de operación en el relevador sobrecorriente no convencional y el esfuerzo que se reduce en el transformador de potencia al usar esta protección no convencional. Los valores de tiempo  $t_R$  reducido son mayores ante las corrientes de sobrecarga y baja corriente de falla; mientras que se tienen menor reducción de tiempo  $t_R$  en los altos valores de corriente de falla. Se presenta un método para cuantificar la reducción en los valores dejado-por un factor  $\Delta I^2 t$  que corresponde al esfuerzo mecánico y térmico en el equipo primario durante condiciones de

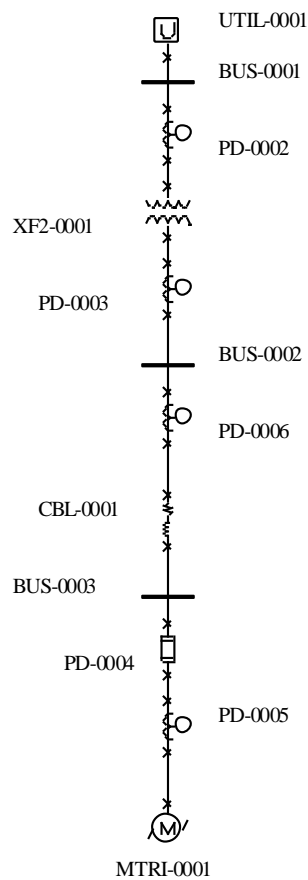
alta corriente de falla al cuadrado y el tiempo de duración de la falla. En los valores del factor  $\Delta I^2-t$  de la **tabla 5.2**, se tiene mayor reducción de esfuerzo en alta corriente de falla y también en baja corriente de falla; en los valores medios de falla es donde se tiene menor reducción del factor  $\Delta I^2-t$ .

**Tabla 5.2** Resultados de la coordinación de los relevadores estándares (PD-05 y PD-04) y no-estándar (PD-04ne) en el transformador categoría III, reduciendo tiempo y esfuerzo.

Corriente de cortocircuito I(kA)	Tiempo Relé PD-05 t(s)	PD-05 vs PD-04ne CTI(s)	Tiempo Relé PD-04 t(s)	Tiempo Relé PD-04ne t(s)	Tiempo Reducido $t_R$ (s)	Esfuerzo Reducido $\Delta I^2-t(A^2-s)$
1.50	4.2220	67.258	195.968	71.480	124.488	280.09
2.00	2.4436	4.0198	15.5100	6.4634	9.0466	36.19
2.50	1.6541	1.7346	7.2587	3.3887	3.8700	24.19
3.00	1.2338	1.0741	4.4843	2.3079	2.1764	19.59
3.50	0.9832	0.7770	3.1442	1.7602	1.7600	21.56
4.00	0.8217	0.6092	2.3767	1.4309	0.9458	15.13
4.50	0.7114	0.5007	1.8904	1.2121	0.6783	13.74
5.00	0.6328	0.4239	1.5604	1.0567	0.5037	12.59
5.50	0.5748	0.3661	1.3254	0.9409	0.3845	11.63
6.00			1.1514	0.8517	0.2997	10.79
6.50			1.0189	0.7808	0.2381	10.06
7.00			0.9154	0.7234	0.1920	9.41
7.50			0.8330	0.6760	0.1570	8.83
8.00			0.7663	0.6362	0.1301	8.33
8.50			0.7114	0.6025	0.1089	7.87
9.00			0.6658	0.5735	0.0923	7.48
9.50			0.6274	0.5484	0.0790	7.13
10.0			0.5948	0.5264	0.0684	6.84
20.0			0.3725	0.3504	0.0221	8.84
30.0			0.3325	0.3072	0.0253	22.77
40.0			0.3180	0.2897	0.0283	45.28
50.0			0.3116	0.2814	0.0302	75.50

### 5.3 Caso II. Alimentador principal transformador-cable-carga

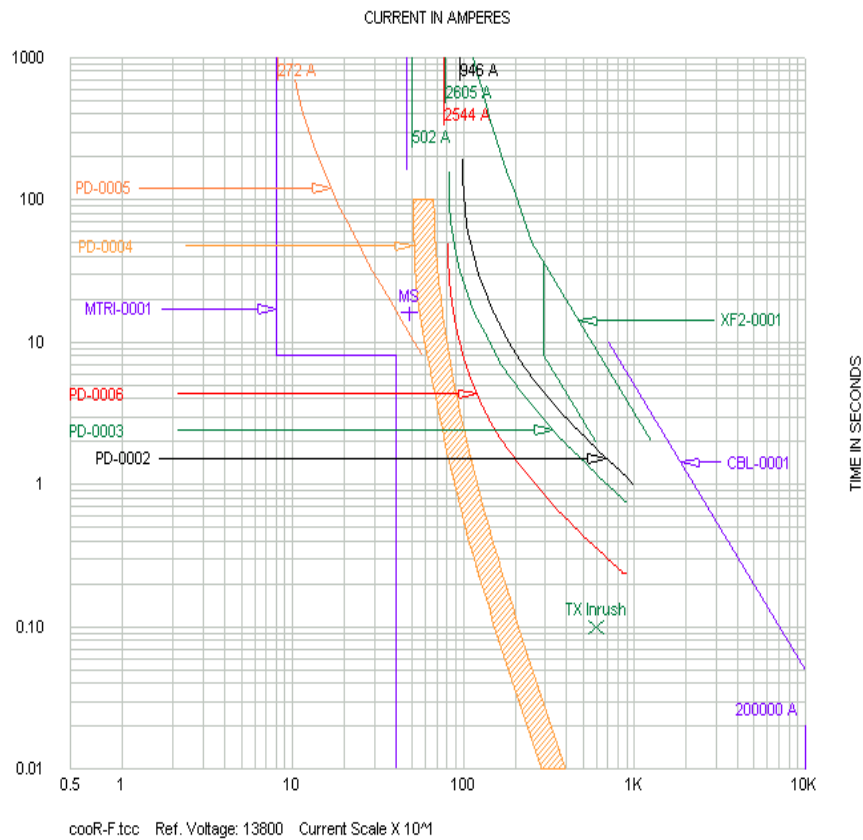
En los sistemas de potencia industriales se encuentran arreglos de elementos primarios como transformador-cable-motor que utilizan dispositivos de protección de sobrecorriente, al realizar la coordinación de protecciones de este arreglo “suministro-consumo” se ve la necesidad de modificar la forma de la curva para disminuir el CTI, reducir los dispositivos de protección y adecuar mejor la coordinación con la curva de daño de los elementos protegidos, como se presenta en [25]. En **figura 5-8** se muestra el sistema de “alimentación-consumo” industrial con esta problemática y sus curvas características de protección, donde se tienen grandes márgenes de tiempo en el coordinado de las curvas características estándares y la necesidad de usar dos dispositivos protección para lograr un ajuste con la curva de operación del motor.



**Figura 5-8.** Sistema de potencia industrial a tensión 13800/4160 voltios.

### 5.3.1 Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares

A continuación se realiza el estudio de cortocircuito, la coordinación de protección con sus datos de entrada usando dispositivos de protección con características estándares. En la **figura 5-9** se muestra la gráfica de coordinación del estudio de la red de potencia eléctrica industrial. Se observan dos oportunidades de mejorar el ajuste de la protección, la primera es sustituir el relevador PD-05 (*MTR relay stall time*) [13], por un relevador curva flexible; y la segunda adecuar la protección a la curva de daño XF2-01 del transformador categoría III al modificar las curvas de los relevadores PD-02 y PD-03 [53], por la nueva función flexible no estándar que fue el modelo de diseño del relevador de sobrecorriente presentado en el capítulo 4 de este trabajo tesis. El propósito es reducir tiempos de disparo, disminuir los esfuerzos mecánicos y daños térmicos en el equipo de potencia del sistema eléctrico tanto motor, transformador y cable.



**Figura 5-9.** Gráfica de coordinación de dispositivos de protección con curvas características estándares en el sistema eléctrico industrial de la **figura 5-8**.



### 5.3.2 Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales.

Como se presenta en el capítulo 4 se aplica la regresión no lineal para la estimación de parámetros de diseño del nuevo algoritmo; en este caso particular se obtienen los parámetros de la función tipo exponencial con dinámica en la palanca, representada en la ecuación 5.2.

Se lleva a cabo la corrida del programa de regresión no lineal de la nueva curva característica que mejora los tiempos de coordinación; en la **figura 5-11** se muestra la gráfica de coordinación donde el nivelado es con las curvas (verdes) del tipo exponencial y en las tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran los valores de tiempo de las curvas características convencional y no convencional; y el CTI intervalo de tiempo de coordinación entre ellas.

Los valores de los parámetros o coeficientes de la nueva función característica tipo exponencial de la curva característica del relevador PD-5nc según se muestra en la **figura 5-11**, son:

$TD= 0.8$  es el tiempo dial que es constante.

$A= 3.1393$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c= 3.7976$  es el parámetro que modifica la palanca, dependiente del cambio de corriente  $I$ .

$B= 0.8027$  es el parámetro de tiempo definido.

$N= 0.3704$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

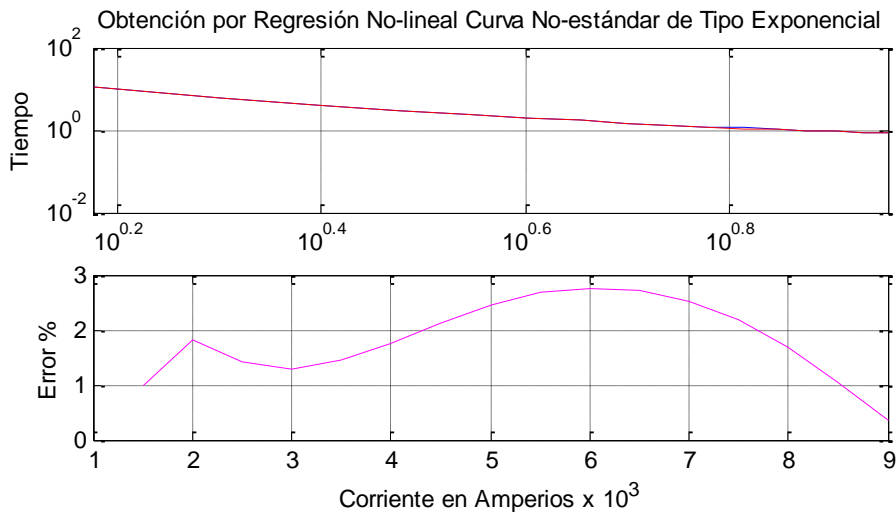
$$T(I) = \frac{TD * A * e^{-I/c}}{I^N - 1} + TD * B$$

$$T(I) = \frac{2.51144 * e^{-I/3.7976}}{I^{0.3704} - 1} + 0.64216 \quad (5.2)$$

*Prueba de ajuste de las nuevas curvas no convencionales.*

En la **figura 5-10** se muestra el ajuste de curvas para la protección del transformador donde se presenta la curva de puntos tiempo-corriente sugerido, la curva de la función no convencional definida por regresión no lineal con sus coeficientes y el porcentaje de error de desviación entre una curva y la otra, teniéndose un porcentaje de error por debajo del 3%.

