

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Plataforma docente de relés de protección

MEMORIA

Autor: Daniel Rovira Arazuri
Director: Roberto Villafáfila
Convocatoria: Junio 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto consiste en la ampliación de un laboratorio de protecciones eléctricas para líneas eléctricas de distribución de media tensión ya existente, que está compactado dentro de un armario, en el cual se realizan prácticas y diferentes experimentos para familiarizarse con el funcionamiento de las protecciones.

El objetivo de la ampliación es modificar la estructura del laboratorio separándolo en cuatro maletas portátiles comunicadas entre sí para poder trabajar y realizar prácticas sin ocupar el laboratorio entero. Para ello se pretende reestructurar los elementos y los circuitos eléctricos situados en el armario y reconfigurar los dispositivos de protección.

Índice

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivación	8
1.2. Objetivos	8
1.3. Alcance.....	9
2. REDES ELÉCTRICAS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN	10
2.1. Sistema de suministro eléctrico	10
2.1.1. Red de transporte o interconexión	11
2.1.2. Red de reparto.....	13
2.1.3. Red de distribución MT.....	13
2.1.4. Red de distribución BT	14
2.2. Topología de las redes eléctricas	15
2.2.1. Radial (en antena).....	17
2.2.2. Bucle abierto (Anillo abierto)	18
2.3. Defectos en las redes eléctricas	19
2.3.1. Clasificación.....	20
2.3.2. Cortocircuito.....	21
2.3.3. Sobrecargas	24
2.3.4. Desequilibrios	25
2.4. Esquemas de conexión a tierra del neutro	26
2.5. Protecciones.....	29
2.5.1. Parámetros de protecciones	29
2.5.2. Elementos del sistema de protección	36
2.6. Sistema de comunicaciones	42
3. LABORATORIO DE PROTECCIONES	45
3.1. Introducción.....	45
3.2. Estado actual del laboratorio	46
3.3. Elementos que componen el laboratorio	50
4. REESTRUCTURACIÓN CONCEPTUAL DEL LABORATORIO	61
4.1. Componentes de una maleta.....	61
4.1.1. Conexión al cuadro trifásico	61

4.1.2. Relé de protección (SEPAM) e interruptor automático	65
4.1.3. Conexión al módulo de cargas	66
4.1.4. Transformador trifásico.....	67
4.1.5. Magnetotérmico trifásico	68
4.1.6. Conexión entre maletas.....	68
4.2. Esquema eléctrico.....	70
4.3. Parte física de la maleta.....	73
4.4. Adaptaciones para las otras maletas.....	76
4.4.1. Al resto de maletas que derivan del anillo.....	76
4.4.2. A la de cabecera.....	77
4.5. Ordenador y módulo de cargas	79
4.6. Selectividad	80
5. FUTURAS AMPLIACIONES	82
6. PRESUPUESTO	83
CONCLUSIONES	84
AGRADECIMIENTOS	86
BIBLIOGRAFÍA	87

1. Introducción

La electricidad se define como el conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas, es decir, todo aquello que provoca el desplazamiento de electrones o protones a través de un conductor.

El primer contacto del hombre con la electricidad a nivel científico sucedió siglos atrás, pero no fue hasta el siglo XVIII cuando aparecieron las primeras teorías más consistentes y que más fuerza han tenido sobre la electricidad.

En estos últimos siglos ha adquirido mucha importancia, se puede considerar vital. En cualquier elemento de la vida cotidiana está presente. Obviamente, conlleva unos riesgos, tanto para la salud humana cómo para el equipo con el que se trata. Para controlar estos riesgos se utilizan medidas de protección que se comentarán y se utilizarán en este proyecto.

Durante los últimos años, se ha introducido en la sociedad con mucha fuerza el término de laboratorio remoto, que tiene el objetivo de poder operar y controlar un sistema eléctrico sin tener que hacerlo manualmente. Aunque no es el caso del laboratorio tratado en este proyecto, sí que es de interés la manera de intercambiar información entre los dispositivos que se usa en los laboratorios remotos, ya que se aplica para conectar diferentes dispositivos o elementos de protección entre sí.

Se tendrán que simular por lo tanto posibles fallos que pueda producir el sistema para garantizar un correcto funcionamiento de los sistemas de protección.

En el caso del laboratorio tratado, se pretende garantizar el funcionamiento de los aparatos actuando por separado con un sistema de protecciones implantado. Todo tiene que estar conectado digitalmente para poder utilizar los diferentes aparatos y trabajar conjuntamente entre ellos.

La finalidad del laboratorio es que los usuarios puedan trabajar y realizar prácticas utilizando diferentes herramientas del mismo sin la necesidad de ocupar todo el laboratorio. Así como comprobar el funcionamiento del sistema y los elementos de protección.

1.1. Motivación

La motivación principal de este proyecto es mejorar la accesibilidad a este laboratorio para poder realizar las prácticas sin ocupar todo el laboratorio y así poder organizar los diferentes grupos de estudiantes.

También adquirir nuevos conocimientos sobre los dispositivos con los que se interactuará en este proyecto y la actuación respecto a los defectos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal es la reestructuración de un laboratorio ya existente separándolo en cuatro maletas portátiles con el fin de permitir una mejor organización y docencia en la realización de prácticas y uso de dicho laboratorio.

Para la realización del objetivo principal, se seguirán objetivos más específicos:

- Estudio de la red de media tensión, así como de la red de distribución.
- Investigación de la coordinación entre los dispositivos y de las diferentes protecciones eléctricas.
- Introducción del esquema conceptual de las maletas.

1.3. Alcance

En el proyecto se pretendía realizar el diseño y la reestructuración conceptual del sistema. Por motivos de excepcionalidad debido al Covid-19, se ha visto limitada la realización del proyecto, y no se podrá llevar a cabo la reestructuración conceptual de todo el laboratorio.

2. Redes eléctricas y sistemas de protección

En este apartado se realizará una descripción del funcionamiento de la red eléctrica desde que ésta se genera hasta que llega al usuario, de los riesgos y fallos que se pueden producir en la red y de los sistemas de protección que se utilizan para identificar dichos fallos.

2.1. Sistema de suministro eléctrico

El sistema de suministro eléctrico está compuesto por el conjunto de elementos que son diseñados para la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica. Ésta se genera, se transporta, se distribuye a los puntos de consumo y finalmente se comercializa y se vende cierta energía según la potencia contratada.

