



Coordinación de protecciones en baja tensión de la subestación 14 de la empresa Compañía de Empaques S.A.

Santiago Rúa Álvarez

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesores

Anderson Felipe Flórez Zapata, Ingeniero Electricista

Jesús María López Lezama, Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Rúa Álvarez [1]
Referencia	[1] S. Rúa Álvarez, “Coordinación de protecciones en baja tensión en la subestación 14 de la empresa Compañía de Empaques”, Práctica empresarial, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noe Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres por su incondicional apoyo y por ser mi fuente de motivación.

Agradecimientos

A Dios por darme sabiduría y fuerzas para superarme cada día. A la Universidad de Antioquia, por ser mi segundo hogar y permitirme formar profesionalmente.

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO

RESUMEN.....	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS.....	10
A. Objetivo general	10
B. Objetivos específicos	10
III. MARCO TEÓRICO	11
A. Interruptores categoría A.....	11
B. Interruptores categoría B.....	12
C. Curvas de corriente-tiempo	13
D. Características de los interruptores de sobrecorriente.....	13
IV. METODOLOGÍA	17
V. RESULTADOS	18
A. Aforo de cargas	18
B. Diagrama unifilar.....	18
C. Cambio de interruptores	19
D. Curvas de disparo	21
VI. CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS	29

LISTA DE TABLAS

TABLA I AFORO DE CARGAS	18
TABLA II INTERRUPTORES ACTUALES	20
TABLA III INTERRUPTORES RECOMENDADOS	21

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Interruptor de caja moldeada de la marca Schneider	12
Fig. 2. Interruptor abierto de la marca Schneider.....	12
Fig. 3. Curva de disparo de un interruptor	13
Fig. 4. Corriente nominal y de regulación.....	14
Fig. 5. Corriente de operación magnética o de corto retardo	14
Fig. 6. Poder de corte último Icu	15
Fig. 7. Poder de corte en servicio Ics	15
Fig. 8. Corriente de corta duración admisible	16
Fig. 9. Diagrama unifilar subestación 14	19
Fig. 10. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor de la Starex 0.	22
Fig. 11. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor de la Laminadora 2.....	23
Fig. 12. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor del Compresor.	24
Fig. 13. Curva de disparo entre el interruptor del compresor en el ML principal de la subestación y el interruptor de ML Compresor.	24
Fig. 14. Curva de disparo del interruptor principal de la subestación y el interruptor principal del chiller y la bomba.....	25
Fig. 15. Curva de disparo entre el interruptor del chiller y el interruptor de ML chiller Carrier...26	
Fig. 16. Curva de disparo entre el interruptor de la bomba y el interruptor de ML chiller Carrier.	26
Fig. 17. Curva de disparo entre interruptor de las enconadoras e interruptor principal de la subestación.	27

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IEC

International Electrotechnical Commission

RESUMEN

Durante el semestre de práctica académica llevado a cabo en la empresa Compañía de Empaques, se realizó el estudio de coordinación y selectividad de protecciones en baja tensión de la subestación 14 ubicada en el módulo A. Dicho estudio tiene como objetivo garantizar la protección de los trabajadores y máquinas de la compañía.

En la primera etapa del proyecto, se realizó un recorrido por el módulo A para conocer los procesos de producción que allí se ejecutan y también identificar que cargas están conectadas a la subestación, conocer sus características eléctricas, acometidas y protecciones. Basado en lo anterior se construyó un diagrama unifilar de la subestación para tener una visualización completa del sistema eléctrico.

Durante la segunda etapa se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas y búsqueda de documentación en fabricantes con enfoques al problema y que se puedan implementar en la compañía. En la tercera etapa se tomaron todas las características de los interruptores existentes y se homologaron por interruptores de la marca Schneider, para poder realizar la simulación en el software ECODIAL.

Por último, se hace un rediseño del sistema de protecciones de la subestación 14, ajustando la curva de disparo de cada interruptor, cambiando los tiempos y corrientes de disparo y así lograr la coordinación de protecciones.

***Palabras clave* — Coordinación, selectividad, protección, subestación.**

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es una necesidad vital para realizar la mayoría de las actividades diarias en el hogar y en la industria, y es por eso que se debe garantizar la seguridad, calidad y suministro continuo de energía. Los sistemas de potencia tienen equipos que son susceptibles a fallos que pueden perjudicar al usuario final. Por lo anterior, se hace necesario implementar un sistema de protecciones para minimizar las fallas que se presenten en el sistema de potencia. Las protecciones tienen la capacidad de detectar valores mucho mayores a la corriente nominal y actuar automáticamente para aislar el área fallada. Las protecciones también deben tener la capacidad de diferenciar entre fallas permanentes y temporales para evitar la salida permanente de un circuito ante una falla temporal. También se debe garantizar el servicio de la red ante una falla permanente, seccionalizando la red y así permitir aislar la zona con problemas. Un mal diseño o falta de un sistema de protecciones puede ocasionar el corte de servicio a los usuarios, daños a las personas y a equipos eléctricos o incendios.

En el módulo A de la compañía de Empaques se elaboran hilos de polipropileno y a partir de estos se fabrican sacos para alimentos de animales y productos agrícolas. Para la fabricación de estos sacos se tiene máquinas de hasta 300 kVA y es por esto que el sistema eléctrico y de protecciones debe ser lo suficientemente robusto y confiable para satisfacer la demanda de la maquinaria. Actualmente las protecciones de la subestación 14 no están en óptimas condiciones y no están coordinadas, es por esto que se propone realizar un cambio del sistema actual de protecciones por interruptores de la marca Schneider y hacer la respectiva coordinación y selectividad.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar el estudio de coordinación de protecciones en baja tensión de la subestación 14 del módulo A de la Compañía de Empaques, mediante el uso del software ECODIAL, para ajustar los parámetros de los interruptores y tener una adecuada respuesta ante escenarios de cortocircuito.

B. Objetivos específicos

Identificar, mediante una revisión bibliográfica, las técnicas de selectividad de protecciones aplicadas en baja tensión.

Implementar una de las técnicas de selectividad en el software ECODIAL para realizar el ajuste de las curvas de disparo de los interruptores.

Implementar uno o más métodos de coordinación de protecciones a partir de los resultados obtenidos en la simulación.