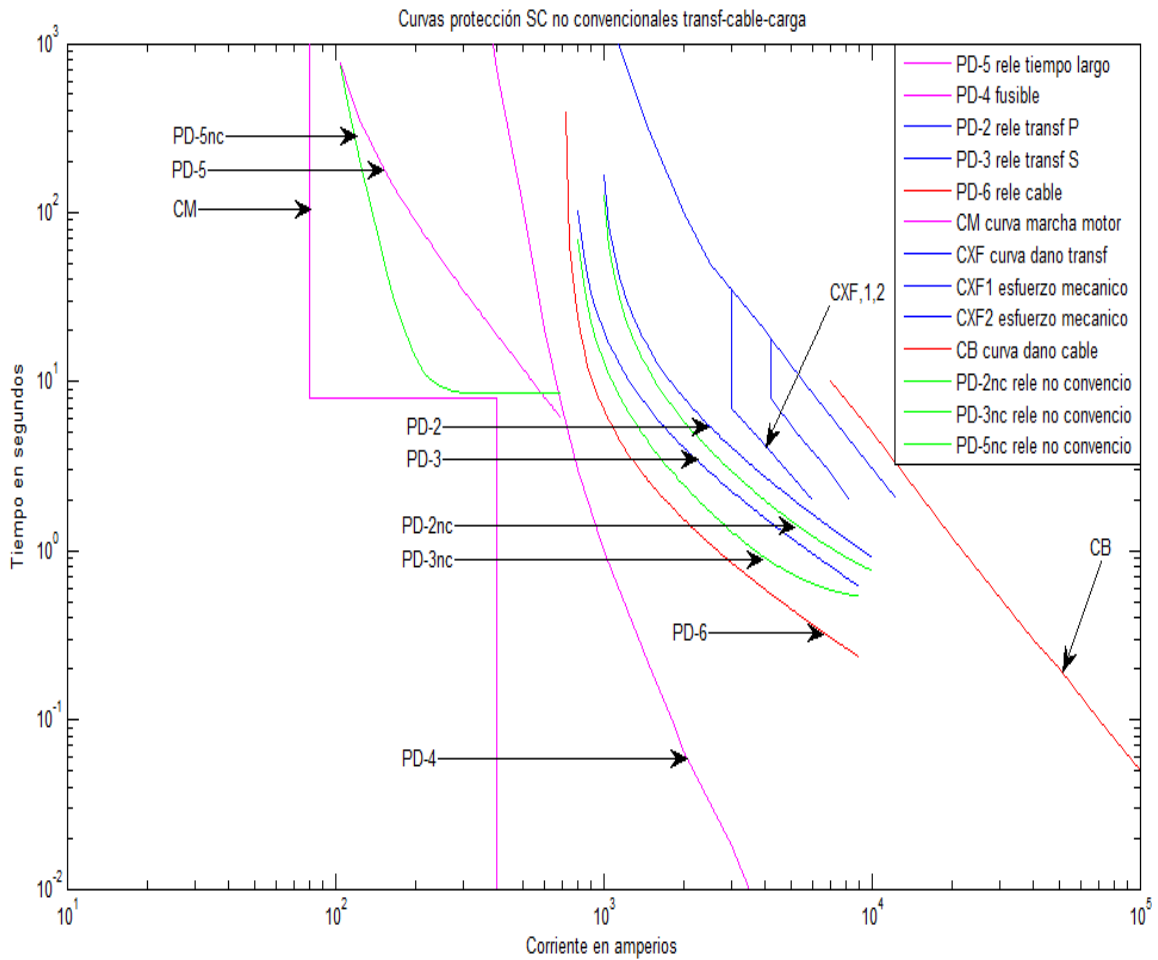
Coeficientes:  $A = 3.1393$     $B = 0.8027$     $c = 3.7976$     $N = 0.3704$



**Fig. 5-10** Gráfica de ajuste curva PD-2nc del transformador y por ciento de error de ajuste

**5.3.3 Resultados de la coordinación de protecciones con curvas no convencionales**

Los resultados gráficos **figura 5-15** y tabulares presentados en las tablas 5.3, 5.4 y 5.5 de coordinación y ajuste utilizando el modelo propuesto función flexible en los relevadores PD-05nc, PD-02nc y PD-03nc en comparación con el caso base, muestran una reducción significativa de tiempo de operación. En los resultados tabulares se incluye la medida del esfuerzo reducido ( $-\Delta I^2 t$ ) al utilizar el modelo propuesto del relevador.



**Figura 5-11.** Coordinación con la función propuesta curva flexible en los relevadores PD-5, PD-2 y PD-3.

En los resultados de estas dos oportunidades de mejora de la protección de sobrecorriente con el modelo de curva flexible, la primera fue capaz de cubrir protección contra sobrecarga y valores de cortos circuitos bajos; lográndose ajustar cerca de la curva de marcha del motor. Y la otra utilidad de la curva flexible es lograr una adecuada protección en la curva de daño de corriente de falla a través del transformador de potencia categoría III, sobre todo en la parte correspondiente al efecto de esfuerzo mecánico, como se muestra en **figura 5-11**.

*Índices mejorados de tiempo de operación, esfuerzos mecánicos, efectos térmicos y energía ahorrada en los equipos y sistema eléctrico*

En la tabla 5.3 se presentan los valores de la protección del motor con las curvas características de tiempo inverso convencional y flexible no convencional correspondientes a los relevadores PD-05 estándar y PD-05nc del modelo propuesto donde tenemos los tiempos de operación de cada uno de ellos, y el tiempo reducido por el relevador PD-05nc con curva característica no convencional. También tenemos los valores de esfuerzo reducido ( $-\Delta I^2 t$ ) por el relevador PD-05nc.

**TABLA 5.3.** Comparación de datos curva convencional (estándar) y no-convencional (flexible) en el relevador PD-05 del motor, presentando el tiempo reducido y el factor de esfuerzo reducido.

Relevador de tiempo largo para el motor, PD-05 $I_{\text{arranque}} = 85 \text{ A}$		Relevador para el motor no-convencional(propuesto), PD-05 $J(I) = Ae^{-I/C}$ A=12, C=0.4 y B=8.5		
$I_{\text{falla}}$ (kA)	$t_{\text{std}}$ (s)	$t_{\text{nstd}}$ (s)	$T_{\text{reducido}}$ (s)	$(-\Delta I^2 t)$ (kA <sup>2</sup> -s)
0.105	760.526	615.665	144.86	1.5971
0.155	172.024	40.5322	131.49	3.1590
0.205	83.0459	12.4979	70.548	2.9647
0.255	50.000	9.4839	40.516	2.6345
0.305	33.6829	9.0749	24.608	2,289
0.355	24.3266	9.0124	15.314	1.9299
0.405	18.4311	8.5021	8.929	1.4645
0.455	14.4644	8.5004	4.9643	1.0277
0.505	11.6626	8.5001	2.1625	0.5515
0.555	9.6077	8.5000	0.1077	0.0332
0.605	8.0546	8.5000	-0.4454	-0.1630
0.655	6.8515	8.5000	-1.6485	-0.7072
0.695	6.0739	8.5000	-2.4261	-1.1718

En la tabla 5.4 se presentan los valores tabulados de la protección del transformador en el secundario con las curvas características de tiempo muy inversa convencional y

flexible no convencional correspondientes a los relevadores PD-03 estándar y PD-03nc del modelo propuesto, los cuales están como respaldo de la protección primaria PD-06 del cable, donde se tienen los tiempos de operación de cada uno de ellos, y el tiempo reducido por el relevador PD-03nc con curva característica no convencional. También tenemos los valores de esfuerzo reducido ( $-\Delta I^2 t$ ) por el relevador PD-03nc logrando un valor máximo de 8.149 kA<sup>2</sup>-s, un valor mínimo de 2.462 kA<sup>2</sup>-s y un valor promedio de 6.252 kA<sup>2</sup>-s.

**TABLA 5.4** Comparación de valores de datos curva convencional (estándar) y propuesta no convencional de los relevadores PD-03 vs PD-3nc

Primary Relay VI PD-06 $I_{pickup} = 720A$		Backup Relay VI PD-03 $I_{pickup} = 750A$		Non-conventional Relay PD-03nc $J(I) = Ae^{-IC}$ $A = 14.5, C = 6.5$ y $B = 0.5$			
$I_{fault}$ (kA)	$t_{op}$ (s)	$t_{op}$ (s)	CTI (s)	$t_{op}$ (s)	CTI (s)	$T_{reducido}$ (s)	$-\Delta I^2 t$ kA <sup>2</sup> -s
1.0	6.9428	20.25	13.31	14.67	7.730	5.5770	5.577
1.5	2.4923	6.750	4.258	4.764	2.272	1.9862	4.469
2.0	1.5187	4.050	2.531	2.809	1.290	1.2411	4.964
2.5	1.0921	2.893	1.801	1.989	0.896	0.9043	5.652
3.0	0.8526	2.250	1.392	1.545	0.692	0.7052	6.347
3.5	0.6992	1.841	1.142	1.272	0.572	0.5694	6.975
4.0	0.5927	1.558	0.965	1.089	0.497	0.4685	7.496
4.5	0.5143	1.350	0.836	0.961	0.447	0.3891	7.879
5.0	0.4542	1.191	0.737	0.867	0.413	0.3242	8.105
5.5	0.4067	1.066	0.659	0.796	0.390	0.2694	8.149
6.0	0.3682	0.964	0.596	0.742	0.374	0.2223	8.003
6.5	0.3363	0.880	0.544	0.699	0.363	0.1810	7.647
7.0	0.3095	0.810	0.501	0.666	0.356	0.144	7.076
7.5	0.2867	0.750	0.463	0.638	0.352	0.112	6.277
8.0	0.2670	0.698	0.431	0.616	0.349	0.082	5.242
8.5	0.2499	0.653	0.403	0.598	0.348	0.055	3.974
9.0	0.2348	0.614	0.379	0.583	0.348	0.030	2.462

En la tabla 5.5 se presentan los valores tabulados de la protección del transformador por primario con las curvas características de tiempo muy inversa convencional y flexible no convencional correspondientes a los relevadores PD-02 estándar y PD-02nc del modelo propuesto; se tienen los tiempos de operación de cada uno de ellos, y el tiempo reducido por el relevador PD-02nc con curva característica no convencional. También tenemos los valores de esfuerzo reducido ( $-\Delta I^2 t$ ) por el relevador PD-02nc lográndose un valor máximo de 42.23 kA<sup>2</sup>-s, un valor mínimo de 8.5 kA<sup>2</sup>-s y un valor promedio de 15.14 kA<sup>2</sup>-s.

**TABLA 5.5** Comparación de valores de datos curva convencional (estándar) y propuesta no convencional de los relevadores PD-02 vs PD-02nc

Backup 2 Relay VI PD-02 $I_{pickup} = 950A$		Non-conventional Relay PD-02nc $J(I) = Ae^{-IC}$ $A = 2.5, C = 3.8$ y $B = 0.6$			
$t_{op}$ (s)	CTI (s)	$t_{op}$ (s)	CTI (s)	$T_{reducido}$ (s)	$-\Delta I^2 t$ kA <sup>2</sup> -s
166.72	146.47	124.49	111.05	42.233	42.23
15.156	8.4060	11.193	6.9742	3.963	8.916
7.9392	3.8892	5.8142	3.3901	2.125	8.500
5.3782	2.4854	3.9154	2.2303	1.4628	9.142
4.0664	1.8164	2.9500	1.6552	1.1164	10.05
3.2691	1.4282	2.3686	1.3079	0.9005	11.03
2.7332	1.1755	1.9822	1.0731	0.7510	12.01
2.3482	0.9982	1.7081	0.9024	0.6401	12.96
2.0583	0.8671	1.5047	0.7721	0.5536	13.84
1.8321	0.7663	1.3484	0.6689	0.4837	14.63
1.6507	0.6864	1.2252	0.5852	0.4255	15.32
1.5021	0.6217	1.1260	0.5158	0.3761	15.89
1.3779	0.5679	1.0448	0.4574	0.3331	16.32
1.2727	0.5227	0.9775	0.4077	0.2952	16.60
1.1824	0.4842	0.9208	0.3647	0.2616	16.74
1.1041	0.4509	0.8728	0.3276	0.2313	16.71
1.0355	0.4219	0.8318	0.2952	0.2037	16.50

## 5.4 Caso III. Protección en la acometida de un sistema eléctrico industrial

En los sistemas de distribución eléctrica se definen: el ajuste de los relevadores, las cargas conectadas que deben coordinarse con estos relevadores, así es común el modificar la forma de la curva y reducir el intervalo de tiempo de coordinación CTI, como se presenta [35]. En la **figura 5-12(a)** se muestra el sistema de distribución eléctrico industrial SDEI y la fuente de alimentación de la planta industrial, con algunos problemas de ajuste y coordinación. En la **figura 5-12(b)** se muestra la gráfica de coordinación de las curvas características de operación de los diversos dispositivos de protección de sobrecorriente, donde se presentan grandes márgenes de tiempo en el coordinado de las curvas características estándares entre fusible-relevador, y también entre relevador-relevador con forma de curvas características estándares diferentes.

### 5.4.1 Simulación para generar la coordinación de protección con curvas estándares.

Se realiza el estudio de corto circuito del SDEI mostrado en la **figura 5-12(a)** y se lleva a cabo la coordinación de protecciones de los relevadores de sobrecorriente y fusibles usando el programa de análisis de protecciones [54] e identificando algunas oportunidades de mejorar los tiempos de coordinación en las siguientes parejas de dispositivos de protección primario-respaldo del relevador R3 con relevador R4 y del relevador R4 con relevador R5, como se muestra en la **figura 5-13**. El relevador R4 se toma para nivelado con relevador R3 río abajo y con relevador R5 río arriba que corresponde a la red de suministro, el cual no puede ser modificado.