Lo cierto es que no existe ninguna estructura eléctrica por defecto en el mundo, pero la estructura eléctrica en general suele dividirse en tres niveles de tensión; alta, media y baja.

La publicación CEI 38 recomienda la utilización para los niveles de tensión en las redes de 50 a 60 Hz. En la mayoría de los países se utiliza 50 Hz.

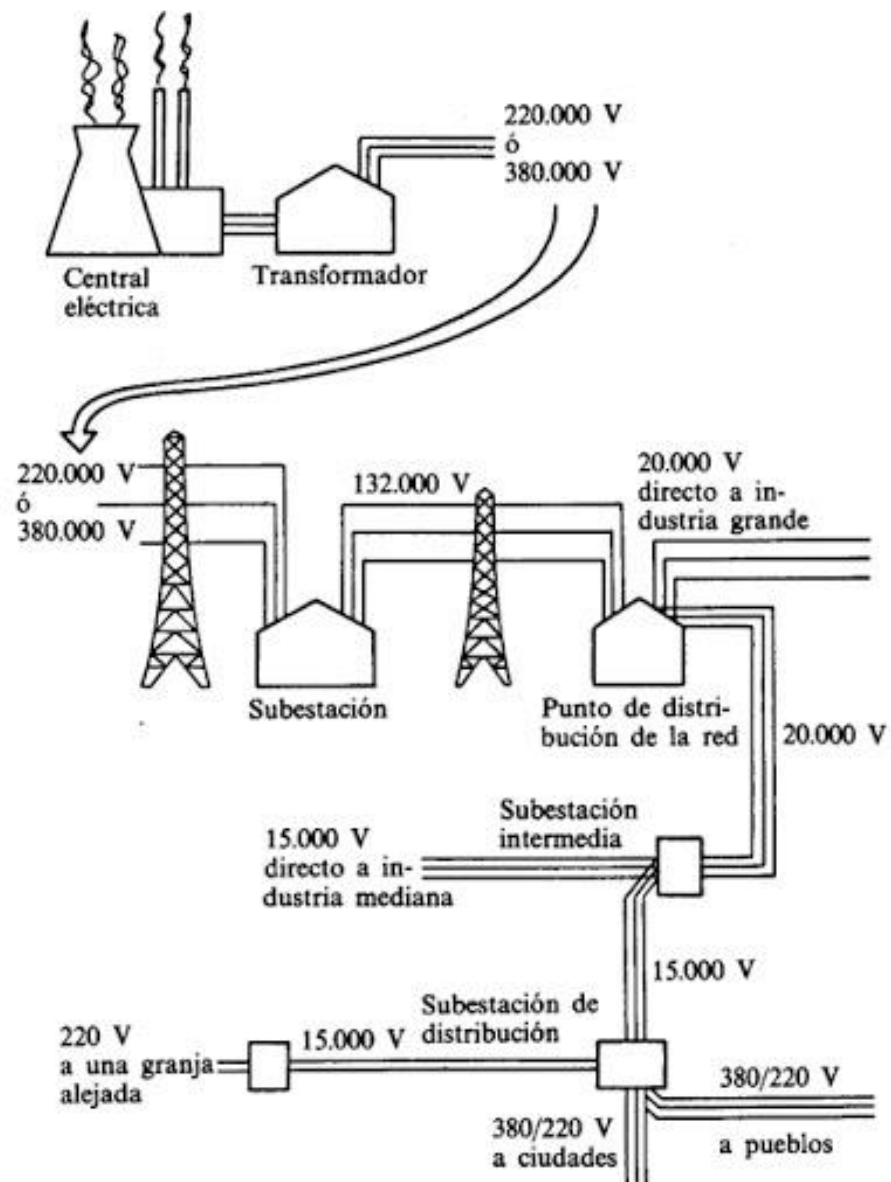


Figura 1: Sistema de suministro eléctrico. Fuente bibliográfica [3]

2.1.1. Red de transporte o interconexión

La electricidad se genera en las centrales eléctricas, transformando algún tipo de energía (química, cinética, térmica, nuclear, solar...), depende del tipo de central. Los lugares de producción están alejados de los puntos de consumo, por lo que se requiere una red eléctrica capaz de transportar la electricidad a grandes distancias.

La energía suministrada por la central suele estar alrededor de 20kV.

Por lo tanto, la finalidad de esta red es principalmente el transporte de la electricidad de las centrales a las zonas de consumo. Sólo unos pocos abonados con fuerte consumo están conectados directamente a estas redes.

Antes de su transporte, mediante transformadores, se elevan las tensiones hasta tener un valor dentro de un intervalo de 225 a 400 kV, aunque hay casos en que llegan a 800 kV. Los distribuidores de electricidad imponen estos valores tan altos de tensiones con un fin económico, minimizando así las pérdidas por Efecto Joule.

- Efecto Joule:

Cuando circula corriente eléctrica por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor y por lo tanto se convierte en energía disipada. Cuánta más corriente circula por un conductor, más de la energía es disipada. La potencia disipada sigue esta fórmula:

$$P = R * I^2$$

Por lo tanto, se transporta la electricidad a tensiones muy altas, para que la intensidad sea mínima, y de esta manera minimizar las pérdidas por efecto Joule, porque la intensidad aparece al cuadrado.

Además, si se transportara con tensiones bajas, las secciones de los cables tendrían que ser excesivamente grandes para poder transportar tanta potencia, y desde un punto de vista pragmático eso es inadmisibile.

El aspecto de seguridad es fundamental en todas las redes, pero en este tipo de redes lo es aún más, porque cualquier fallo podría afectar a muchos puntos de consumo, como ha sucedido en cierto países en el pasado. Por lo tanto las protecciones deben ser muy eficaces.

La estructura de éstas acostumbra a ser aérea.

2.1.2. Red de reparto

La finalidad de esta red es llevar la electricidad de la red de transporte hacia los grandes centros de consumo, que corresponden al sector público con acceso a redes de media tensión, o al sector privado con acceso a grandes valores de potencia, que suelen ser industrias siderúrgicas, químicas, etc.

El diseño de estas redes en las zonas de gran densidad de población es con el paso del tiempo más complejo y costoso, puesto que se tienen que cumplir las políticas de respeto al entorno y al medio ambiente.