III. MARCO TEÓRICO

La coordinación de protecciones hace referencia a la selección y configuración de dispositivos de protección, para que cuando ocurra una falla, esta sea detectada y despejada del sistema en el menor tiempo posible [1]. Según la IEC 60947-1, la selectividad se define como la coordinación entre las características operativas de dos o más dispositivos de protección contra sobrecorrientes tal que, cuando se presenta una sobrecorriente dentro de los límites establecidos, actúa solo el dispositivo destinado a funcionar dentro de esos límites y los demás no intervienen [2].

La IEC 60947-2 define los dos tipos de selectividad existentes: selectividad total y parcial. Entre dos interruptores conectados en serie hay selectividad total cuando en presencia de una sobrecorriente, el interruptor conectado aguas abajo actúa sin ocasionar el funcionamiento del otro interruptor, y selectividad parcial cuando el interruptor conectado aguas abajo garantiza la protección hasta cierto nivel de sobrecorriente sin originar el funcionamiento del otro interruptor [3]. Para este trabajo se considerarán dos técnicas de selectividad: Selectividad amperimétrica y cronométrica.

La norma IEC 60947-2 clasifica los interruptores en dos categorías: categoría A y categoría B.

A. Interruptores categoría A

Estos interruptores en su funcionamiento no proporcionan retardo en la desconexión por cortocircuito. Esta condición no significa que no se puedan usar estos interruptores para selectividad. Los interruptores más comunes en esta categoría son los automáticos de caja de moldeada [3].



Fig. 1. Interruptor de caja moldeada de la marca Schneider [4].

B. Interruptores categoría B

Los interruptores de esta categoría pueden retardar su disparo ante situación de cortocircuito, para ello, se pueden ajustar para tener una selectividad cronométrica. Los interruptores más comunes en esta categoría son los automáticos abiertos y algunos de caja moldeada para calibres altos [3].



Fig. 2. Interruptor abierto de la marca Schneider [4].

C. Curvas de corriente-tiempo

La curva de corriente-tiempo o curva de disparo de un interruptor se caracteriza por tener dos zonas de operación como se muestra en la figura 3. El interruptor tiene una operación de tiempo inverso en la zona de sobrecarga, lo que quiere decir que a medida que aumenta el nivel de corriente el tiempo necesario para que el interruptor actúe disminuye. En la zona de corriente de falla se dispara instantáneamente [5].

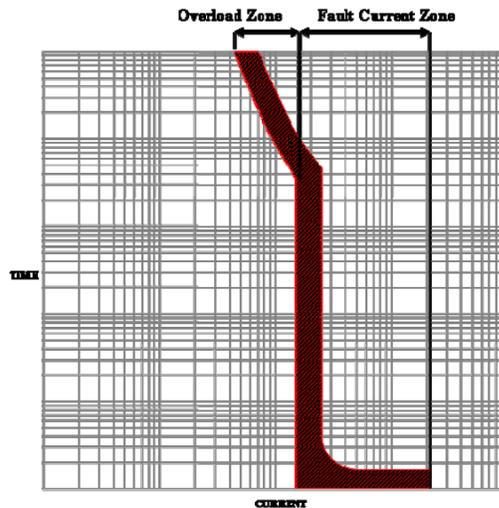


Fig. 3. Curva de disparo de un interruptor [5].

D. Características de los interruptores de sobrecorriente

Corriente nominal (I_n): Es la máxima corriente que puede pasar por el interruptor sin dispararse.

Corriente de regulación (I_r): Esta corriente es a partir de la cual se verifica la protección contra sobrecargas. I_r se expresa en múltiplos de I_n , puede tener valores entre $0.1I_n$ hasta I_n .

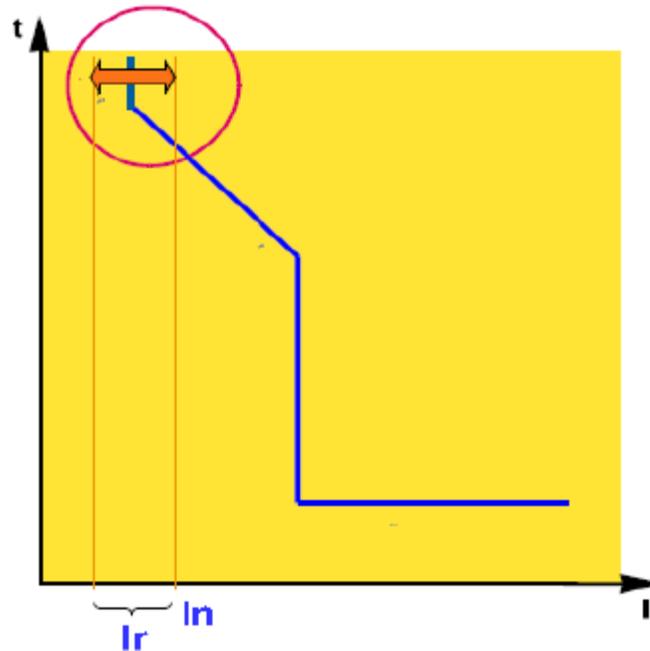


Fig. 4. Corriente nominal y de regulación [6].

Corriente de operación magnética I_m o de corto retardo (I_{sd}): En la corriente de operación magnética, el interruptor se dispara instantáneamente ante altas corrientes de cortocircuito [7].

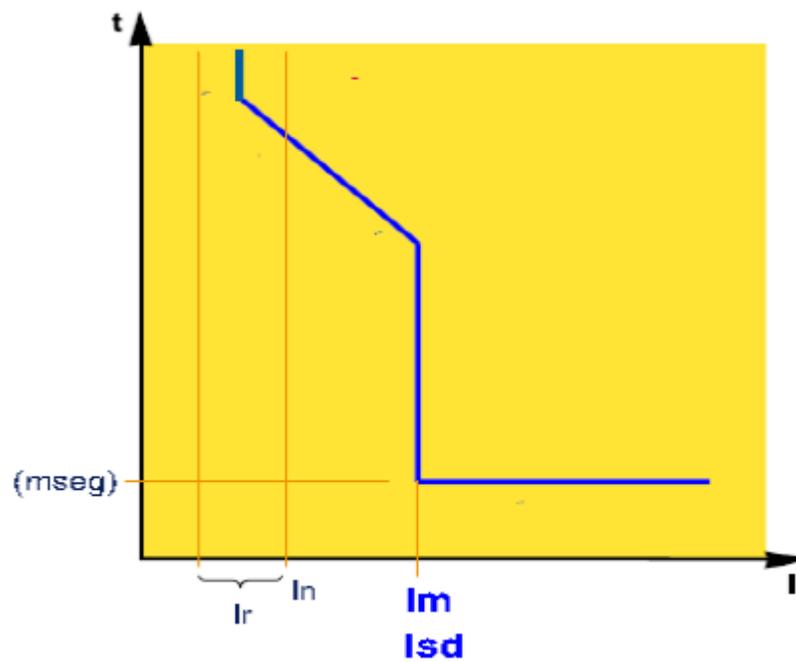


Fig. 5. Corriente de operación magnética o de corto retardo [6].