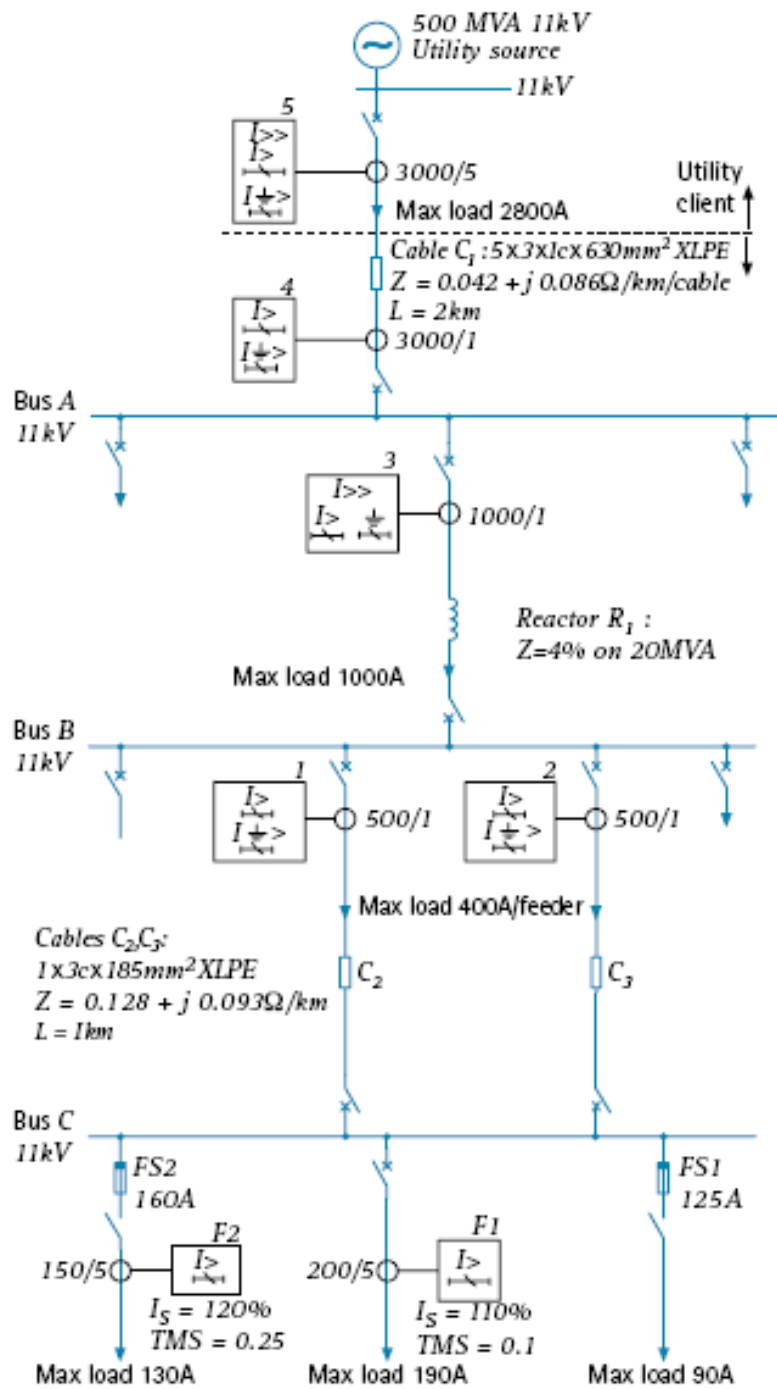
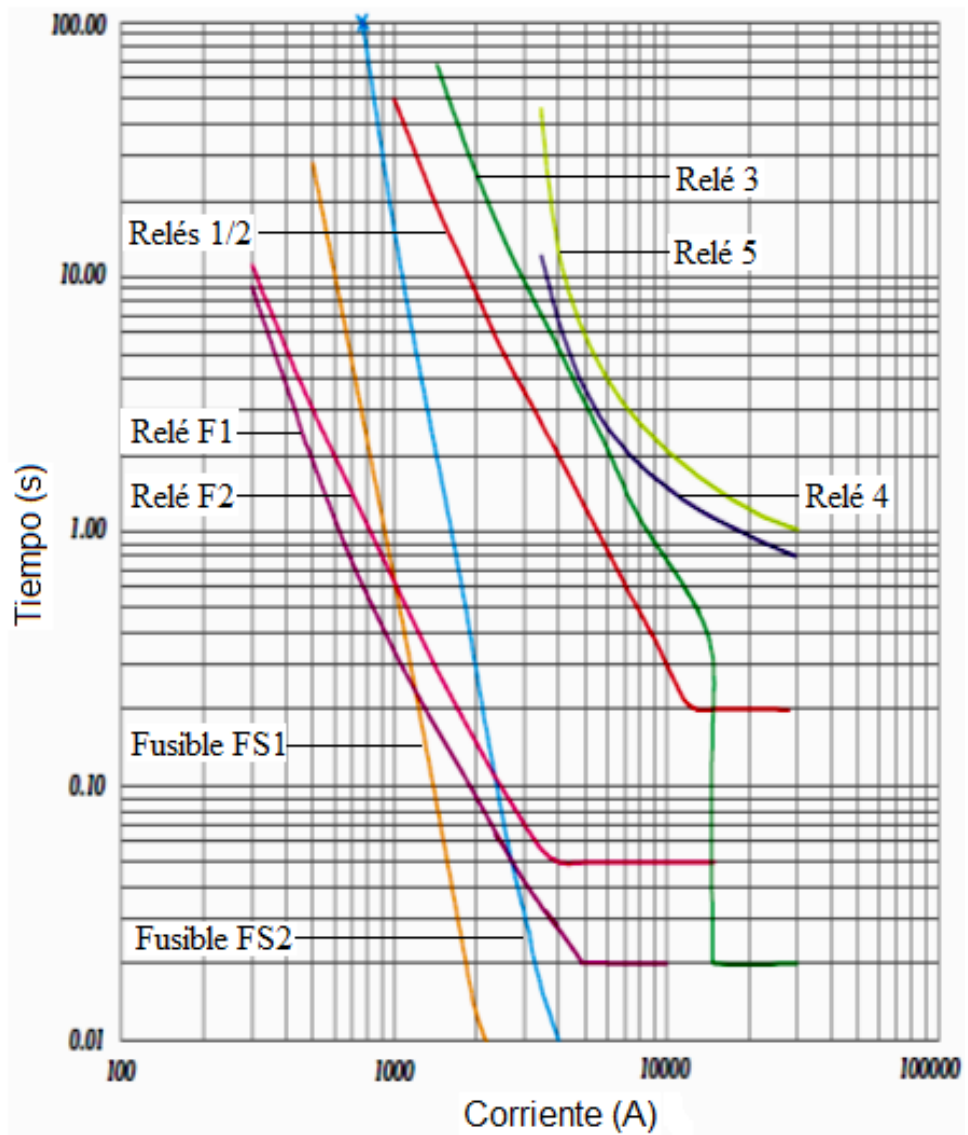
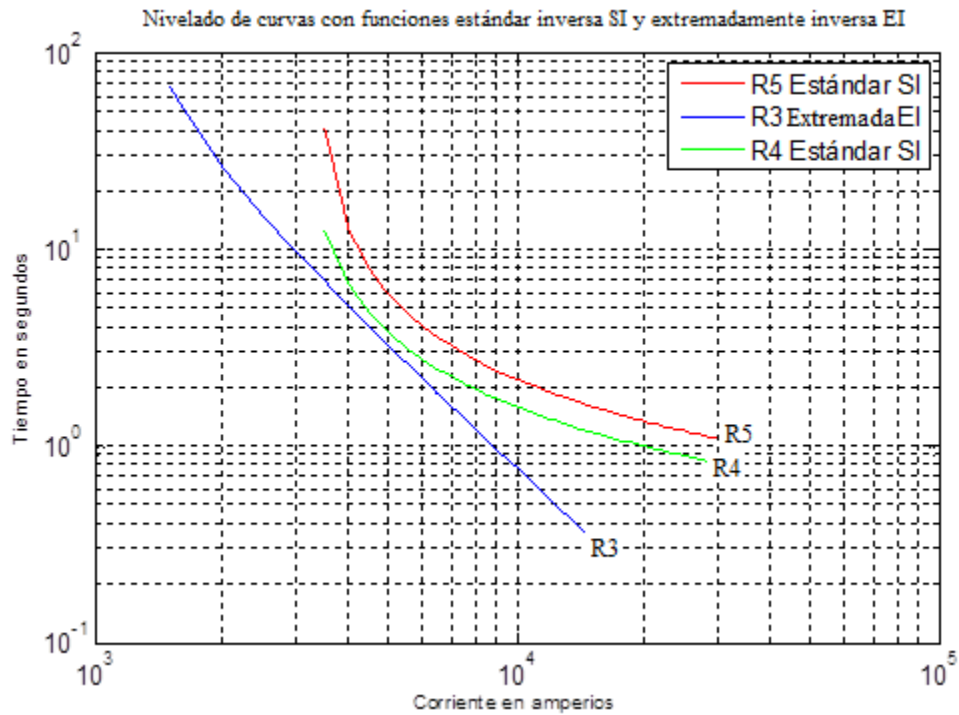


Figura 5-12 (a) Sistema eléctrico de distribución de 11000 voltios.





**Figura 5-12.** (b) gráfica de coordinación dispositivos de sobrecorriente: fusibles y relevadores con características estándares, y en la acometida el nivelado es con curvas de diferente tipo.



**Figura 5-13.** Gráfica de coordinación entre la fuente de suministro (Utility source) y el SDEI, donde se puede mejorar la coordinación.

Haciendo uso de MATLAB y reproduciendo la gráfica de coordinación de la **figura 5-13** de los relevadores 3, 4 y 5; modificando a una curva flexible el relevador 4 para una mejor nivelación río abajo y río arriba, se generan los valores de datos de las curvas características tiempo-corriente obtenidas en la simulación. La propuesta de curva no-estándar en el relevador 4 mejora la coordinación, la cual corresponde a una función con forma *Exponencial* en el numerador y con la misma forma del denominador de la expresión del relevador de sobrecorriente muy inverso (VI) estándar. La nueva función no estándar es la ecuación (5.3) con sus respectivos parámetros o constantes que son definidas para una curva en particular, según la necesidad del caso o problema para mejorar la protección en cuanto a rapidez, selectividad, sensibilidad, menor esfuerzo en el equipo protegido o incremento de la vida útil, etc.

$$T(I) = \frac{Ae^{-I/c}}{I^{N-1}} + B \quad (5.3)$$

Donde:

$T(I)$  es la variable dependiente tiempo, en función de  $I$ .

$I$  es la variable independiente múltiplos de la corriente de falla  $I_{fault}$  con respecto a la corriente de arranque  $I_{pickup}$ .

$A$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c$  es el parámetro que modifica la palanca, dependiendo del cambio de corriente  $I$ .

$B$  es el parámetro de tiempo definido

$N$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

#### **5.4.2 Determinación de los parámetros de las nuevas curvas no convencionales.**

Como se presenta en el capítulo 4 en la estimación de parámetros para el diseño del nuevo algoritmo de la función flexible no convencional, el uso de la técnica de regresión no lineal y en este caso particular se aplica para obtener los parámetros de la función tipo exponencial con dinámica en la palanca, representada en la ecuación 5.4.

Se lleva a cabo la corrida de los programas de regresión no lineal (nivelación) de la nueva curva característica que mejora los tiempos de coordinación, en la **figura 5-15** se muestra la gráfica de coordinación donde el nivelado es con una curva (verde) del tipo exponencial y en la tabla 5.6 se muestran los datos de las curvas e intervalos de tiempo entre ellas.

Los valores de los parámetros de la nueva función característica tipo exponencial determinados en la corrida del programa de regresión no lineal que corresponde a la gráfica de la **figura 5-15**, curva característica no estándar del relevador R4, son:

$TD= 0.5$  es el tiempo dial que es constante.

$A=270.573$  es el parámetro correspondiente al valor inicial de la palanca.

$c=11.7388$  es el parámetro que modifica la palanca, dependiente de la corriente  $I$ .