Los valores de tensión de estas redes suelen estar comprendidos entre 25 y 275 kV. Las protecciones que se utilizan en estas redes son las mismas que en la red de transporte.

La estructura de éstas suele ser también aérea, aunque existen algunos diseños subterráneos, pero no es lo general.

2.1.3. Red de distribución MT

La finalidad de esta red es acercar la electricidad de las redes de reparto a los puntos de consumo medio, que corresponden al sector público con acceso a la red de distribución pública de media o baja tensión, o al sector privado con acceso a consumo medio, que suelen ser del sector terciario; hospitales, pequeñas industrias, etc.

Las tensiones de estas redes van de unos pocos kV a 40 kV. En este tipo de redes las protecciones son menos sofisticadas que en las redes anteriores, pero siguen siendo importantes, como en todo tipo de redes.

Éstas pueden ser tanto aéreas como subterráneas.

2.1.4. Red de distribución BT

Esta red tiene como finalidad llevar la electricidad de la red de distribución anterior a los puntos de bajo consumo, que corresponde al último nivel en una estructura eléctrica.

Es la red a la que más consumidores están conectados, ya que alimenta al sector doméstico. Los niveles de tensión están entre 100 y 400 V.

Al igual que en las de MT, pueden ser tanto aéreas como subterráneas, aunque es importante mencionar que debido al emplazamiento de estas redes, se elige un diseño u otro según las condiciones o normativas de entorno.



Figura 2: Red subterránea. Fuente bibliográfica [20]



Figura 3: Red aérea. Fuente bibliográfica [21]

2.2. Topología de las redes eléctricas

El rendimiento de una red depende entre otras cosas de su topología, lo que se refiere al esquema, protecciones y modo de explotación de la red que se utiliza para transportar energía eléctrica.

Definir una topología consiste en fijar cierto número de elementos teniendo en cuenta los objetivos que se quieren lograr, que principalmente son garantizar la seguridad de las personas y los bienes y conseguir un nivel de calidad adecuado.

Esta topología tiene que cumplir las exigencias del entorno, y está marcada por la extensión geográfica, es decir el relieve y las dificultades de construcción de la red.

Según la topología elegida se fijaran diferentes elementos de las redes, como las potencias y el valor máximo de las corrientes de defecto a tierra, las tensiones de servicio, las protecciones contra las sobretensiones, distribución aérea o subterránea, , el tipo de explotación, etc.

Hay distintos esquemas de redes:

- Bucle cerrado, tipo mallado
- Bucle abierto
- Bucle abierto, tipo mallado simplificado
- Radial
- Doble radial

Las más comunes de estas topologías son la radial y el bucle abierto, así que se tratará más detalladamente estas dos.

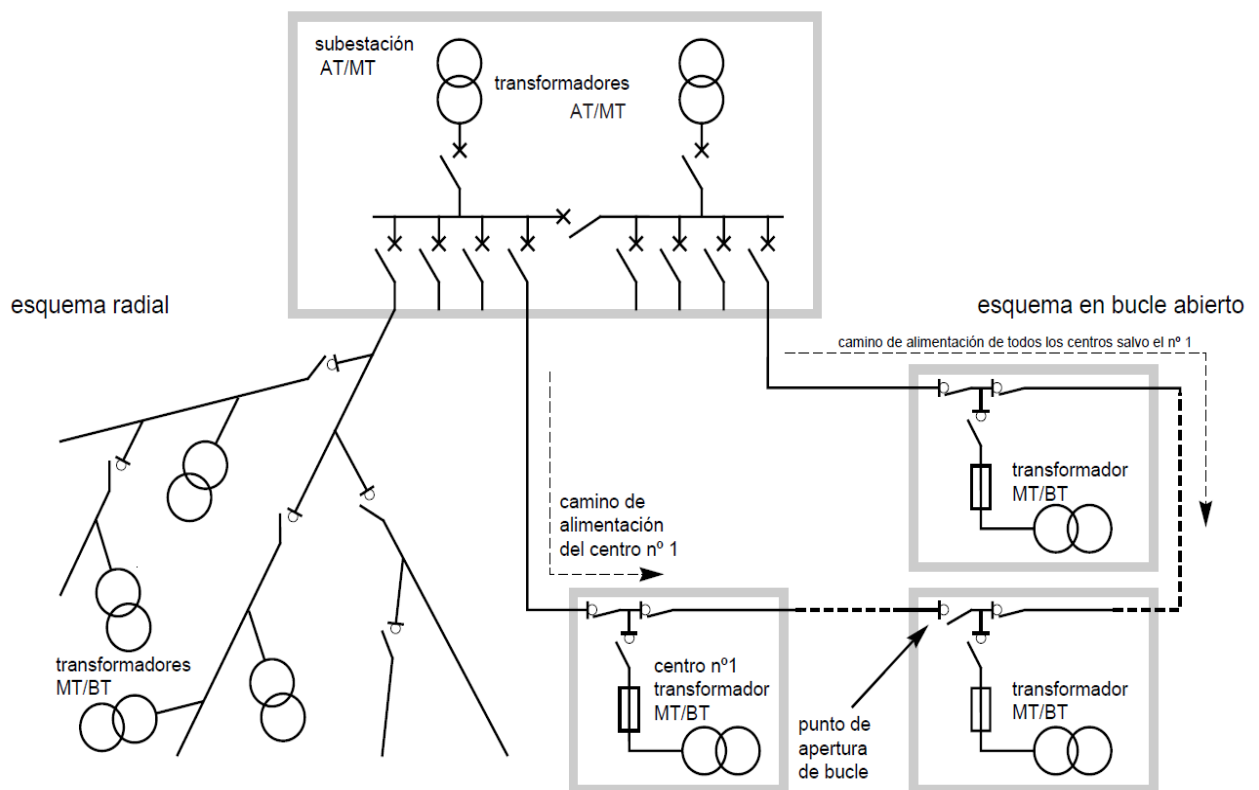


Figura 4: Topología radial vs bucle abierto. Fuente bibliográfica [3]

2.2.1. Radial (en antena)

Su principio de funcionamiento consiste en una sola vía de alimentación, por lo que cualquier punto de consumo sólo puede ser alimentado por un único posible camino eléctrico.

Este esquema se utiliza generalmente para la distribución de MT en el medio rural. Suele estar relacionado a una distribución de tipo aéreo.