Poder de corte último (Icu): Es la máxima corriente de corto circuito que el interruptor puede despejar sin destruirse. El interruptor debe ser capaz de cortar esta corriente dos veces consecutivas [6].

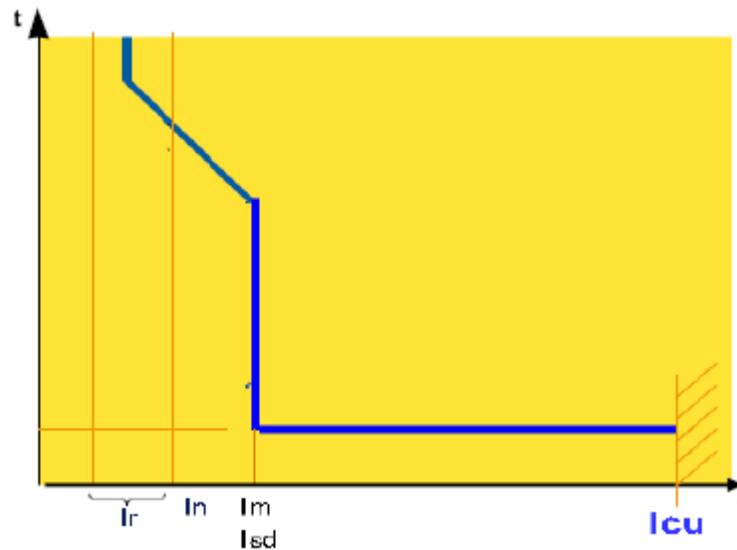


Fig. 6. Poder de corte último I_{cu} [6].

Poder de corte en servicio (Ics): Muestra la capacidad que tiene el interruptor para cortar tres veces consecutivas esta corriente. I_{cs} se expresa como un porcentaje de I_{cu} , por lo general $I_{cs}=50\%I_{cu}$ o $100\%I_{cu}$. I_{cs} también es una medida de la robustez del interruptor [6].

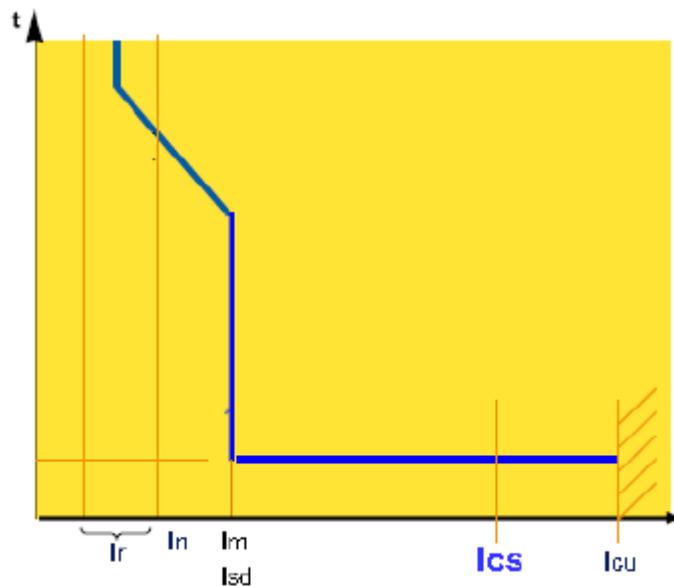


Fig. 7. Poder de corte en servicio I_{cs} [6].

Corriente asignada de corta duración admisible (I_{cw}): Es la corriente máxima de corto circuito que el interruptor puede soportar durante un periodo de tiempo muy corto Δt sin abrirse y sin cambiar sus características. Δt está normalizado para tiempos de 0.06 a 0.3 segundos [7].

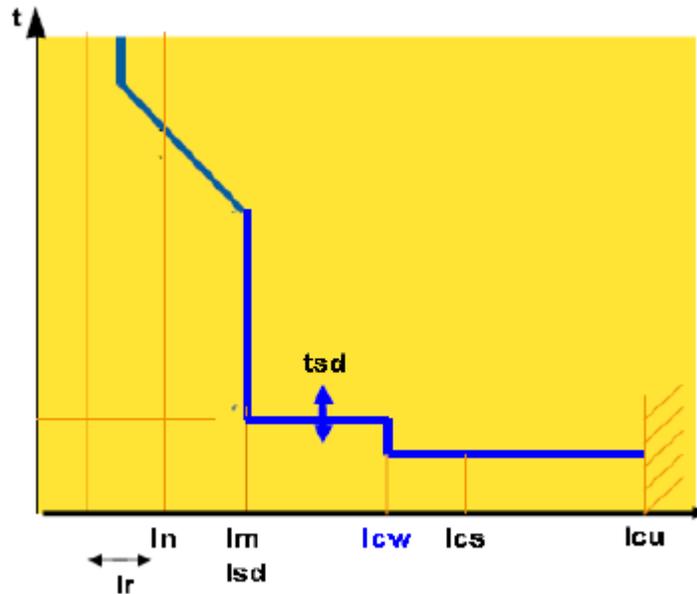


Fig. 8. Corriente de corta duración admisible [6].

IV. METODOLOGÍA

La coordinación de protecciones en la subestación 14 del módulo A de la Compañía de Empaques se llevó a cabo de la siguiente manera:

Actividad 1: Se hizo una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas y en fabricantes de protecciones con el objetivo de comprender el tema y realizar la coordinación de protecciones basado en esta recopilación.

Actividad 2: Se hizo un recorrido por la subestación 14 para revisar que tipo de protecciones tiene y conocer sus capacidades nominales de corriente.

Actividad 3: Se tomaron los datos de placa de las máquinas para poder realizar las simulaciones. Algunas maquinas no tienen placa por lo que se debió realizar medidas con analizador de redes y caracterizarlas eléctricamente.