$B= 1.4397$  es el parámetro de tiempo definido

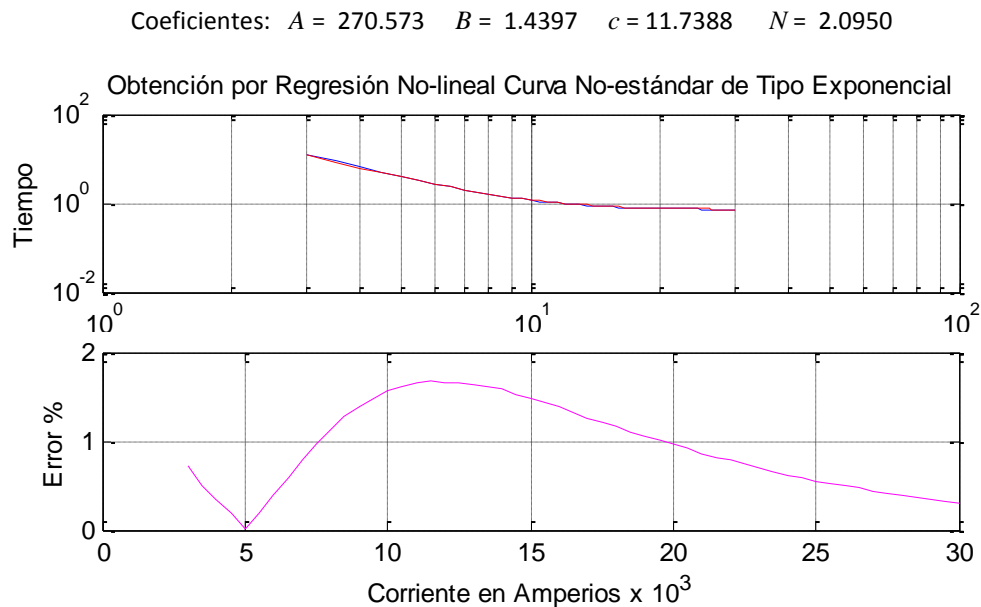
$N= 2.0957$  es el exponente de la variable independiente  $I$ .

$$T(I) = \frac{TD * A * e^{-I/c}}{I^N - 1} + TD * B$$

$$T(I) = \frac{135.2865 * e^{-I/11.7388}}{I^{2.095} - 1} + 0.71985 \quad (5.4)$$

*Prueba de ajuste de las nuevas curvas no convencionales.*

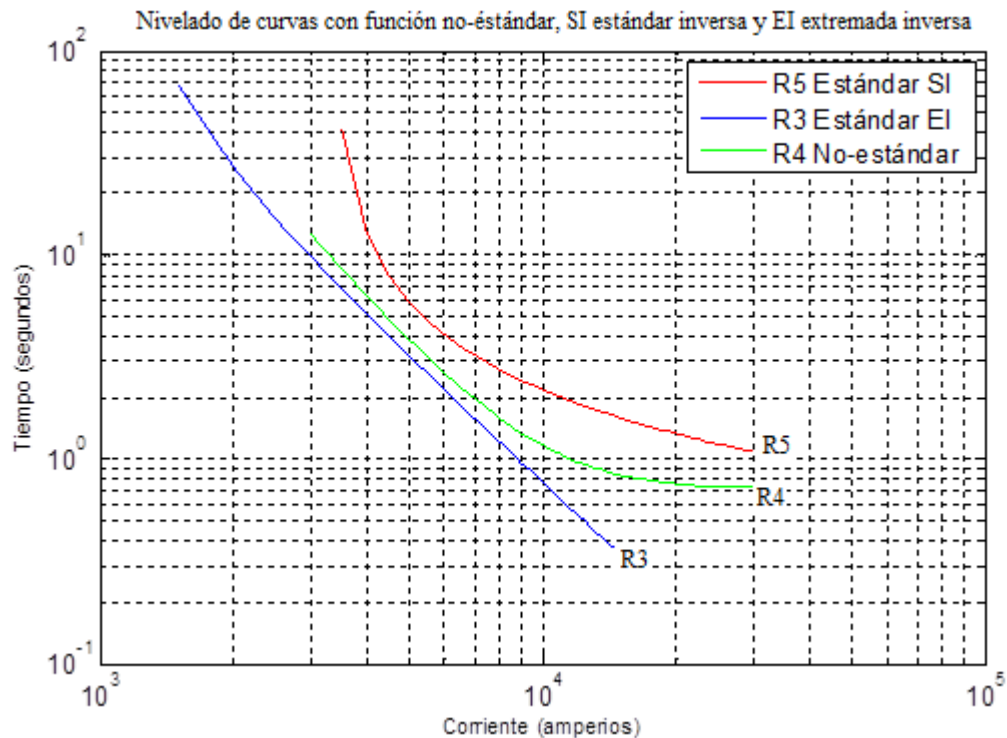
Se realiza esta prueba evaluando la nueva función no convencional con sus parámetros obtenidos en el inciso 5.4.2 del caso SDEI en la acometida correspondiente al relevador R4<sub>NC</sub> y comparando con los valores de puntos I-t de datos generados en el inciso 5.4.1, cumpliendo con el criterio de evaluación sobre desviación de ajuste de curvas, como se describe en el capítulo 4, inciso 4.5.2. En la **figura 5-14** se muestran las curvas ajustadas con su valor de error de desviación y que se encuentra dentro de lo permitido para cualquier valor de corriente en todo el intervalo de la curva característica no convencional.



**Figura 5-14.** Gráfica de ajuste de curva y por ciento de error de ajuste

### 5.4.3 Resultados de la coordinación de protecciones con curva no convencional

Se tiene una mejor nivelación de la curva no estándar relevador R4 tanto con la curva extremadamente inversa relevador R3 río abajo y un poco menos con la curva moderadamente inversa relevador R5 río arriba que corresponde al sistema de utilidad que ya se encuentra definido y no se puede modificar.



**Figura 5-15.** Relevador R4 cambio de característica usando función exponencial en el numerador  $Ae^{-I/C}$  para mejorar ajuste río abajo R3 y río arriba con R5.

Se logró tener un buen ajuste para el respaldo del relevador R3 en todo el rango de corriente desde la corriente de arranque  $I_{pickup}$  hasta la máxima corriente de corto-circuito disponible y también se cumple su propia sensibilidad del relevador R4 no estándar en la corriente de arranque de disparo de la protección; en cuanto a la coordinación con relevador agua arriba R5 se buscó tener buen ajuste en el rango de corrientes de falla

altas entre 20000 A y 30000 A, pero no para corrientes de falla bajas, todo esto se visualiza en la **figura 5-15** gráficamente.

*Mejora de Índices de reducción de tiempo de operación del relevador y disminución de esfuerzos mecánicos y efectos térmicos en el equipo primario.*

Los valores tabulados de las diversas curvas características estándares y no estándar, se presentan en la **tabla 5.6**. Índices de tiempo reducido y disminución de esfuerzo tanto mecánico como térmico. De los valores registrados en la **tabla 5.6**, se observa que en el valor de corriente de falla más bajo se tiene mayor tiempo reducido, en los demás valores de corrientes de falla se tienen tiempos ligeramente reducidos y van siendo menores conforme es mayor la corriente de falla. Por otro lado, un aspecto importante dentro de la protección de sobrecorriente es reducir los esfuerzo en el equipo de potencia primario de la red cuando ocurre una falla, y en la **tabla 5.6** se muestra que los mayores valores de reducción de esfuerzo son en la mínima corriente de falla y en los valores máximos de corriente de falla; en los valores medios se tuvo el menor índice de esfuerzo. Este comportamiento se debe a la combinación del valor cuadrático de la corriente de falla como al valor de tiempo reducido.

**TABLA 5.6** Comparación de valores de datos de curva estándar y curva no convencional (flexible) en el relevador R4<sub>PRINCI</sub>, introduciendo el tiempo reducido y el factor de energía ahorrada

Primary Relay EI PD06 $I_{pickup} = 1060 \text{ A}$		Standard Relay Backup SI Rprinci $I_{pickup} = 3000$		Non-standard Relay (Flexible curve) $J(I) = Ae^{-I/C}$			
$I_{falla}$ (kA)	$t_{rab}$ (s)	$\Delta t$ (s)	$t_{std}$ (s)	$\Delta t$ (s)	$t_{nstd}$ (s)	$T_{reducido}$ (s)	$(-)\Delta I^2 t$ (kA <sup>2</sup> -s)
3.5	6.8670	5.6030	12.47	1.5739	8.4409	4.0291	49.35
4.0	5.1360	1.5360	6.672	1.0469	6.1829	0.4891	7.825
6.0	2.1907	0.5670	2.758	0.3956	2.5863	0.1717	6.181
7.0	1.5959	0.6570	2.253	0.3408	1.9367	0.316	15.48
8.0	1.2152	0.7280	1.9430	0.3339	1.5491	0.3939	25.21
9.0	0.9565	0.7760	1.7330	0.3476	1.3041	0.4289	34.74
10.0	0.7727	0.8070	1.5800	0.3696	1.1423	0.4377	43.77
11.0	0.6374	0.8250	1.4624	0.3943	1.0317	0.4307	52.11
12.0	0.5348	0.8346	1.3694	0.4193	0.9541	0.4153	59.80
13.0	0.4551	0.8325	1.2936	0.4432	0.8983	0.3953	66.80
14.0	0.3921	0.8384	1.2305	0.4654	0.8575	0.3730	73.11
15.0	0.3413	0.8357	1.1770	0.4858	0.8271	0.3499	78.73
20.0	0.3413	0.6543	0.9956	0.4177	0.7590	0.2366	94.64

# Capítulo 6

## Conclusiones y Recomendaciones

---

### 6.1 Introducción

Existen artículos y reportes técnicos enfocados en el uso de la ecuación característica de los estándares ANSI/IEEE y IEC del relevador de sobrecorriente, con variantes en lo inverso de la curva y que sus constantes  $A$ ,  $B$  y  $N$  pueden tomar diferente valor para obtener un margen amplio de curvas de la forma exponencial según la ecuación. Esto nos indica que cada vez se amplía este margen de diferentes curvas, el usar demasiadas curvas ya definidas dificulta la aplicación haciendo más complicado y confuso el proceso de selección para lograr una apropiada coordinación de la protección.

La aportación en esta tesis es permitir que cambie la forma de la curva característica del relevador de sobrecorriente de una manera más flexible sin tener que encajonarse en la forma inversa y en las convencionales instantáneas y de tiempo definido; sino una forma general o universal para cualquier condición o necesidad que se presenta en la protección de sobrecorriente. La propuesta de este trabajo es diseñar un relevador de sobrecorriente con una función de doble dinámica, una de ellas es la ecuación característica de los estándares IEC y ANSI/IEEE con el denominador tipo exponencial, y la otra dinámica es la que se presenta con una función en el numerador  $A(I)$  que puede tomar diferentes expresiones, como una nueva alternativa para mayor flexibilidad en la generación de diversas formas de curvas. Pero además, cumpliendo la necesidad específica según el caso de estudio de protección y coordinación.



## 6.2 Conclusiones

El modelo propuesto del relevador de sobrecorriente de tiempo permite la creación de las curvas de tiempo que no son convencionales y puede reducir el tiempo de exposición del equipo primario a las corrientes de cortocircuito.

Al aumentar los grados de libertad en el modelo del relevador, se pueden tener ciertas condiciones que permiten definir expresiones analíticas en el modelo del relevador para un problema de coordinación en específico.

La implementación del modelo propuesto del relevador en sistemas de potencia industrial mejora la coordinación en una forma total, reduciendo los tiempos de operación vía las curvas de daño de equipo primario y otros dispositivos de protección contra sobrecorriente.

El modelo propuesto de un relevador de sobrecorriente con curvas no convencional permite la reducción de esfuerzos mecánicos y efectos térmicos y podría prevenir un daño a los elementos primarios en el sistema eléctrico industrial.

Además, este relevador podría reducir el consumo de energía mediante las pérdidas eléctricas durante condiciones de falla. Por consiguiente, puede aumentar la vida útil de los equipos primarios.

La función más apropiada,  $A(I)$ , puede depender del caso de estudio en particular. Por lo tanto, la curva de tiempo es diseñada específicamente para cada problema de coordinación, mejorando las condiciones de protección de la red.

La aplicación del relevador propuesto en el lado primario del transformador categoría III mejoró la coordinación con su curva de daño para fallas frecuentes y con otras curvas características estándar de los dispositivos de protección de sobrecorriente en el secundario resultando en menores tiempos de operación y menor intervalo de tiempo de coordinación.

### **6.3 Aportaciones de los resultados alcanzados**

Las principales contribuciones del presente proyecto de investigación son:

- Se caracterizaron las limitaciones de las protecciones convencionales en redes de distribución industrial.
- Se evaluó e implementó la metodología de coordinación para sistemas eléctricos de media y baja tensión, con diversos dispositivos de protección de sobrecorriente.
- Se desarrolló e implementó un nuevo algoritmo al relevador de sobrecorriente para mejorar coordinación.
- Se modeló y evaluó una protección de sobrecorriente no convencional que presenta un mejor desempeño en los sistemas eléctricos industriales, sujetos a diversas limitaciones de curvas de daño de equipos primarios y curvas de relevadores de sobrecorriente convencional.

### **6.4 Recomendaciones para trabajos futuros**

- Desarrollo de una herramienta gráfica para la obtención de curvas características no convencionales del nuevo diseño relevador de sobrecorriente aportación de esta tesis, en una plataforma de programación interactiva.
- Incluir el modelo propuesto del relevador de sobrecorriente de curvas no convencionales en programas de optimización para una mejor coordinación de los dispositivos de protección de sobrecorriente.
- Implementar el algoritmo no convencional del relevador de sobrecorriente propuesto en esta tesis en un desarrollo *firmware* dentro de una tarjeta y realizar pruebas operativas en la protección de un sistema eléctrico de potencia;

evaluando las ventajas de tener mejor sensibilidad, coordinación y rapidez de la protección de sobrecorriente.

- Protección de motores grandes en sistemas industriales usando una sola característica no convencional tanto para la curva de arranque y marcha como para las curvas de límite de sobrecarga y falla; se puede aplicar el modelo del relevador sobrecorriente presentado en esta tesis.