Sus ventajas recaen en su simplicidad, explotación y coste de instalación. Su punto débil corresponde a la calidad de servicio.

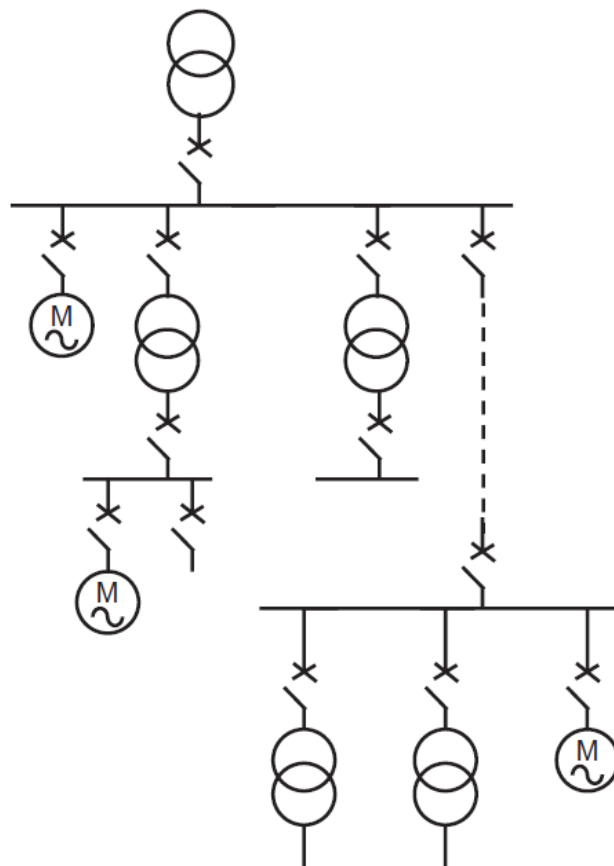


Figura 5: Topología radial. Fuente bibliográfica [3]

2.2.2. Bucle abierto (Anillo abierto)

Su principio de funcionamiento consiste en dos vías de alimentación, es decir, cualquier punto de consumo puede ser alimentado por dos posibles caminos eléctricos.

Existe siempre un punto de apertura en el bucle. Cada punto, suele haber entre 15 y 25 por bucle, está conectado al bucle mediante dos interruptores. Todos los interruptores están cerrados excepto uno, que es el que define el camino de alimentación. Cuando se efectúan maniobras de reconfiguración por un defecto, este punto puede ser desplazado si conviene. El objetivo es que en caso de defecto en algún tramo, poder aislar dicho tramo dejando el resto en servicio.

Por lo tanto, existe la posibilidad de alimentar alternativamente de una fuente u otra.

Este tipo de esquema es también simple, y proporciona una buena calidad de servicio. Como desventajas, la explotación es más compleja porque requiere más maniobras y los costes de instalación son más altos que en los esquemas radiales.

Esta es la topología con la que se tratará en el laboratorio de protecciones.

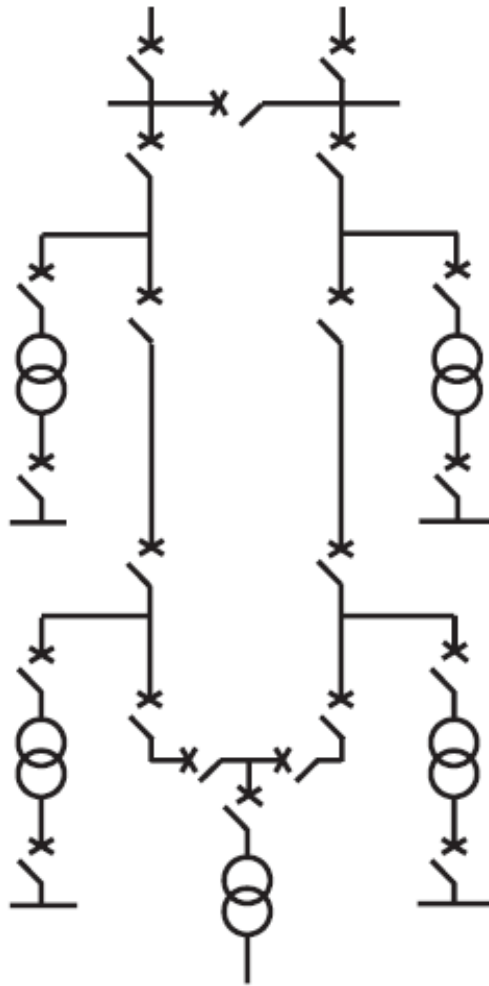


Figura 6: Topología anillo abierto. Fuente bibliográfica [3]

2.3. Defectos en las redes eléctricas

Un defecto se considera cualquier situación anormal que se produzca en la red. Los defectos pueden provocar incendios, en consecuencia, poner en peligro la seguridad humana, así como la de los bienes y elementos que se encuentran en las instalaciones.

Los defectos también pueden provocar un corte de suministro en áreas más allá de la que se produce el defecto, dejando sin electricidad a actividades industriales y

comerciales, actividades domésticas, etc.

Por lo tanto, para evitar graves consecuencias provocadas por los defectos, es importante conocer bien los tipos de defectos que se pueden producir, así como los valores de tensión y de corriente que pueden llegar a provocar en caso de defecto, para poder establecer los dispositivos de protección adecuados y reducir así las consecuencias.

2.3.1. Clasificación

Según su duración:

- Auto extingible: de 10 a 20 ms. Desaparecen por si solos.
- Transitorio: de 100 ms a 1 segundo. Un sistema de protección interviene, y el defecto no deja graves consecuencias en el equipo.
- Semipermanente: de 1 a 30 segundos.
- Permanentes: más de 30 segundos. Tanto los semipermanentes como los permanentes producen daños en el equipo.

Según su localización:

- Monofásico a tierra.
- Polifásico.
- Polifásico a tierra.

2.3.2. Cortocircuito

Un cortocircuito puede definirse como una conexión anormal de muy baja impedancia entre dos puntos con diferencia de potencial, ya sea hecha intencionadamente o accidentalmente. Esta conexión provoca un aumento muy grande del valor de corriente que circula por el circuito eléctrico.

Este es el tipo de defecto que puede tener consecuencias más graves, a causa del alto valor de la intensidad, por lo tanto hay que tenerlos muy en cuenta ya que aunque persista por un periodo corto, puede producir daños irreparables en los equipos y quemar los conductores.