Actividad 4: Se midió la longitud de cada acometida desde la protección hasta la máquina. Esto con el objetivo de tener más parámetros y realizar una simulación mucho más precisa.

Actividad 5: Se hace un rediseño del diagrama unifilar de las subestaciones 14 teniendo en cuenta la salida y llegada de máquinas nuevas a la compañía.

Actividad 6: Actualmente la subestación tiene interruptores en mal estado y de diferentes marcas, por lo que se cambió cada interruptor por la marca Schneider.

Actividad 7: Con la actualización del diagrama unifilar y los datos obtenidos en la subestación, se procede a realizar la simulación en ECODIAL. Allí se obtienen las curvas de disparo de cada interruptor y se ajustan los parámetros para lograr la coordinación de protecciones deseada.

Actividad 8: Finalmente se realiza un informe final con los resultados obtenidos en la simulación.

V. RESULTADOS

A. Aforo de cargas

La **TABLA 1** muestra el aforo de cargas detallando las variables eléctricas nominales de placa como la tensión, corriente y potencia aparente. Como se mencionó anteriormente en la metodología, algunas máquinas no tenían placa, por lo que se tomaron sus variables eléctricas con un analizador de redes.

Las máquinas no operan al 100% de su potencia nominal, por lo tanto, es necesario utilizar un factor de utilización que indica a que porcentaje de la potencia nominal están trabajando las maquinas. Estos factores fueron suministrados por los fabricantes y de medidas eléctricas realizadas a máquinas similares.

TABLA I
AFORO DE CARGAS

Máquina	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia aparente [kVA]	Factor de utilización
Starex 0	440	537	410	0,6
Laminadora 2	440	393	300	0,6
Compresor	440	118	90	0,9
Enconadoras	440	13	9,9	0,6
Chiller	440	70	53,3	0,7
Bomba	440	10	7,6	0,7

B. Diagrama unifilar

Se realizó un diagrama unifilar de la subestación 14, donde se muestran los componentes principales como el transformador, protecciones, cables con sus calibres y la cargas.

En *Fig. 9* se muestra la conexión de cada máquina. Se parte de un transformador reductor de 13800V/440V refrigerado en aceite mineral con una potencia nominal de 630 kVA. De este transformador se deriva una acometida hasta la protección principal del ML, donde el resto de las protecciones para las máquinas se conectan por medio de un barraje en cobre.

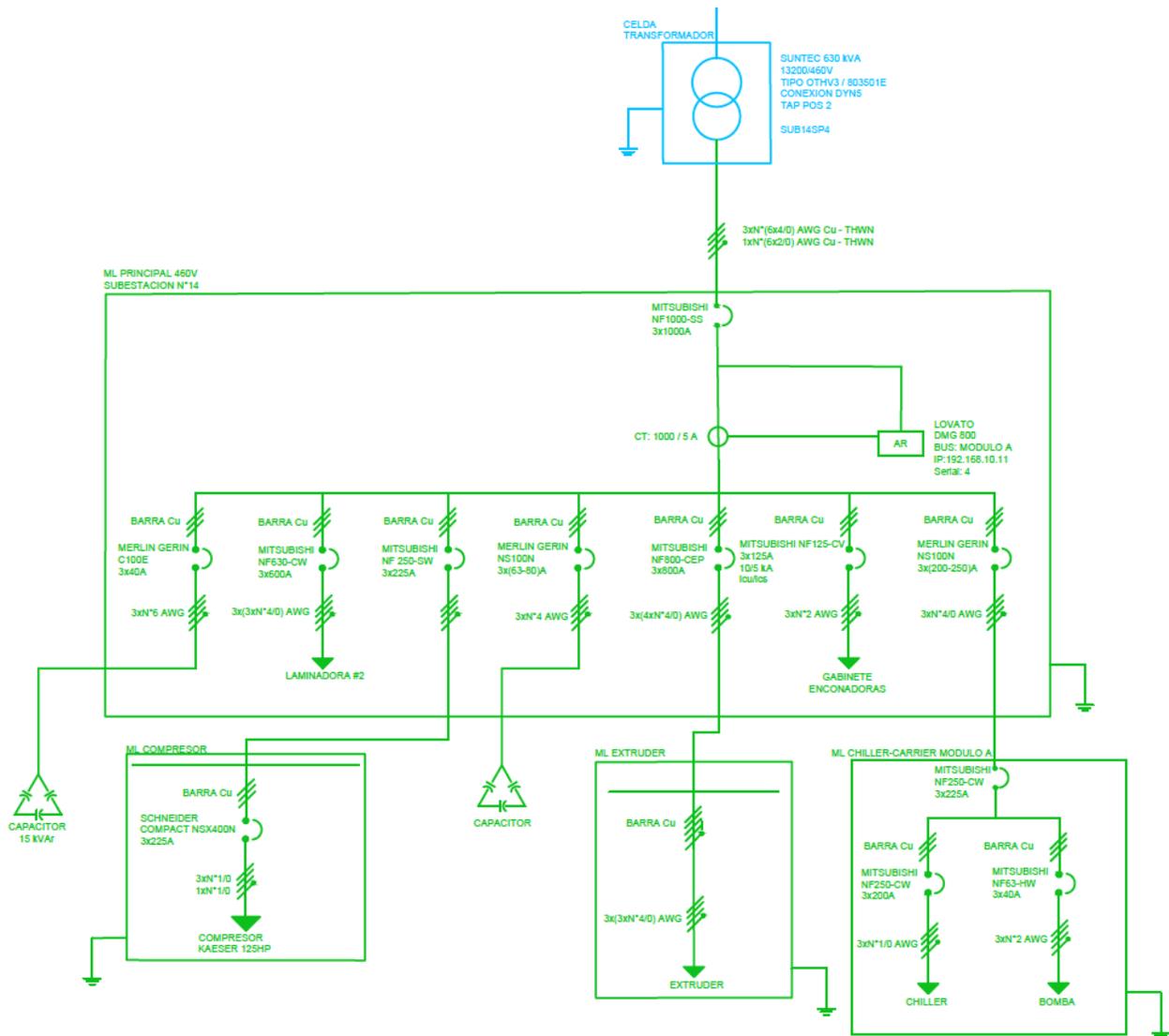


Fig. 9. Diagrama unifilar subestación 14.