# REFERENCIAS

---

## Referencias capítulo 1.

- [1] IEEE399-1997, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis", Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [2] A. Conde, E. Vazquez, "Application of a proposed overcurrent relay in radial distribution networks", *Electrical Power Systems Research* 2011, Elsevier Science, s. 570-579
- [3] Girgis, A.; Brahma, S, "Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system," *Power Engineering*, 2001. LESCOPE '01 2001, 11-13 July 2001 Page(s):115 – 119.
- [4] So, C.W. Li, K.K., "Protection relay coordination on ring-fed distribution network with distributed generations," *TENCON '02. Proceedings 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, Volume 3, 28-31 Oct. 2002 Page(s):1885 - 1888.
- [5] IEEE Std 141-1993, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [6] Chen Yanxia, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Chen Deshu, "The research of the overcurrent relays based on phase-to-phase differential current -adaptive setting and coordination," *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2003 IEEE PES, Volume 1, 7-12 Sept. 2003 Page(s):250 – 255.
- [7] T. Tunyagul, P. Crossley, P. Gale, J. Zhao, "Design of a protection relay for use with a measuring CT," *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE, Volume 3, 16-20 July 2000 Page(s):1390 – 1395.

- [8] D.N. Vishwakarma, Z. Moravej, "ANN based directional overcurrent relay," *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001 IEEE/PES, Volume 1, 28 Oct.-2 Nov. 2001 Page(s):59 – 64.
- [9] S. Lotfi-fard, J. Faiz, R. Iravani, "Improved Overcurrent Protection Using Symmetrical Components," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 22, Issue 2, April 2007 Page(s):843 – 850.
- [10] I. Zamora, A.J. Mazon, K.J. Sagastabeitia, J.J. Zamora, "New Method for Detecting Low Current Faults in Electrical Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 22, Issue 4, Oct. 2007 Page(s):2072 – 2079.
- [11] K.R. Shah, E.D. Detjen and A.G. Phadke, "Feasibility of adaptive distribution protection system using computer overcurrent relaying concept," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, No. 5, September/October 1988, pp. 792-797.
- [12] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, B. Chattopadhyay, B. Takuldar, G. Mc-Donald, and R. Chan, "Design and evaluation of an adaptive protection system for a distribution network," *Cigré Paper 34-202*, Paris, 1995.
- [13] Shoaib Khan, *Industrial Power Systems*, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- [14] Sutherland, P.E, Protective device coordination in an industrial power system with multiple sources, *Industry Applications Conference. Thirty-First IAS Annual Meeting*, (1996), vol. 4, 2298 – 2305.
- [15] Kojovic, L.A., Witte, J.F, A new method in reducing the overcurrent protection response times at high fault currents to protect equipment from extended stress, *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES*, (2001), vol.1, 65 - 70.
- [16] Erokhin E. Yu, New Overcurrent RST80 Relays and Their Time-Current Characteristics, *Russian Electrical Engineering*, (2011), vol. 82, No. 3, 156–159.

- [17] Timo Keil and Johann Jáger, Advanced Coordination Method Protection Relays Using Nonstandard, IEEE Transactions on Power Delivery, (2008), vol. 23, No. 1, 52-57.
- [18] Jarm-Long Chung, Ying Lu, Wen-Shiow Kao, and Chih-Ju Chou, Study of Solving the Coordination Curve Intersection of Inverse-Time Overcurrent Relays in Subtransmission Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, (2008) vol. 23, No. 4. 1780-1788.
- [19] Karegar, H, Abyaneh, H, Al-Dabbagh, M, A flexible approach for overcurrent relay characteristics simulation, Electric Power System Research, (2003), vol. 66, No. 3, 233-239.
- [20] Mojtaba Khederzadeh, Back-Up Protection of Distance Relay Second Zone by Directional Overcurrent Relays with Combined Curves, IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2006), 1-6.
- [21] Darwish, H.A., Taalab, A.I., Assal, H, A novel overcurrent relay with universal characteristics, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, (2001), vol. 1, 53–58.
- [22] H.A.Darwish, M.A.Rahman, A.I.Taalab, and H.Shaaban, Digital model of overcurrent relay characteristics, Industry Applications Conference. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, (1995), vol. 2, 1187 - 1192.

## **Referencias capítulo 2.**

- [23] González Martínez Ángel, “Estudio de la evolución tecnológica de relevadores de sobrecorriente usados en los esquemas de protección de los sistemas eléctricos de potencia”, Tesis de Licenciatura, ESIME IPN, Unidad Zacatenco, México, 1992.
- [24] Madhava Rao T S, “Network Protection & Automation Guide – Areva; Power Systems Protection: Static Relays”

- [25] Khaled Shehata, Ahmed Bahaa, Karim Morad, Ahmed Sharaf, "Design and Implementation of FPGA Based and Microcontroller Based Current Relay", Modern Science and Arts University, Giza, Egypt, Oct. 2004.
- [26] T. S. Mahava Rao, "Power Systems Protection, Static Relays" Mc Graw Hillbook company 1981.
- [27] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley Jr, A. Kusko, "Teoría y análisis de las maquinas eléctricas", Editorial Hispano Europea, Barcelona España, ISBN 84-255-0562-3.
- [28] M. Titarenko and I. Noskov-Dukelsky, "Protective Relaying in Electric Power Systems" Second Printing, Peace Publishers Moscow.
- [29] A. R. van C. Warrington, "Protective Relays: Their Theory and Practice", Volume one, New York, John Wiley & Sons Inc., First Published 1962.
- [30] C. Russell Mason, "The Art and Science of Protective Relaying", General Electric.
- [31] Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications, Second Edition, Revised and Expanded, ABB Marcel Dekker, Inc. New York, Basel.
- [32] H. Altuve Ferrer, "Protección por Relevadores Estáticos", Universidad Central de Santa Clara, Cuba. Ministerio de la Industria Eléctrica, Dirección de Protección, Medición y Telecomunicaciones, enero de 1976.
- [33] Paul M. Anderson, "Power System Protection", Publisher Wiley-IEEE 1998, ISBN-10: 0780334272

### Referencias capítulo 3.

- [34] IEEE Std 242-2001, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", Sponsor Industrial and Commercial Power System, Department of the IEEE Industry Applications Society, June 2001.
- [35] The Institution of Electrical Engineers, *Power System Protection Systems and Methods (vol 2)*, edited by The Electricity Training Association, United Kingdom, 1997.
- [36] Gers J. M., and Holmes E. J. "Protection of Electricity Distribution Networks", IEEE Power & Energy Series 47z, 2nd Edition, 2005.
- [37] L G Hewitson, Mark Brown and Ramesh Balakrishnan. "Practical Power System Protection", Newnes ELSEVIER, First edition 2005, Reprinted 2009.
- [38] J Lewis Blackburn and Thomas J. Domin. "Protective Relaying Principles and Applications", CRC Press. Taylor & Francis Group, Third Edition, 2007.
- [39] S. E. Zocholl. "INDUCTION MOTORS: PART II -- PROTECTION", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [40] M Gilany, R. Amer, R Radwan, and O. P. Malik. "Field Experience with Settings and Coordination of the Protective Devices in a Developed Oil Field Plant", Electric Machines and Power System, February 2000, Vol. 28, Number 2, pp 143-152.
- [41] "Manual SIPROTEC Multi-Functional Protective Relay 7SJ62/63/64", 2007 [Online]. Available: <http://siemens.siprotec.de>.
- [42] ANSI/IEEE Standard C37.91-2000, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers".



#### Referencias capítulo 4.

- [43] IEEE Standard C37.112-1996, *IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*.
- [44] IEC Standard 255-4, *Single Input Energizing Measuring Relays with Dependent Specified Time*, IEC Publication 255-4, First Edition, 1976.
- [45] G. Benmouyal, "Some aspects of the digital implementation of protection time functions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1705-1713.
- [46] J. Gutiérrez E. y A. Conde E. "Representación generalizada de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso" Doctorado en Ingeniería Eléctrica, FIME-UANL, San Nicolás de los Garza, N.L.
- [47] Steven C. Chapra y Raymond P. Canale, "Métodos numéricos para ingenieros", Quinta Edición.
- [48] IEEE Committee Report, "Computer representation of overcurrent relay characteristics", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, July 1989, pp. 1659-1667.
- [49] G. E. Radke, "A method for calculating time-overcurrent relay settings by digital computer," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 82, Special Supplement, 1963, pp. 189-205.
- [50] S. S. Begian, R. O. Bigelow, D. M. Lyle, G. E. Radke, W. F. Reinke, R.F. Silva, J.R. Truitt, H.Y. Tsien, and E.L. Worthington, "A computer approach to setting overcurrent relays in a network", *Proceedings of the IEEE 1967 PICA Conference*, May 1967, pp. 447-457.

## Referencias capítulo 5.

- [51] *IEEE Standard General requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Standard C57.12.00-2000.
- [52] *IEEE guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault Current Duration*, IEEE Std. C57.109-1993.
- [53] *IEEE Guide for Protecting Power Transformers*, IEEE Std C37.91™-2008
- [54] Software Power\*Tools SKM Systems Analysis, Inc.
- [55] G. Benmouyal M. Meisinger, J. Burnworth, IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays, IEEE Transactions on Power Delivery 14 (3) (1999) 868–872

**APÉNDICE A**  
**IEEE Standard C37.112-1996**

***IEEE Standard Inverse-time Characteristic Equations for  
Overcurrent Relays.***

**IEEE Estándar Ecuaciones Características para Relevadores de  
Sobrecorriente de Tiempo-Inverso.**

**1. Visión General.**

**1.1 Alcance**

El alcance de este Standard incluye el repaso de varias técnicas analíticas existentes usadas para representar operación de relevador formas de curvas características y propuesta analítica (formula) representación de operación típica de formas de curvas características para fomentar alguna estandarización disponible de características de relevador de tiempo-inverso previsto en aplicaciones microprocesador o de relevador computadora.

**1.2 Propósito**

El propósito de este Standard proporcionar una representación analítica (formula) de formas de curvas características operación de relevador típico y de varios relevadores de tiempo-inverso para facilitar la representación por relevadores de tipo-microprocesador y prometer un grado de estandarización en la forma inversa de la curva seleccionada.

**2. Referencia.**

Este Standard lo estaremos usando en conjunto con las siguientes publicaciones. Si las publicaciones siguientes están superadas por una revisión previa, la revisión aplicara.

IEC Publication 255-3 (1989-05), Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time, Second Edition.<sup>1</sup>

IEEE Std C37.90-1989 (R1994), IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus (ANSI).<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IEC publications are available from IEC Sales Department, Case Postale 131, 3, rue de Varembo, CH-1211, Genève 20, Switzerland/Suisse. IEC publications are also available in the United States from the Sales Department, American National Standards Institute, 11 West 42nd Street, 13<sup>th</sup> Floor, New York, NY 10036, USA.

<sup>2</sup>IEEE publications are available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA.

### **3. Definiciones.**

**3.1 Relevador de sobrecorriente de tiempo-inverso:** Un relevador operado con corriente que produce una característica tiempo-corriente inversa por una función de corriente integrada  $F(I)$  con respecto al tiempo. La función  $F(I)$  es positiva arriba y negativa debajo de una corriente de entrada predeterminada llamada la corriente arranque. La corriente arranque es por consiguiente la corriente en la cual la integración arranca positivamente y el relevador produce una salida cuando la integral busca un valor fijo positivo predeterminado.

Para el relevador de inducción, es la velocidad del disco que es la función de una corriente  $F(I)$  que está integrada para producir la característica de tiempo-inverso. La velocidad es positiva para corriente sobre o arriba y negativa para corriente debajo de una corriente de arranque (pickup) predeterminada. El valor fijo predeterminado de la integral representa el viaje del disco, requerido para actuar el disparo de salida.

**3.2 Restablecer:** el estado de un relevador sobrecorriente de tiempo-inverso cuando la integral de la función de corriente  $F(I)$  esta produce una característica tiempo-corriente es cero.

**3.3 Características restablecimiento:** la curva tiempo contra corriente, ésta define el tiempo requerido para la integral de la función de corriente  $F(I)$  alcanzar o llegar cero para valores debajo de corriente arranque(pickup) cuando la integral esta inicialmente en el valor de disparo.

**3.4 Tiempo de disco:** el tiempo de disco es el control que determina el valor de la integral en la cual la salida de disparo está actuando, y por consiguiente los controles de la escala de tiempo de la característica tiempo-corriente producida por el relevador. En el relevador tipo inducción, el tiempo de retardo marca la distancia que el disco debe recorrer, la cual es la integral de la velocidad con respecto al tiempo.

#### **4. La ecuación de tiempo-corriente.**

##### **4.1 Coordinación de características inversas de tiempo-corriente.**

Coordinación práctica es influenciada por el tipo de aterrizamiento usado en sistemas de distribución. Notablemente, en Europa y Japón la práctica es operar relativamente sistemas primarios de distribución cortos de tres-hilos con impedancia de aterrizamiento o no aterrizado. A la vez no hay laterales monofásicos protegidos por fusibles, la coordinación puede ser lograda usando características de tiempo-definido. En Norteamérica la práctica es operar sistemas de distribución de cuatro-hilos aterrizados con cargas atendidas por laterales monofásicos protegidos por fusibles. Como resultado, la coordinación es obtenida usando características inversas tiempo-corriente confiables para coordinación por fusibles. Figura 1 muestra la coordinación cerrada de una característica de inducción extremadamente inversa con un fusible de alto-voltaje.