Pueden ser causados por:

- Deterioro del aislamiento, ya sea por calentamientos excesivos del conductor o por desgaste del material.
- Problemas mecánicos, como roturas de conductores o impactos en cables subterráneos.
- Por factores humanos, causados por diseños inadecuados de la instalación, uso incorrecto de los materiales, etc.
- Vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

En general, se agrupan los cortocircuitos de la siguiente manera:

Cortocircuito entre fase - tierra

Sucede cuando alguna de las fases de la red eléctrica entra en contacto con tierra o algún elemento conectado a ella. Estos son los defectos más comunes que aparecen en las redes eléctricas.

Son peligrosos para las personas ya que podrían tocar algún elemento, que en

condiciones normales no debería estar en tensión, pero en caso de cortocircuito, sí. También ponen en peligro la seguridad de los bienes.

A continuación se enseñan los diferentes tipos de contactos entre conductores que pueden ocurrir.

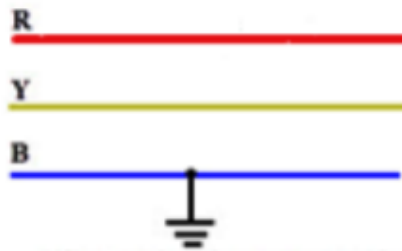


Figura 7: Contacto fase - tierra. Fuente bibliográfica [11]

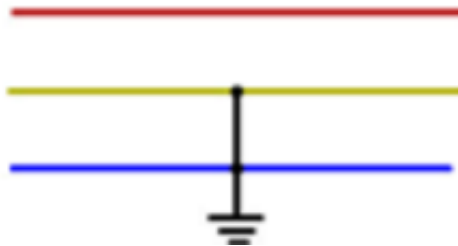


Figura 8: Contacto doble fase - tierra. Fuente bibliográfica [11]

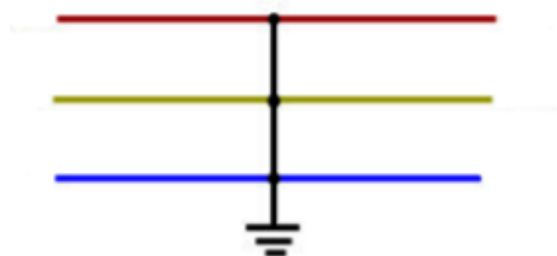


Figura 9: Contacto triple fase – tierra. Fuente bibliográfica [11]

Cortocircuito entre fase – fase

Sucede cuando alguna de las fases de la red entra en contacto con otra de las fases. Este tipo de cortocircuito puede provocar deformación o explosión de los elementos a causa de los efectos electromagnéticos.

A continuación se enseñan los contactos que se pueden producir.



Figura 10: Contacto fase - fase. Fuente bibliográfica [11]



Figura 11: Contacto entre las 3 fases. Fuente bibliográfica [11]

Finalmente, la siguiente figura corresponde a una combinación de los dos posibles cortocircuitos.

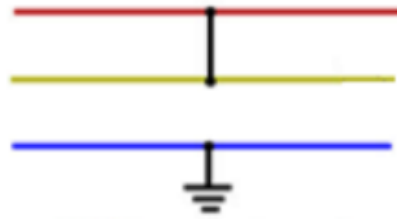


Figura 12: Contacto fase – fase y contacto fase – tierra a la vez. Fuente bibliográfica [11]

2.3.3. Sobrecargas

Se produce cuando fluye por el circuito eléctrico una corriente moderadamente por encima de su valor nominal.

Pueden ser causadas por un aumento de consumo, aumento del número de cargas alimentadas simultáneamente, aumento de la temperatura ambiente, etc.

En un circuito sobrecargado, si no se toman medidas, los conductores se calientan y el aislante se va quemando o derritiendo poco a poco.

Los valores de intensidad en caso de sobrecarga son bastante más bajos que en caso de cortocircuito, por lo que no se interrumpe el flujo eléctrico en fracciones de segundo. Sin embargo, aunque su efecto sea más lento, no por ello se le da menos importancia, ya que si no se corta el flujo y el aislante se sigue quemando, se pueden producir incendios dentro de la instalación.

Es importante mencionar que existen sobrecargas puntuales, también llamadas sobrecargas previsibles, y son sobrecargas que no tienen peligro ya que se cuenta con ellas previamente, y se diseña el sistema de protección para que no interrumpa el flujo eléctrico en el caso de una sobrecarga previsible. Estas se producen por ejemplo en el arranque de un motor.

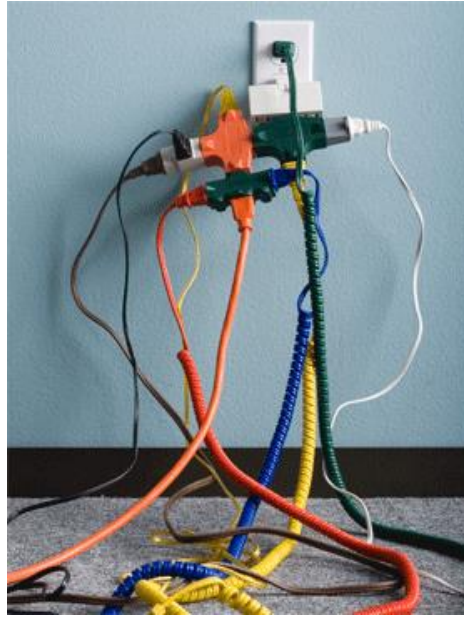


Figura 13: Ejemplo en pequeña escala de un aumento de carga (sobrecarga).

2.3.4. Desequilibrios

En un sistema trifásico ideal, los módulos de las tres fases (R, S, T) tienen la misma magnitud y un desplazamiento de 120° , tanto la intensidad como la corriente. En un sistema trifásico ideal no se cumple con exactitud, pero sí de manera aproximada.

Por lo tanto se conoce como desequilibrio a cuando en un sistema trifásico existen diferencias entre los valores eficaces de las tensiones, es decir, cuando los módulos de las tres fases no tienen la misma magnitud. Se considera desequilibrio cuando la intensidad sobre pasa un rango de 10% de la intensidad nominal, y de 3% de la tensión nominal. Aunque estos valores pueden variar.

Que haya un desequilibrio en la corriente que circula por cada fase implica que aparezca corriente por el neutro.