C. Cambio de interruptores

La subestación 14 cuenta en su mayoría con interruptores de la marca Mitsubishi. Estos interruptores se encuentran en mal estado y no hubo un estudio de coordinación de protecciones antes de la instalación. La **TABLA II** muestra las características eléctricas de los interruptores actuales.

TABLA II
INTERRUPTORES ACTUALES

Máquina	Marca	I nominal (A)	Ue (V)	Icu (kA)	Ics (kA)	Icw (kA)	
Interruptor principal	Mitsubishi NF1000-SS	1000	440	85	43	20	0,1s
Laminadora 2	Mitsubishi NF630-CW	600	440	36	18	-	
Compresor 125 HP	Mitsubishi NF250-SW	225	440	15	18	-	
ML Compresor 125 HP	Schneider Compact NSX400N	160-400	440	30	30	-	
Starex 0	Mitsubishi NF800-CEP	800	440	36	18	-	
Enconadoras	Mitsubishi NF125-CV	125	440	10	5	-	
ML Chiller Carrier	Mitsubishi NF250-CW	225	440	15	8	-	
Chiller Carrier	Merlin Gerin NS100N	200-250	440	35	35	-	
Chiller	Mitsubishi NF250-CW	200	440	15	8	-	
Bomba	Mitsubishi NF63-HW	40	440	10	5	-	

Se puede observar que la corriente de corta duración admisible (I_{cw}), solo aplica al interruptor principal ya que es un interruptor de categoría B. Las demás cargas tienen interruptores categoría A, por lo cual no requieren en su funcionamiento ningún retardo en la desconexión por cortocircuito.

La **TABLA III** muestra los interruptores por los cuales se deben cambiar los actuales. Estos interruptores fueron escogidos por medio de simulación en el software ECODIAL. La simulación muestra si el interruptor escogido cumple con una selectividad total o parcial con el interruptor conectado en serie aguas arriba.

TABLA III
INTERRUPTORES RECOMENDADOS

Máquina	Marca	I nominal (A)	Ue (V)	Icu (kA)	Ics (kA)	Icw (kA)
Interruptor principal	Schneider Compact NS1000N	1000	440	65	50	19,2 1s
Laminadora 2	Schneider Compact CVS630F	420-600	440	42	32	-
Compresor 125 HP	Schneider Compact NSX160B	160	440	20	20	-
ML Compresor 125 HP	Schneider Compact NSX160B	160-400	440	20	20	-
Starex 0	Schneider Compact NS800N	320-800	440	50	50	-
Enconadoras	Schneider Compact NSX160F	87-125	440	35	35	-
ML Chiller Carrier	Schneider Compact NSX250N	90-250	440	35	35	-
Chiller Carrier	Schneider Compact NSX250F	90-250	440	35	35	-
Chiller	Schneider iC601	13	440	25	25	-
Bomba	Schneider iC601	10	440	20	10	-

D. Curvas de disparo

A continuación, se muestra el análisis de la coordinación de protecciones mediante el software ECODIAL. La coordinación se realiza entre el interruptor principal y los interruptores aguas abajo. Para cada caso se muestra las curvas de disparo y los ajustes considerados.

La Starex 0 es la máquina más robusta y de mayor consumo en el módulo A. A pesar de que esta máquina no trabaja al 100% de su potencia nominal, su interruptor se dimensionó a partir de esta. En la Fig.10 se muestra la curva de disparo entre el interruptor principal de la subestación y el interruptor de la Starex 0. La corriente de regulación del interruptor de la Starex 0 se configuró a 560 A, ya que por experiencia cuando la máquina opera a corrientes mayores a esta, se presentan daños en algunos componentes electrónicos. El tiempo de acción de la protección de retardo largo (Tr) se redujo al mínimo para cuando la corriente sobrepase los 560 A pueda operar más rápido.

El interruptor Schneider Compact NS800N es electrónico, lo cual permite ajustar la curva de disparo en corriente y tiempo. Las curvas de ambos interruptores no se interceptan, por lo cual se logra una selectividad total.

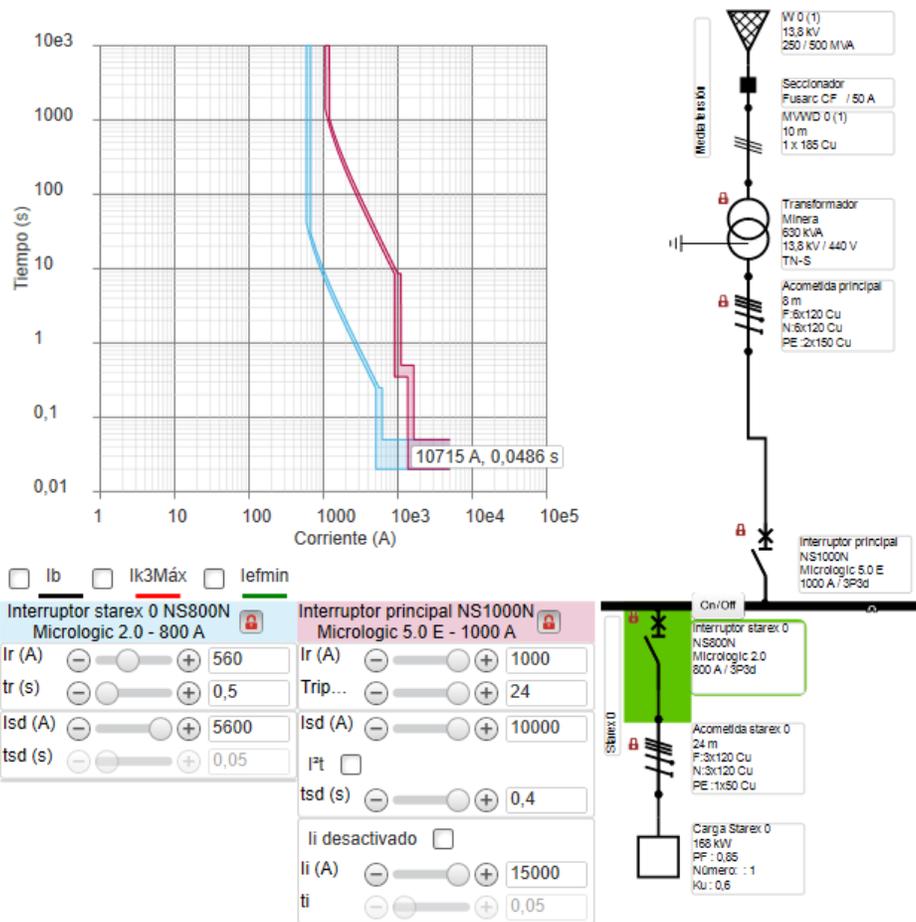


Fig. 10. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor de la Starex 0.