La línea recta de la gráfica log-log  $I^2t$  de un fusible de fundido mínimo es a menudo visualizada como la característica básica de tiempo-corriente. Sin embargo, un tiempo definido podría ser adicionado para emular el tiempo de limpiado máximo del fusible. Esto ilustra el concepto fundamental que cada vez que tiempo fijo de limpiado es adicionado a una línea recta de grafica log-log, el resultado es un curva. Para esta razón, la mejor forma para una característica tiempo-corriente para propósito de coordinación es la curva formada cuando un tiempo definido es adicionado a la línea recta de una gráfica log-log.

##### **4.2 La ecuación analítica.**

Las ecuaciones (1) y (2) definen el tiempo de restaurar o restablecer o de volver a cero y el tiempo de enterado o inicio de una curva de sobrecorriente de tiempo-inverso como se muestra en el anexo A. pero aplicando las constantes para estas ecuaciones, una curva característica puede ser exactamente definida. Ecuación (2) es similar a la ecuación IEC (ver IEC 255-03 [1989-05] excepto por la adición de la constante B. la constante B define el tiempo definido componente que es el resultado de saturación núcleo de un relevador tipo inducción.

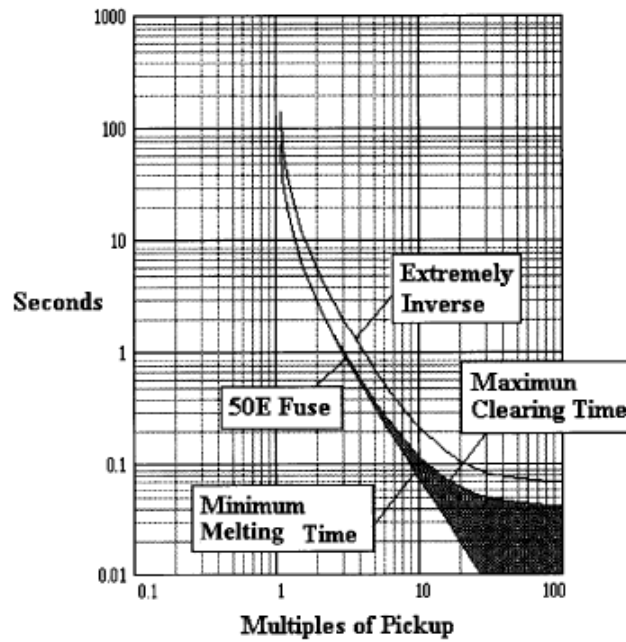


Figura 1- Característica extremadamente inversa comparada con mínimo fundido y tiempo de limpiado máximo de un fusible 50E.

Para  $0 < M < 1$

$$t(I) = \frac{t_r}{(M^2 - 1)} \quad (1)$$

Para  $M > 1$

$$t(I) = \frac{t_r}{(M^p - 1)} + B \quad (2)$$

Donde

$t(I)$  es el tiempo restaurar en ecuación (1) y el tiempo de disparo ecuación(2)en segundos.

$M$  es la relación  $I_{input}/I_{pickup}$  ( $I_{pickup}$  es la corriente del relevador de punto fijo)

$t_r$  es el tiempo de restablecimiento (para  $M=0$ )

$A, B, p$  constantes para curvas características previamente seleccionadas.

Relevador de inducción tiene una propiedad dinámica que resulta en una relación más alta de recorrido disco con más alta corriente. Típicamente, condiciones falla podría presentar el relevador con una corriente de falla variable previo al disparo del relevador. Ecuación (3) emula la dinámica del relevador de sobrecorriente disco de inducción tiempo-inverso y por consiguiente la coordinación será mantenida incluso con corrientes variando.

$$\int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (3)$$

Donde  $T_0$  es el tiempo de operación.

#### 4.3 Características Standard tiempo-corriente.

Las constantes y exponentes en tabla 1 cuando son usadas en ecuaciones (1) y (2) definen la forma de la característica Standard de disparo inversa moderada, muy inversa y extremadamente inversa. La constante  $t_r$  cuando es usada en la ecuación (1) define la característica de restablecimiento óptima. Estas constantes definen la curva cercana a la media del rango tiempo dial y representa la curva promedio de la característica de inducción definida en anexo A.

**Tabla 1 – Constantes y exponentes para características Standard\***

Características	A	B	p	$t_r$
Moderadamente inversa	0.0515	0.1140	0.020	4.85
Muy inversa	19.61	0.491	2.000	21.6
Extremadamente inversa	28.2	0.1217	2.000	29.1

\*Para el rango especificado de  $M$ , el número de dígitos representado para cada constante es tal que un cambio de unida en el último dígito especificado causará un cambio no más grande que 0.5% en la computación subsecuente del cambio de tiempo relativo ( $\Delta t/t$ ).

Las características de un relevador protección basado-microprocesador conforme a este Standard cuando ellos están implementados de acuerdo a la ecuación (3), donde  $t(I)$  está dado por la ecuación (2) y los valores del tiempo de disparo corresponden a valores en el rango de 1.5 a 20 múltiplos de la corriente de arranque (pickup) están dentro de las bandas conformadas mostradas en las figuras 2,3 y 4. Los límites más altos y más bajos de las bandas conformadas son tiempos 1.15 y 0.85 de la característica definida en tabla 1. La banda conformada para la característica de restablecimiento optimo extendida desde 0.05 hasta 0.9 múltiplos de corriente pickup. Las bandas conformadas son plantillas clasificadas para las formas de características Standard corriente tiempo-inverso y no son bandas de tolerancia para (precisión) exactitud o repetitividad.

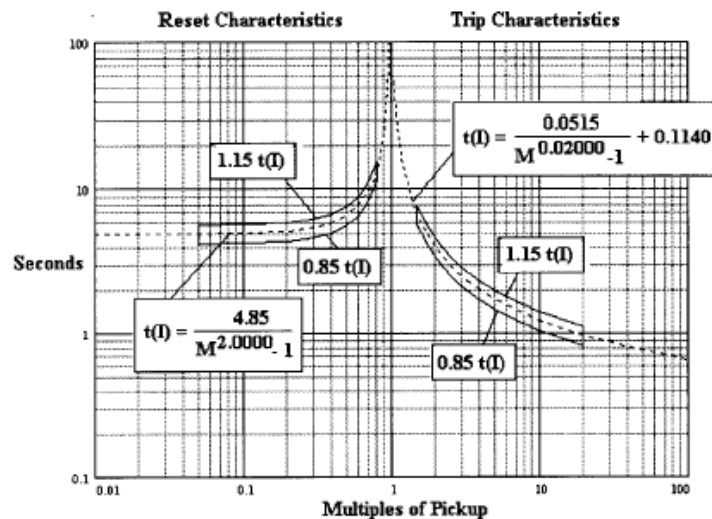


Figura 2. Característica Standard tiempo-corriente moderadamente inversa con banda Standard conformada cerca de la medida del rango de tiempo dial.



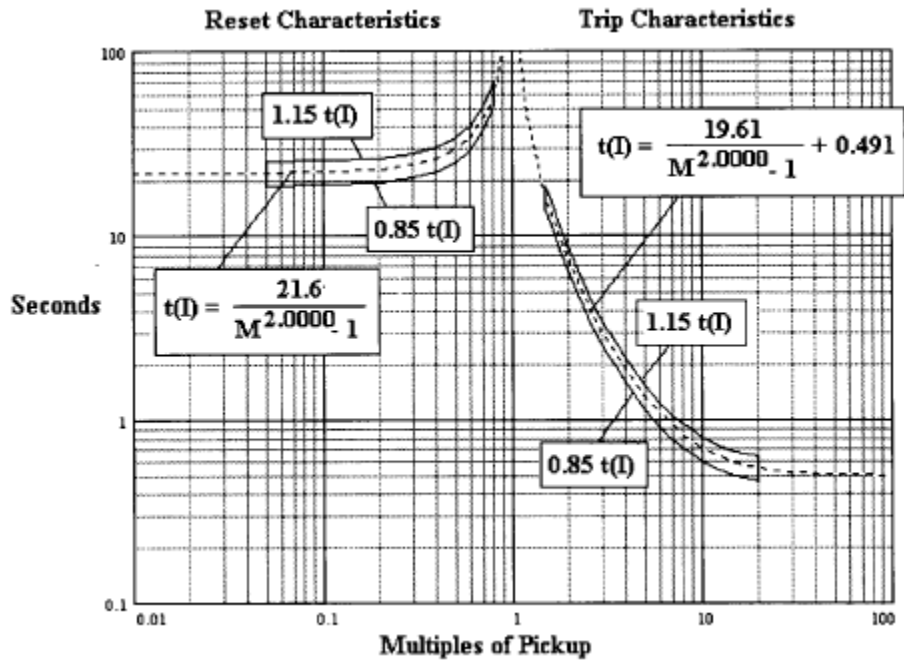


Figura 3. Característica Standard tiempo-corriente muy inversa con banda Standard conformada cerca de la medida del rango de tiempo dial.

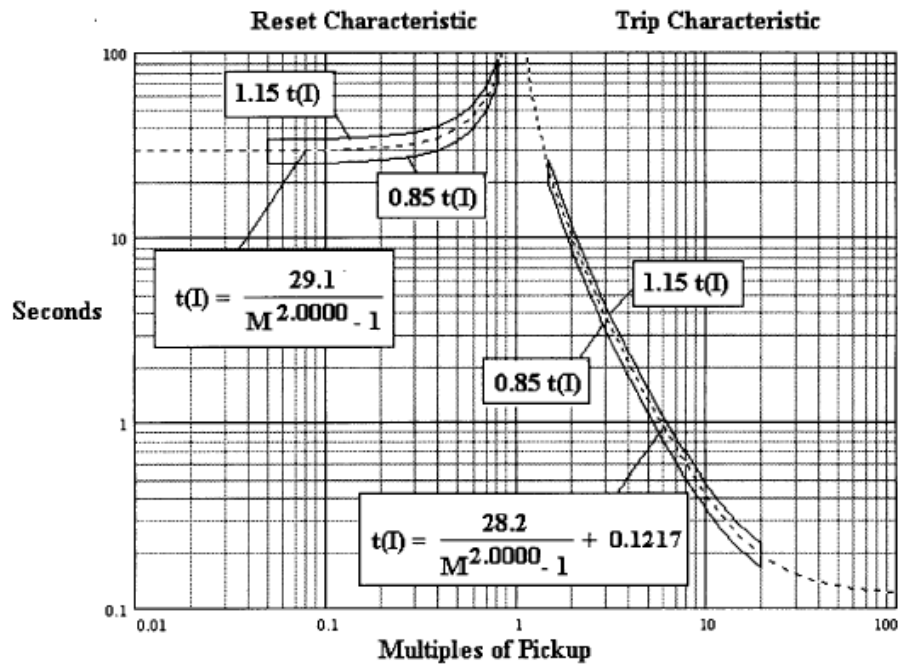


Figura 4. Característica Standard tiempo-corriente extremadamente inversa con banda Standard conformada cerca de la medida del rango de tiempo dial.