Habitualmente la principal causa de un desequilibrio es que las cargas monofásicas cuelgan mayoritariamente de una de las fases y por tanto haciendo que circule más corriente por esa fase que por las demás.

Este tipo de defecto provoca sobrecalentamiento en los elementos que componen la red, aumento de las pérdidas, etc.

2.4. Esquemas de conexión a tierra del neutro

La elección del esquema de conexión a tierra del neutro define diferentes parámetros en la red, entre ellos los valores de las sobretensiones y corrientes de defecto que podrán existir en una red en caso de defecto a tierra. Depende del esquema utilizado se eligen diferentes opciones para la protección de la red y diferentes métodos de explotación.

El objetivo es limitar los valores de tensiones o corrientes de paso en caso de defecto a tierra.

Los esquemas se establecen en función de las conexiones a tierra de la red de distribución, y de las masas de la instalación receptora.

Principalmente, hay 3 tipos de esquemas generales, y a partir de estos hay ciertas variantes. En este apartado se definirán estos 3 tipos.

- Esquema TN

Tienen un punto de la red de distribución, generalmente el conductor neutro, conectado directamente a tierra, y las cargas de la instalación receptora conectadas al mismo punto de alimentación mediante conductores de protección.

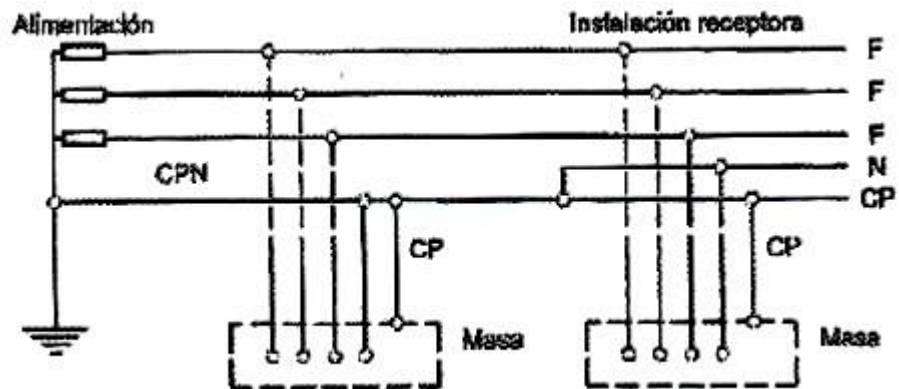


Figura 14: Esquema TN-C y TN-S. Fuente bibliográfica [22]

Como se aprecia en la figura, hay 2 tipos de esquemas TN, tal como se ha comentado anteriormente, esto son diferentes variantes dentro de los más generales.

- Esquema TT

Tiene un punto de la red de distribución, generalmente el neutro, conectado directamente a tierra. En cambio en este tipo de esquema, las cargas de la instalación receptora están conectadas a una toma de tierra separada de la toma de tierra de la red de distribución.

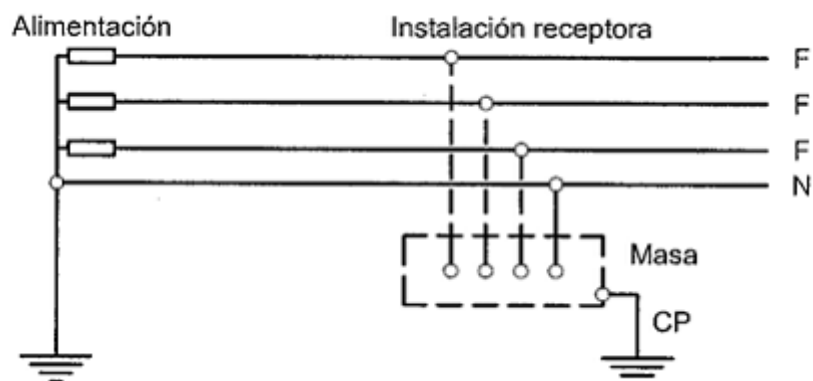


Figura 15: Esquema TT. Fuente bibliográfica [22]

- Esquema IT

Este tipo de esquema no tiene ningún punto de la red de distribución conectado a tierra, o bien se haya ubicada una impedancia entre el neutro y tierra. Por otro lado las cargas de la instalación receptora están conectadas directamente a tierra.

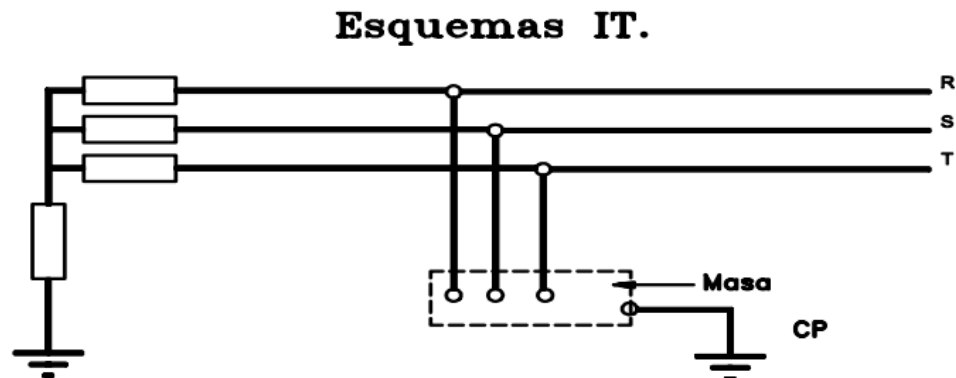


Figura 16: Esquema IT. Fuente bibliográfica [22]

Las principales diferencias entre los esquemas se encuentran en el comportamiento de la red en situación de defecto a tierra, según su facilidad en la detección de defectos y el grado de seguridad para las personas del esquema.

En el caso de España, mayoritariamente se utiliza el esquema TT, el cual posee unas excelentes características de protección y un buen costo operacional. Esta elección condiciona las prestaciones de la red y el diseño del plan de protección en la red.

2.5. Protecciones

Una red eléctrica se puede desglosar o dividir en zonas de funcionamiento, donde cada zona está protegida por un interruptor automático asociado a diferentes dispositivos de detección, que pueden ser captadores de medida, transformadores, relés de protección, etc.

El conjunto de estos elementos tiene como objetivo la localización y eliminación de la parte defectuosa de la red en caso de fallo así como reducir consecuencias de un posible cortocircuito, o defectos de aislamiento de cables, entre otros defectos.