Para la laminadora 2 se utilizó un interruptor electrónico únicamente regulable en corriente de regulación y de corto retardo, ya que no fue necesario ajustarlo en tiempo. Las corrientes de regulación y de corto retardo se ajustaron al mínimo para que la curva de disparo no se interceptara con la curva del interruptor principal. Como se observa en Fig.11, las curvas no se interceptan y se tiene una selectividad total.

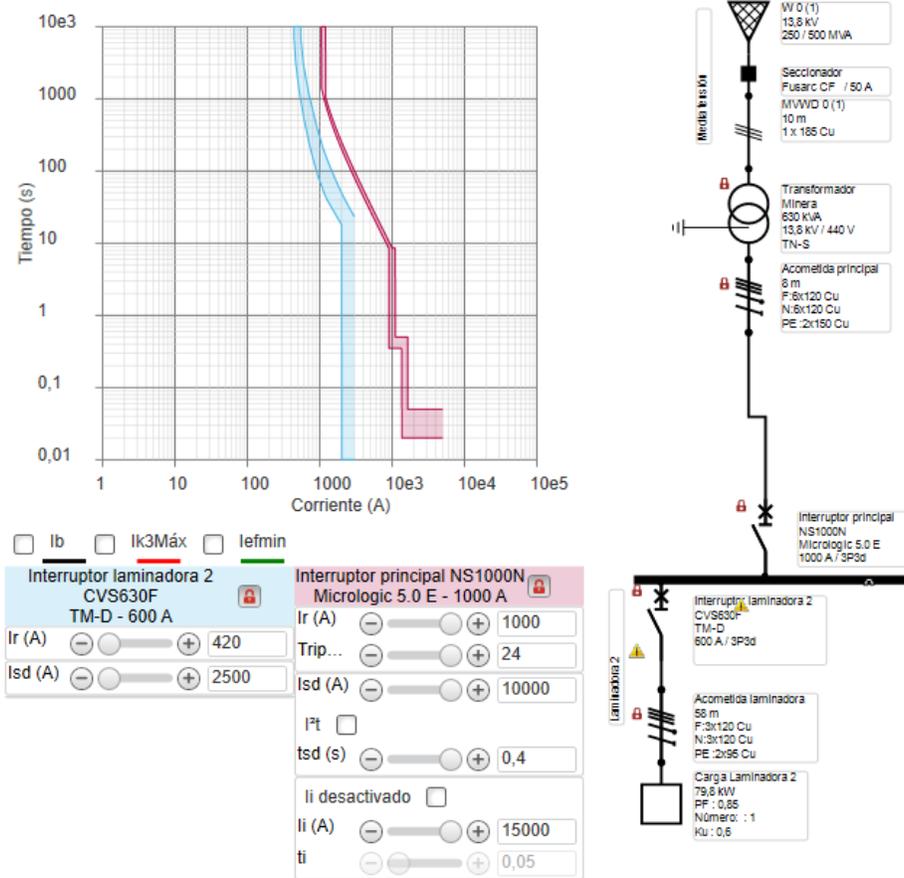


Fig. 11. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor de la Laminadora 2.

En Fig. 12 se tiene la curva de disparo para el interruptor del compresor en el ML principal de la subestación. La corriente de regulación se configuró a 160 A, ya que a futuro se piensa instalar un secador de 15 A junto al compresor. Inicialmente la corriente de corto retardo y los tiempos de disparo se configuraron al mínimo para que la apertura del interruptor fuera lo más rápida posible, pero no se realizó de esta manera debido a que la curva de disparo se interceptaba con la del interruptor aguas abajo llamado ML Compresor. Finalmente se configuró a los valores máximos para poder coordinar con el interruptor del ML Compresor como se observa en Fig.13. Para el interruptor del ML Compresor se logró una selectividad parcial, ya que, a partir de una corriente de cortocircuito de 1742 A, el interruptor aguas arriba que se encuentra en el ML principal de la subestación, se abre. A pesar de esto, se logró muy buena coordinación, ya que se está protegiendo al compresor que es la única máquina involucrada en esta parte del circuito.

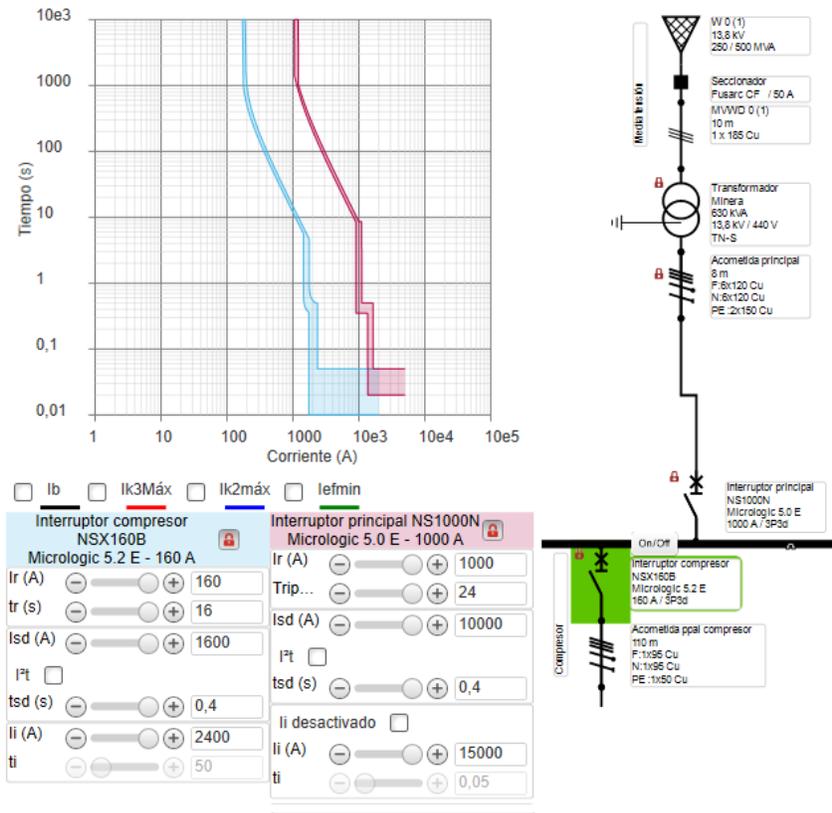


Fig. 12. Curva de disparo entre interruptor principal de la subestación e interruptor del Compresor.