## Anexo A. Derivación de la característica de inducción (informe)

### A.1 La ecuación tiempo-corriente

La ecuación analítica que define la característica inversa tiempo-corriente es derivada desde la ecuación básica diferencial para entrada dependiente del tiempo retardo como se aplica a un relevador de inducción como sigue:

$$K_I I^2 \equiv m \frac{d^2 \theta}{dt^2} + K_d \frac{d\theta}{dt} + \frac{\tau_F - \tau_s}{\theta_{\max}} \theta + \tau_s \quad (\text{A.1})$$

Donde

$I$  es la corriente de entrada

$\theta$  es el recorrido o viaje del disco

$\theta_{\max}$  es el máximo recorrido del disco

$K_I$  es la constante que relaciona par a corriente

$m$  es el momento de inercia del disco

$K_d$  es el factor de amortiguamiento magnético

$\tau_F$  es el par del resorte en máximo recorrido

$\tau_s$  es el par inicial del resorte

El gradiente de la torsión del resorte usado en relevador de inducción es pequeño y resulta en sólo un pequeño incremento en el par desde  $\tau_s$  a  $\tau_F$  con traslado. El disco está también de forma que produce un incremento de par con el traslado compensando el incremento en el par del resorte. El resultado neto del par de disco es como sigue:

$$K_I I^2 - \tau_s \quad (\text{A.2})$$

Donde la constante de par  $\tau_s$  determina pickup. Dejar la corriente  $I$  igual  $M$  múltiplos de la corriente de arranque (pickup)  $I_p$  así que el par neto podría ser escrito como sigue:

$$K_1(MI_p)^2 - \tau_s \quad (\text{A.3})$$

En arranque (pickup)  $M=1$  y el par neto sobre el disco es cero.

$$\begin{aligned} K_1 I_p^2 - \tau_s &= 0 \\ K_1 I_p^2 &= \tau_s \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

El par neto puede que ser expresado en términos del par del resorte pero sustituyendo la ecuación A.4 en la ecuación A.3 como sigue:

$$(M^2 - 1)\tau_s \quad (\text{A.5})$$

Pero negando el pequeño momento de inercia del disco, ecuación A.1 es simplificada

$$\tau_s(M^2 - 1) = K_d \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{A.6})$$

La solución de esta ecuación, la cual ahora carece del término de segundo orden, teniendo el resultado que no hay tiempo de aceleración o desaceleración. Esta manera que, en esta representación, la velocidad final es alcanzada en un periodo de tiempo insignificante, y también que hay sobre desplazamiento insignificante. Esta simplificación es válida en más aplicaciones. Ecuación integrada (A.6) da.

$$\theta = \int_0^{T_0} \frac{\tau_s}{K_d} (M^2 - 1) dt \quad (\text{A.7})$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación (A.7) por  $\theta$  da la ecuación dinámica:

$$\int_0^{T_0} \frac{\tau_s}{K_d} (M^2 - 1) dt = \int_0^{T_0} \frac{1}{t(I)} dt = 1 \quad (\text{A.8})$$

Donde  $t(I)$  es la característica tiempo-corriente y la constante  $A$  igual  $K_d \theta / \tau_s$ :

$$t(I) = \frac{\left( \frac{K_d \theta}{\tau_s} \right)}{(M^2 - 1)} = \frac{A}{M^2 - 1} \quad (\text{A.9})$$

## A.2 La característica de reposición

En algunas aplicaciones podría ser una ventaja para restablecer el tiempo integral en un ciclo. Sin embargo, característica opcional de restaurar también podría ser cuando es requerida para una coordinación restaurada con relevadores de inducción existente. Ecuación (A.9) define la característica de inducción para ambas corrientes abajo y sobre corriente pickup. Si un disco de inducción tiene un desplazamiento inicial desde la posición de restaurado cuando la corriente aplicada se reduce a cero, el disco será manejado en una dirección negativa hacia la posición de restaurar. Esto es representado en ecuación (A.9) pero poniendo  $M=0$ , lo cual produce un número negativo indicando el tiempo restaurado y la rotación del disco en la dirección hacia restaurar. Con esta sustitución, ecuación (A.9) da el tiempo de reposición  $t_r$ :

$$|t_r| = \left( \frac{K_d \theta}{\tau_s} \right) \quad (\text{A.10})$$

y la característica reposición para cualquier valor de  $M$  entre cero y uno es

$$t = \frac{t_r}{(M^2 - 1)} \quad (\text{A.11})$$

La ecuación dinámica (A.8) y la ecuación característica (A.9) son importantes a la vez ellas especifican ahora una característica inversa tiempo-corriente podría ser implementada en orden para asegurar coordinación con relevadores de sobrecorriente tiempo-inverso existentes bajo toda condición limpiado de corrientes variando tales como fallas de resistencia decreciente y terminal remota.

## A.3 Curvas formadas por saturación.

El par debido a la corriente es proporcional al cuadrado del flujo causado por la corriente, y la derivación previa asumiendo una relación lineal entre el flujo y la corriente. No tomar en cuenta la saturación del electromagneto que es usado para formar las características tiempo-corriente

producidas por el principio de inducción. El grado de saturación usado para producir una curva particular puede ser determinado por sustitución del flujo normalizado para M en ecuación (A.11):

$$t = \frac{t_r}{\left(\frac{\phi}{\phi_{pu}}\right)^2 - 1} \quad (\text{A.12})$$

Donde

$\phi/\phi_{pu}$  es el flujo normalizado

$t_r$  es el tiempo restablecimiento para  $I=0$

$t$  es el tiempo para operar

Desde ecuación (A.12) el flujo normalizado en términos del tiempo de operación y de restablecimiento es

$$\left(\frac{\phi}{\phi_{pu}}\right) = \sqrt{\frac{t_r}{t} + 1} \quad (\text{A.13})$$

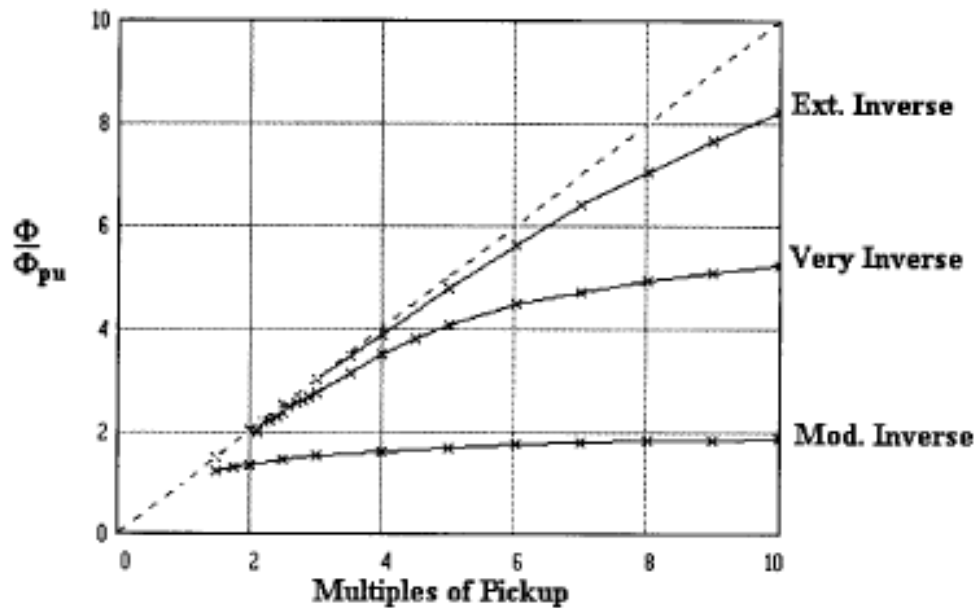


Figura A-1 Flujo normalizado en relevadores extremadamente inverso, muy inverso y moderadamente inverso.

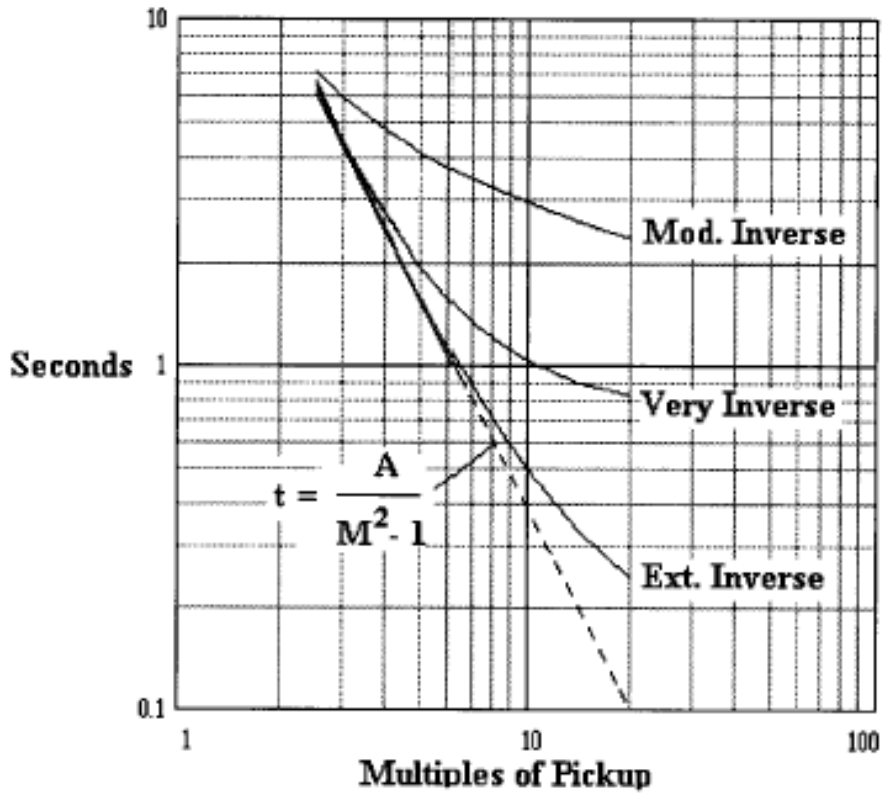


Figura A-2 Comparación de características extremadamente, muy y moderadamente inversa.

El flujo normalizado contra M múltiplo de pickup puede ser determinado por posición  $t_r$  igual al tiempo total de restablecimiento con cero corriente y entonces sustituyendo valores de tiempo de operación correspondiente a varios múltiplos de corriente pickup. Grafica de flujo normalizado para un extremadamente inverso, un muy inverso y un moderadamente inverso relevador de sobrecorriente tipo-inducción son mostrados en figura A-1 las características resultantes son comparadas en figura A-2. La grafica muestra la técnica electromecánica usando grados específicos de saturación para producir la familiar característica tiempo-corriente y mostrados en el siguiente orden.

El relevador extremadamente inverso saturado en cuatro múltiplos de pickup, la muy inversa en dos múltiplos (mitad del valor previo), y moderadamente inverso en pickup (otra vez, mitad del valor previo). La derivación muestra que la característica de inducción, no fue para la liberación de saturación, es la característica línea recta log-log de un fusible. Sin embargo, la curva es formada por saturación del electromagneto en una especificación de múltiplos de corriente de arranque (pickup). Ha sido también mostrada que la saturación es la forma que, en efecto, incorpora la componente de tiempo definido para formar una curva practica para coordinación. Por consiguiente, adicionando un término de constante de tiempo definido a la ecuación (A.9) formando la ecuación característica de inducción (A.14).

$$t = \frac{A}{M^2 - 1} + B \quad (\text{A.14})$$

Las constantes A y B pueden ser cambiadas para emular exactamente las características inducción tiempo-corriente extremadamente y muy inversa. Una emulación exacta de la característica moderadamente inversa puede ser hecha por cambio del exponente de 2 a 0.2 con valores específicos para A y B. Ecuación (A.14) es la ecuación característica de disparo que emula la saturación ocurrida para corrientes sobre pickup. Sin embargo, los restos de la ecuación característica restablecimiento (A.11) desde entonces la saturación no ocurre en corrientes debajo de la corriente pickup. Las constantes A y B y exponente p determinan la forma de curva de las características de disparo. Las constantes para el numero 5 dial de características de modelos relevadores de inducción están representados en tabla A-1 y tabla A-2. Una comparación de las características moderadamente inversa, extremadamente inversa y muy inversa de tablas A-1 y A-2 son mostradas en las gráficas log-log de figuras A-3, A-4 y A-5. Un factor de 1.4 ha sido usado con modelo B en figuras A-5 en orden para dar un tiempo igual a 5.0 p.u.. Acordado sobre la derivación, la constante A es igual al tiempo restablecido. Sin embargo, datos de prueba para modelo A y modelo B muestran aquí que puede ser una diferencia entre la constante A en la característica disparo y el tiempo restablecimiento corriente cero,  $t_r$ , como muestra en tabla A-1 y A-2.

Tabla A-1. Relevador de inducción modelo A

Tipo de curva	M	t (segundos)	A	B	p*	t <sub>r</sub> (segundos)
Moderadamente inversa	5.00	1.64	0.047	0.183	0.02	54
Muy inversa	5.00	1.28	18.92	0.492	2.00	21
Extremadamente inversa	5.00	1.30	28.08	0.130	2.00	26.5

Exponente p = 2.00 para restablecer

Tabla A-2. Relevador de inducción modelo B

Tipo de curva	M	t (segundos)	A	B	p*	t <sub>r</sub> (segundos)
Moderadamente inversa	5.00	1.83	0.056	0.045	0.02	4.3
Muy inversa	5.00	1.35	20.29	0.489	2.00	22.3
Extremadamente inversa	5.00	0.92	20.33	0.181	2.00	22.7

Exponente p = 2.00 para reponer

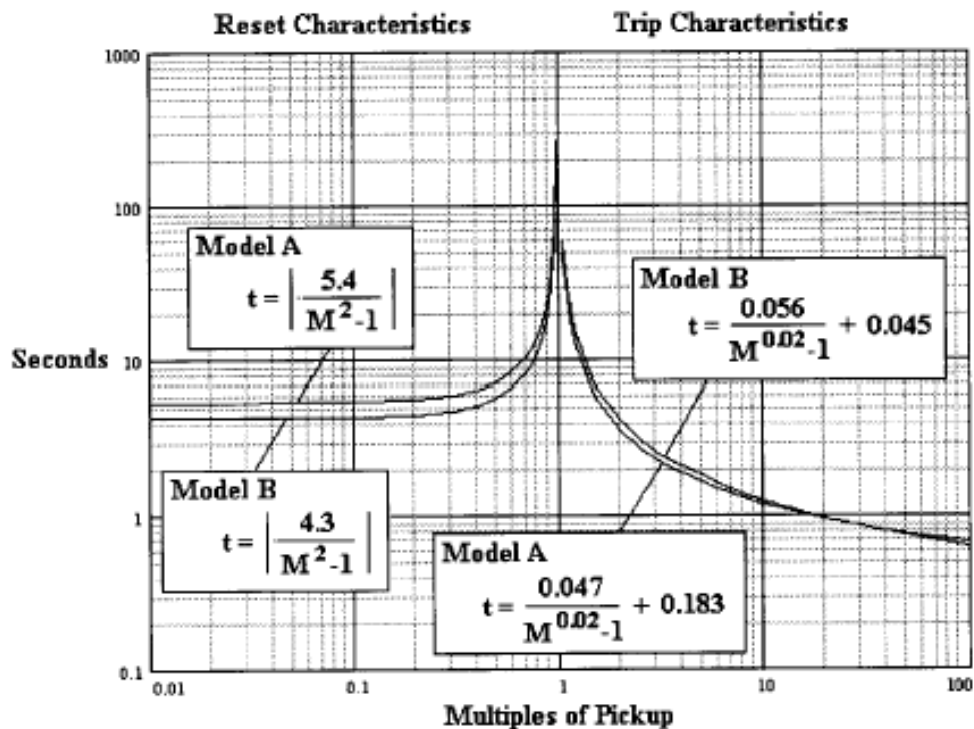


Figura A-3 – Característica tiempo-corriente moderadamente inversa para dos modelos de relevadores de sobrecorriente tipo inducción.