La eficacia de un sistema de protección depende de diferentes parámetros.

2.5.1. *Parámetros de protecciones*

2.5.1.1. *Fiabilidad*

Criterio que mide lo referente a la protección de las personas y bienes. En el momento que se produce un defecto y el relé es solicitado para actuar, debe actuar eficazmente, es decir, actuar en el momento en el que se solicita.

2.5.1.2. *Sensibilidad*

Criterio que mide la facilidad para detectar pequeñas corrientes de defecto que son un peligro para los bienes y personas, pero sin que se provoquen disparos en momentos que no es necesario.

2.5.1.3. *Selectividad*

Es el criterio que requiere soluciones técnicas más específicas. Indica en qué medida es posible mantener en servicio la red cuando en uno de sus elementos se produce un defecto, es decir, si es posible aislar la porción de la red afectada, siendo esta la menor porción posible.

Cuando aparece un defecto en la red eléctrica, varios elementos de protección situados en zonas diferentes pueden detectar esta anomalía simultáneamente. La selectividad permite priorizar la actuación del elemento que se encuentre más cerca, aguas arriba, del defecto.

También es importante que en el caso que un elemento de protección no actúe correctamente ante una anomalía, otro elemento situado aguas arriba de éste, debe reaccionar para limitar las consecuencias del defecto.

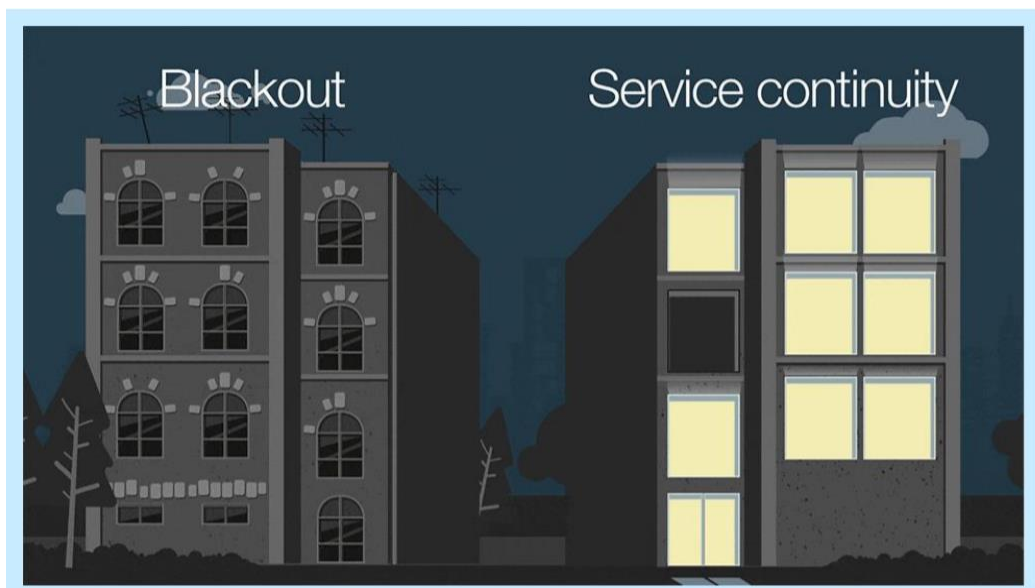


Figura 17: Ejemplo de una mala selectividad vs una selectividad adecuada.

Por lo tanto, la selectividad es la organización de actuación de las protecciones ante los defectos.

Hay distintos tipos de selectividad, entre los más comunes:

Selectividad amperimétrica:

Consiste en programar las protecciones de manera que se diferencien diferentes niveles de intensidad.

En el caso de sobrecargas, las protecciones situadas aguas arriba están programadas para actuar cuando hay valores de corriente más grandes que en el

caso de las protecciones situadas aguas abajo.

En el caso de cortocircuito, la clave de este tipo de selectividad reside en que el valor de las intensidades de cortocircuitos disminuye con la distancia, es decir, ocurre un amortiguamiento de la corriente de cortocircuito. Por lo tanto, la intensidad de cortocircuito aguas abajo de la red es más pequeña que aguas arriba, y así aguas abajo actuarán las protecciones que estén programadas para actuar contra niveles de intensidades más bajos, que serán las que estén aguas abajo.

Este tipo de selectividad es conveniente para líneas largas, porque en el caso de ser cortas las intensidades de cortocircuito aguas abajo no se amortiguan suficiente. Normalmente se aplica en casos en los que hay transformadores aguas arriba y abajo del circuito en defecto, porque la impedancia del mismo es suficientemente elevada como para amortiguar la corriente de cortocircuito.

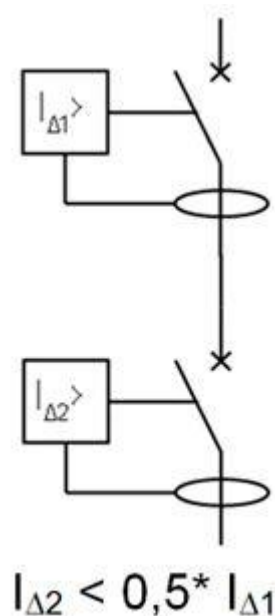


Figura 18: Ejemplo de selectividad amperimétrica. Fuente bibliográfica [23]

Obviamente en el ejemplo de la Figura 18, el valor 0.5 es un valor de ejemplo. Este valor depende de cada red y se podría calcular conociendo el valor de las impedancias que hay entre los puntos, los transformadores, etc.

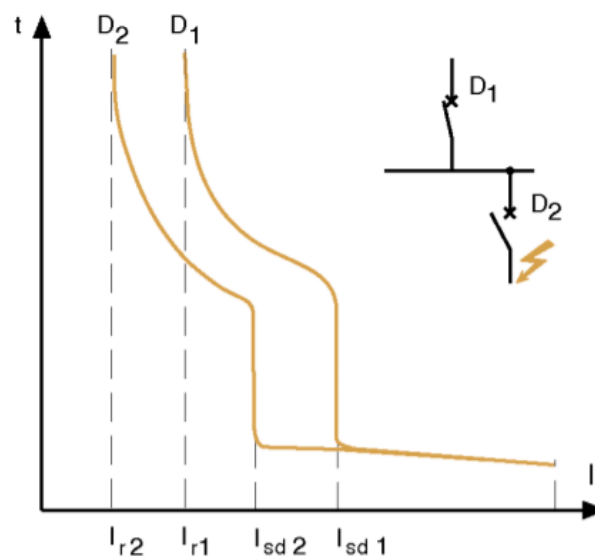


Figura 19: Curva de actuación en caso de selectividad amperimétrica. Fuente bibliográfica [24]

El descenso en picado del tiempo es debido a un caso de cortocircuito (intensidades muy altas), pues es importante cortar el flujo cuanto antes.