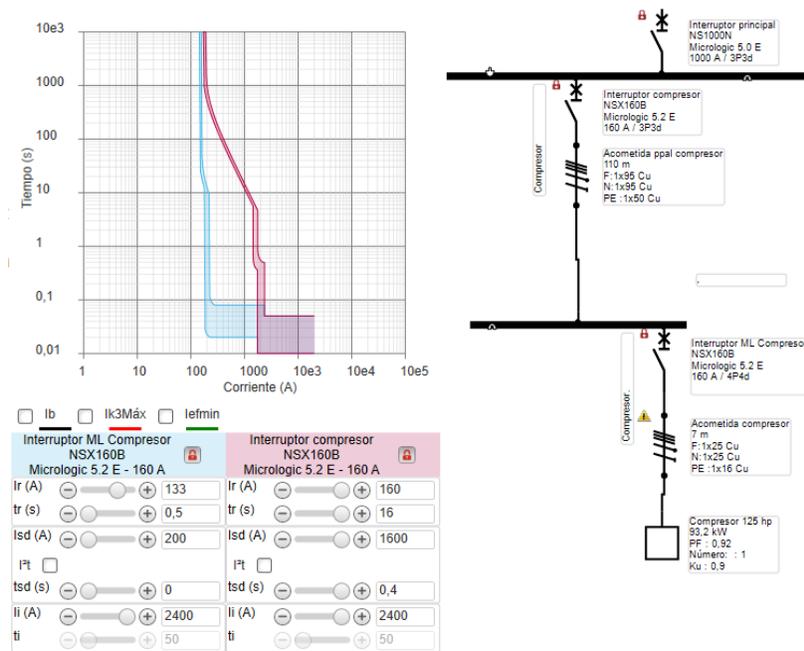


Fig. 13. Curva de disparo entre el interruptor del compresor en el ML principal de la subestación y el interruptor de ML Compresor.

En Fig.14 se muestra la curva de disparo del interruptor del chiller y la bomba ubicada en el ML de la subestación principal. Se utilizó un interruptor electrónico regulable de 90 a 250 A para que a futuro se pueda instalar un nuevo chiller. Únicamente se configuró la corriente de regulación a 120 A y los demás parámetros se dejaron por defecto ya que no se interceptaban con la curva de disparo del interruptor principal.

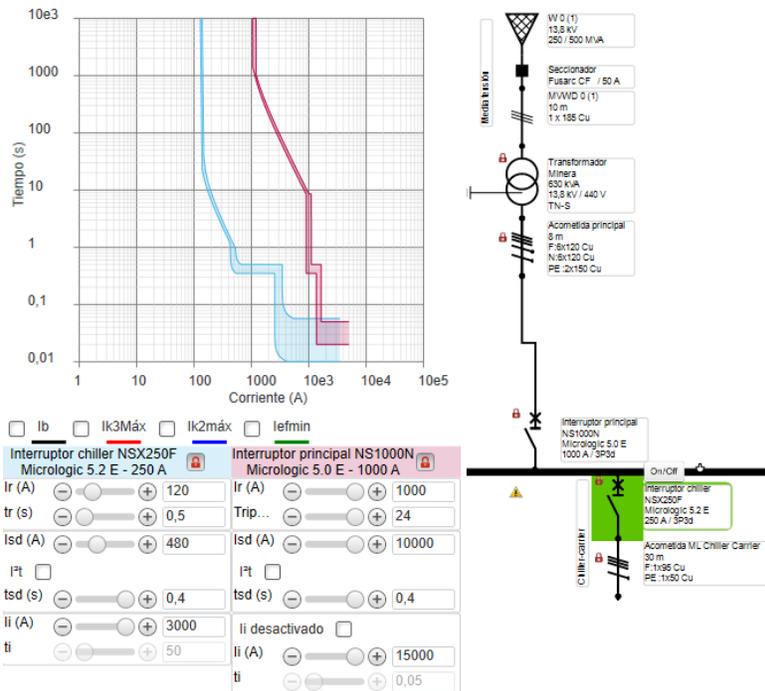


Fig. 14. Curva de disparo del interruptor principal de la subestación y el interruptor principal del chiller y la bomba.

Para el chiller y la bomba se instalaron interruptores termomagnéticos con parámetros fijos como se observa en Fig. 15 y Fig.16 respectivamente. Ambas máquinas trabajan con corrientes inferiores a 90 A, por lo que no fue necesario instalar interruptores regulables. El interruptor principal del ML Chiller Carrier se configuró igualmente a 120 A, para que en caso de presentarse una sobrecorriente actúe a la par con el interruptor principal del chiller que se encuentra en el ML principal de la subestación.

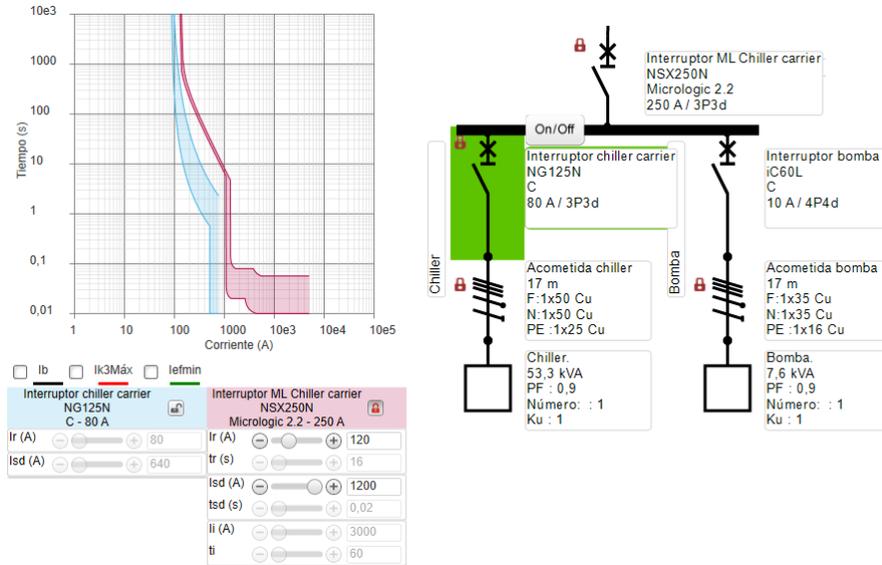


Fig. 15. Curva de disparo entre el interruptor del chiller y el interruptor de ML chiller Carrier.