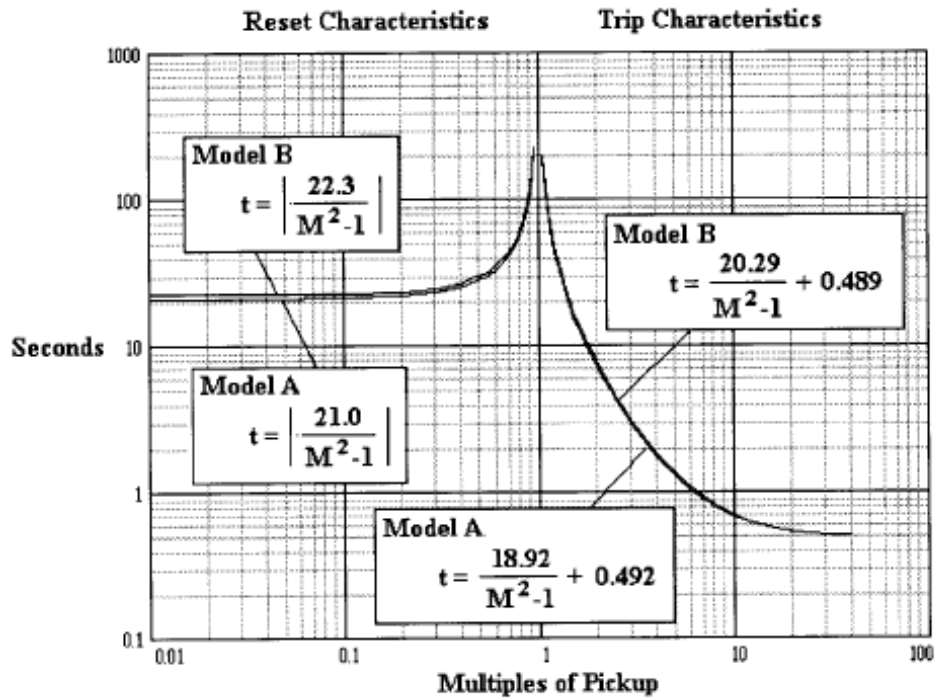


Figura A-4 – Característica tiempo-corriente muy inversa para dos modelos de relevadores de sobrecorriente tipo inducción.

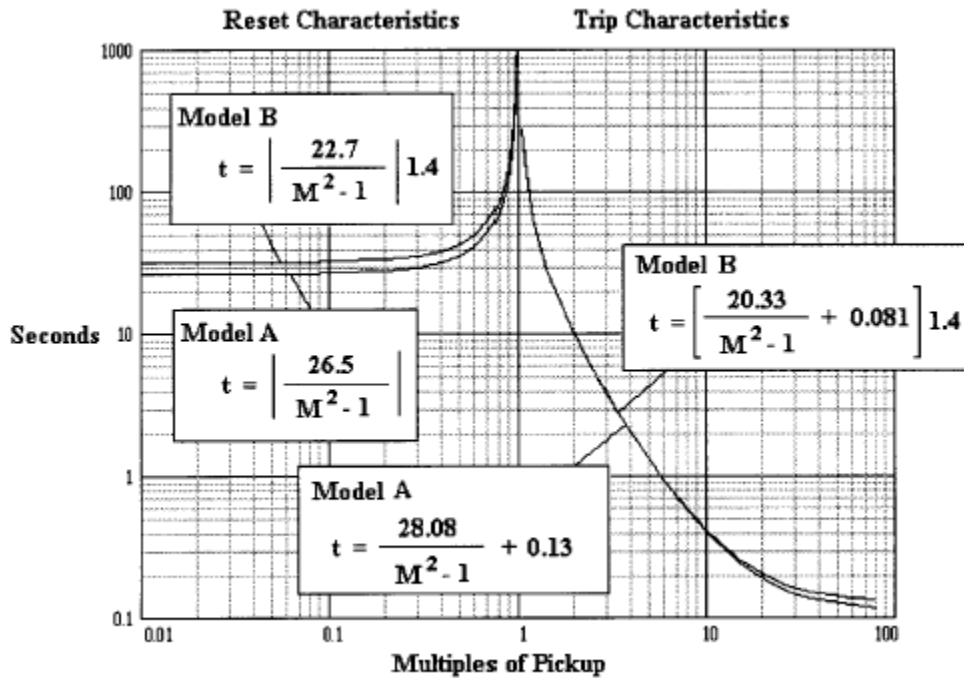


Figura A-5 – Característica tiempo-corriente extremadamente inversa para dos modelos de relevadores de sobrecorriente tipo inducción.

#### **A4. Bibliografía (Informativa)**

- [A1] Benmouyal, G., "Some Aspects of the Digital Implementation of Protection Time Functions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, Oct. 1990, pp. 1705-1713.
- [A2] Benmouyal, G. and Zocholl, S. E., "Testing Dynamic Characteristics of Overcurrent Relays," 20th Annual Western Relay Conference, Spokane WA, October 19-21, 1993.
- [A3] Carr J., and McCall, L. V., "Divergent Evolution and Resulting Characteristics Among the World's Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, July 1992, pp. 1601-1609.
- [A4] Elmore, W. A., Zocholl, S. E., and Kramer, C. A., "Effects of Wave Distortion on Protective Relays," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, March/April 1993, pp. 404-411.
- [A5] Garrett, R., Kotheimer, W. C., and Zocholl, S. E., "Computer Simulation of Current Transformers and Relays for Performance Analysis," 14th Annual Western Relay Conference, Spokane, WA, Oct. 20-23, 1987.
- [A6] Glassburn, W. E. and Sonnemann, W. K., "Principles of Induction-Type Relay Design," *AIEE Transactions*, Part III, Power Apparatus and Systems, vol. 72, no. 4, Feb. 1953, pp. 23-27.
- [A7] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Overcurrent Relay Characteristics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, July 1989, pp. 1659-1667.
- [A8] Kramer, C. A. and Elmore, W. A., "Flexible Inverse Overcurrent Relaying Using A Microprocessor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, April 1990, pp. 915-923.
- [A9] Sachdev, M. S., Singh, J., and Fleming, R. J., "Mathematical Models Representing Time-Current Characteristics of Overcurrent Relays for Computer Applications," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, January/February 1978, Paper no. A 78 131-5, Publication, "Text of Papers 78 CH1295-5 PWR 131-5," pp. 1-8.

- [A10] Schweitzer, E. O. and Aliaga, A., "Digital Programmable Time-Parameter Relay Offers Versatility and Accuracy," *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, no. 1, 1980.
- [A11] Singh, J., Sachdev, M. S., Fleming, R. J., and Krause, A. E., "Digital IDMT Overcurrent Relays," *Proceedings of the International Conference on Developments on Power System Protection*, 1980, IEE Publication no. 185, pp. 84Ð87.
- [A12] Warrington, A. R. Van C., *Protective relays: their theory and practice*, vol. I (chapter 4), John Wiley and Sons Inc., New York, 1962.
- [A13] Yalla, Murty V. V. S. and Smolinski, W. J., "Design and Implementation of a Versatile Digital Directional Overcurrent Relay," *Electric Power Systems Research*, vol. 18, no. 1, 1990, pp. 47Ð55.
- [A14] Zocholl, S. E., "Developing a Standard for Overcurrent Relay Characteristics," Georgia Tech Relay Conference, Atlanta, GA, May 1990.
- [B15] Zocholl, S. E., "Integrated Metering and Protective Relay Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 5, September/October 1989, pp. 889Ð893.

## APÉNDICE B.

### *Algoritmos de Regresión no Lineal*

#### **B1. Regresión polinomial**

Para patrones de datos no lineales, el ajuste puede ser obtenido con modelos de líneas curvas. Una alternativa donde se conserva la integridad de los datos es ajustar con modelos de polinomios [47].

El procedimiento de mínimos cuadrados puede ser extendido para ajustar datos para un polinomio de grado  $m$ .

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (\text{B.1})$$

La suma de  $i=1$  hasta el número de datos  $n$  del cuadrado del residual es:

$$Sr = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m))^2 \quad (\text{B.2})$$

Se toma la derivada con respecto a cada uno de los coeficientes del polinomio:

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m))$$

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m)) \quad (\text{B.3})$$

⋮

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_m} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^m (y_i - (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m))$$

Estas ecuaciones pueden ser igual a cero y re arregladas para desarrollar el siguiente conjunto de ecuaciones normales:

$$a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_m \sum x_i^m = \sum y_i$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_m \sum x_i^{m+1} = \sum x_i y_i \quad (\text{B.4})$$

⋮            ⋮            ⋮            ⋮            ⋮

$$a_0 \sum x_i^m + a_1 \sum x_i^{m+1} + a_2 \sum x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum x_i^{2m} = \sum x_i^m y_i$$

Las sumatorias son de  $i=1$  hasta  $n$ . Las ecuaciones son lineales y tienen  $m+1$  incógnitas:  $a_0, a_1, \dots, a_m$ . El problema de determinar polinomios por mínimos cuadrados de grado  $m$  es equivalente para resolver un sistema  $m+1$  ecuaciones lineales simultáneas.

El error de la regresión polinomial puede ser cuantificado por un error estándar del estimado.

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad (\text{B.5})$$

## B2. Regresión no lineal

El ajuste de datos no lineales se logra con modelos en los cuales existe una dependencia no lineal en sus parámetros. La regresión no lineal se basa en la determinación de los parámetros que minimizan la suma de los cuadrados de los residuales. La solución debe proceder en un aspecto iterativo y su solución exitosa es altamente independiente de un buen punto inicial de los parámetros.

El método de Gauss Newton es un algoritmo de optimización utilizado para minimizar la suma de los cuadrados de los residuales entre datos y ecuaciones no lineales. Se utiliza la expansión de la serie de Taylor para expresar la ecuación original no lineal, en una forma lineal aproximada. Entonces la técnica de mínimos cuadrados puede ser usada para obtener nuevos estimados de los parámetros que se mueven en la dirección de minimización del residual.

Para ilustrar lo anterior, la relación entre la ecuación no lineal y los datos pueden ser expresada en forma general como:

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (\text{B.6})$$

Donde  $y_i$  valor medido de la variable dependiente,  $f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$  es la ecuación que está en función de la variable independiente  $x_i$  y una función no lineal de los parámetros  $a_0, a_1, \dots, a_m$  y  $e_i$  es el error. En forma abreviada:

$$y_i = f(x_i) + e_i \quad (\text{B.7})$$

El modelo no lineal puede ser expandido en serie de Taylor alrededor de los parámetros y reducido después de su primera derivada. Por ejemplo para el caso de dos parámetros,

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (\text{B.8})$$

Donde  $j$  es el valor inicial y  $j+1$  es el valor predicho,  $\Delta a_0$  y  $\Delta a_1$  es la diferencia entre el valor inicial y el predicho para  $a_0$  y  $a_1$  respectivamente. El modelo linealizado con respecto a los parámetros:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (\text{B.9})$$

En forma matricial:

$$\{D\} = [Z_j] \{\Delta A\} + \{E\} \quad (\text{B.10})$$

En forma desarrollada:

$$\begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_0 \\ e_1 \end{Bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

El objetivo es resolver (B.10) para  $\{\Delta A\}$  la cual es utilizada para recalcular los valores hacia el mínimo:

$$\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j} , \quad \Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j} \quad (\text{B.12})$$

El criterio de convergencia del proceso iterativo es definido hasta que (B.12) es menor a una tolerancia predefinida.