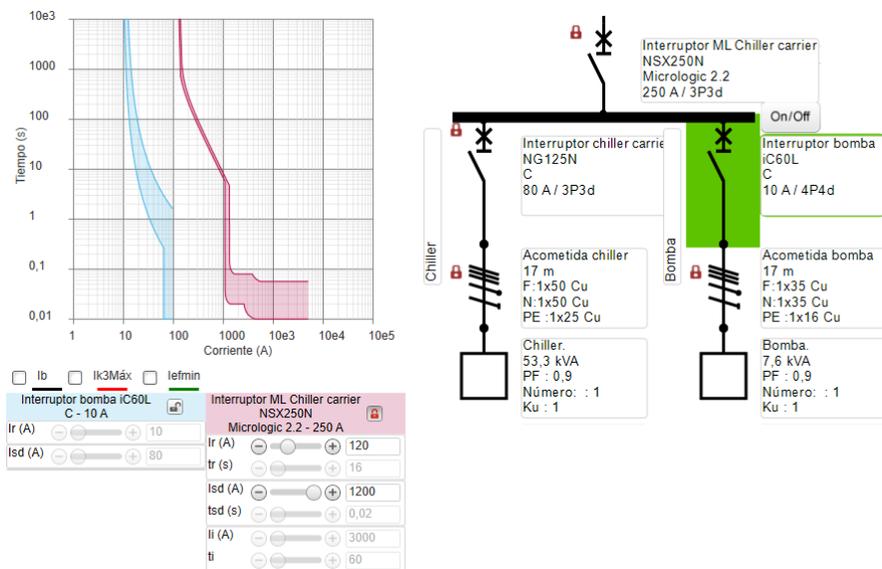


Fig. 16. Curva de disparo entre el interruptor de la bomba y el interruptor de ML chiller Carrier.

Para las enconadoras igualmente se utilizó un interruptor termomagnético con una corriente nominal de 13 A. En Fig.16 se muestra la curva de disparo coordinada con el interruptor principal de la subestación.

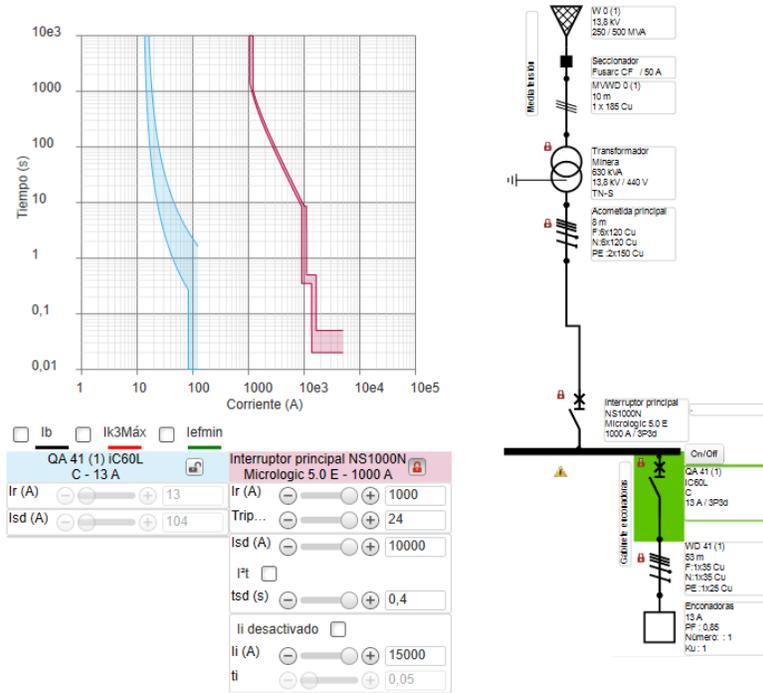


Fig. 17. Curva de disparo entre interruptor de las enconadoras e interruptor principal de la subestación.

VI. CONCLUSIONES

Se logró una selectividad total y parcial de todo el sistema de protecciones de la subestación 14, garantizando la continuidad y confiabilidad del sistema eléctrico ante la presencia de fallas de cortocircuito y cuidando la integridad de las personas y las máquinas.

Con los nuevos interruptores se mejora considerablemente el sistema de protecciones de la subestación 14, ya que el sistema actual tiene interruptores en mal estado, sobredimensionados y que no tuvieron una coordinación de protecciones al momento de ser instalados.

Con el software ECODIAL se facilita la obtención de las curvas de disparo de los interruptores y permite ajustar sus parámetros para lograr una adecuada coordinación de protecciones.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Regotti y J. G. Trasky, «What to Look for in a Low-Voltage Unit Substation», *IEEE Trans. Ind. Gen. Appl.*, vol. IGA-5, n.º 6, pp. 710-719, nov. 1969, doi: 10.1109/TIGA.1969.4181098.
- [2] IEC 60947-1:2020, «Low-voltage switchgear and controlgear-Part 1: General rules». International Electrotechnical Commission, 22 de abril de 2020.
- [3] IEC 60947-2:2016+AMD1:2019 CSV Consolidated version, «Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers». International Electrotechnical Commission, 8 de julio de 2019.
- [4] «Interrupidores de circuito de potencia», *Productos*. <https://www.se.com/co/es/>
- [5] E. Larsen y J. Degnan, «Selective coordination in low-voltage power distribution systems: Is the level important?», en *2008 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, Clearwater Beach, FL, USA, may 2008, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICPS.2008.4606294.
- [6] V. Villalba, «Conferencia-Coordinación de protecciones en baja tensión», Universidad de Antioquia, 2016, vol. 1.
- [7] J. A. Wafer, «The Impact of Solid-State Technology on Molded Case Circuit Breakers», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-16, n.º 5, pp. 605-611, sep. 1980, doi: 10.1109/TIA.1980.4503841.