Selectividad Cronométrica:

Es la más simple ya que únicamente consiste en configurar las temporizaciones de las protecciones de tal manera que una vez detectado el defecto, actúen en tiempos diferentes. Las protecciones situadas aguas abajo actúan en un intervalo de tiempo más pequeño que las de aguas arriba.

Este tipo de selectividad asegura así que si una protección no consigue actuar de forma correcta, la siguiente protección que se encuentra aguas arriba de ésta se encargue de actuar contra el defecto.

Generalmente, el intervalo de selectividad entre cada protección es de 300 milisegundos. El problema que tiene es que no se pueden realizar niveles de selectividad indefinidos, puesto que es importante que se actúe siempre antes de

alcanzar tiempos aproximadamente de 1 segundo, puesto que más tiempo podría poner en peligro las propiedades del material. Normalmente todos los elementos del circuito suelen diseñarse para soportar la corriente de cortocircuito durante 1 segundo antes de que las consecuencias sean graves.

Así, es importante no superar el límite de 1 segundo, para evitar riesgos dañinos para la instalación.

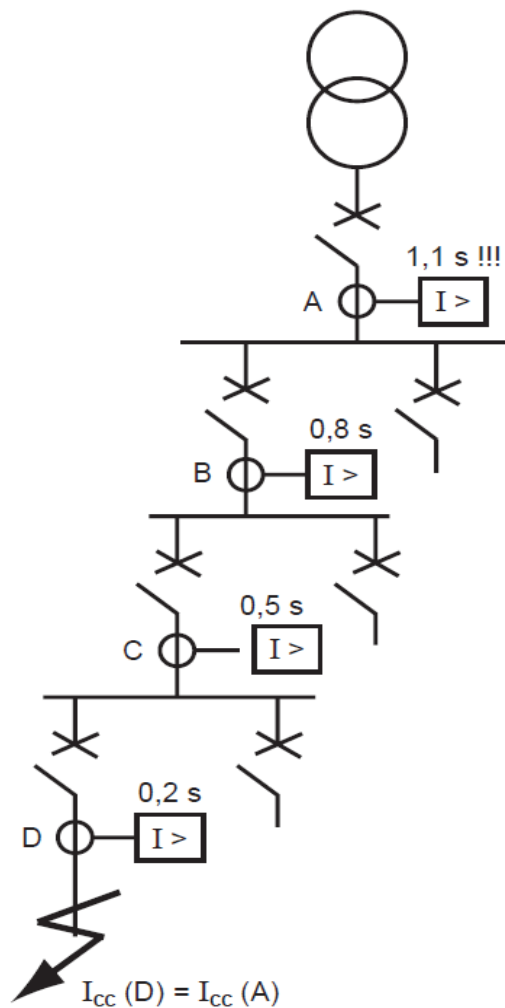


Figura 20: Ejemplo de selectividad cronométrica. Fuente bibliográfica [6]

Es común de combinar este tipo de selectividad con la amperimétrica para garantizar una correcta selectividad.

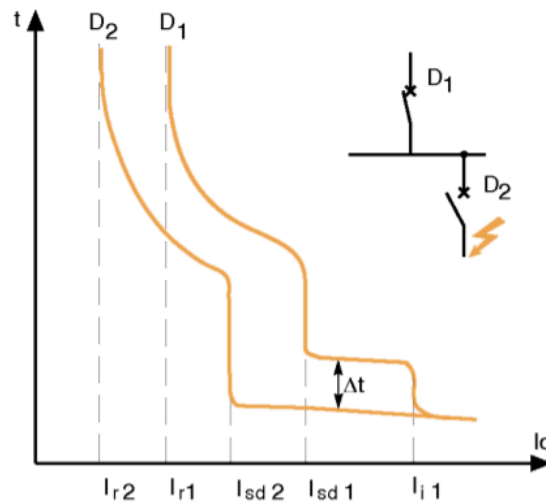


Figura 21: Curva de actuación (inversa) en caso de selectividad cronométrica.

Fuente bibliográfica [24]

También existe la posibilidad de programar una curva de actuación de tiempo definido, es decir, que independientemente del valor alcanzado por la corriente, mientras ésta supere el valor de la corriente programada para que el relé salte, la actuación del relé se producirá en el tiempo programado, siempre el mismo, haya o no corrientes muy altas. Este tipo de curva de actuación se usa en menos medida.

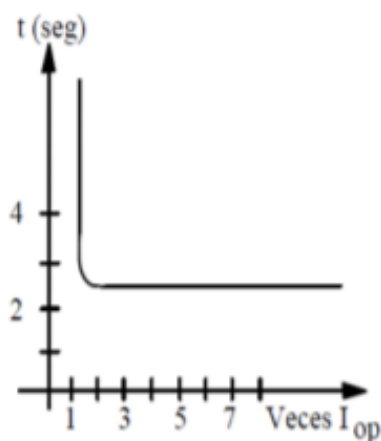


Figura 22: Curva de actuación de tiempo definido. Fuente bibliográfica [25]

Selectividad lógica:

Se basa en que todos los relés situados aguas arriba de donde se produce el defecto, lo detectan, pero el relé más cercano, aguas arriba al defecto, emite una orden de espera lógica a los relés de aguas arriba para bloquear la actuación de las demás protecciones. Por lo tanto, el relé en actuar será el que haya detectado el defecto pero no haya recibido ninguna orden lógica de espera, que en el caso de selectividad completa, será el relé más cercano al defecto, aguas arriba. Así, se aislará el defecto y el resto de la red que no está involucrada continuará en funcionamiento.

Normalmente, se recurre a este tipo de selectividad cuando con la selectividad cronométrica se lleguen a tiempos inadmisibles. La gran ventaja de la selectividad lógica es que se pueden tener todos los relés programados con el mismo tiempo de actuación.

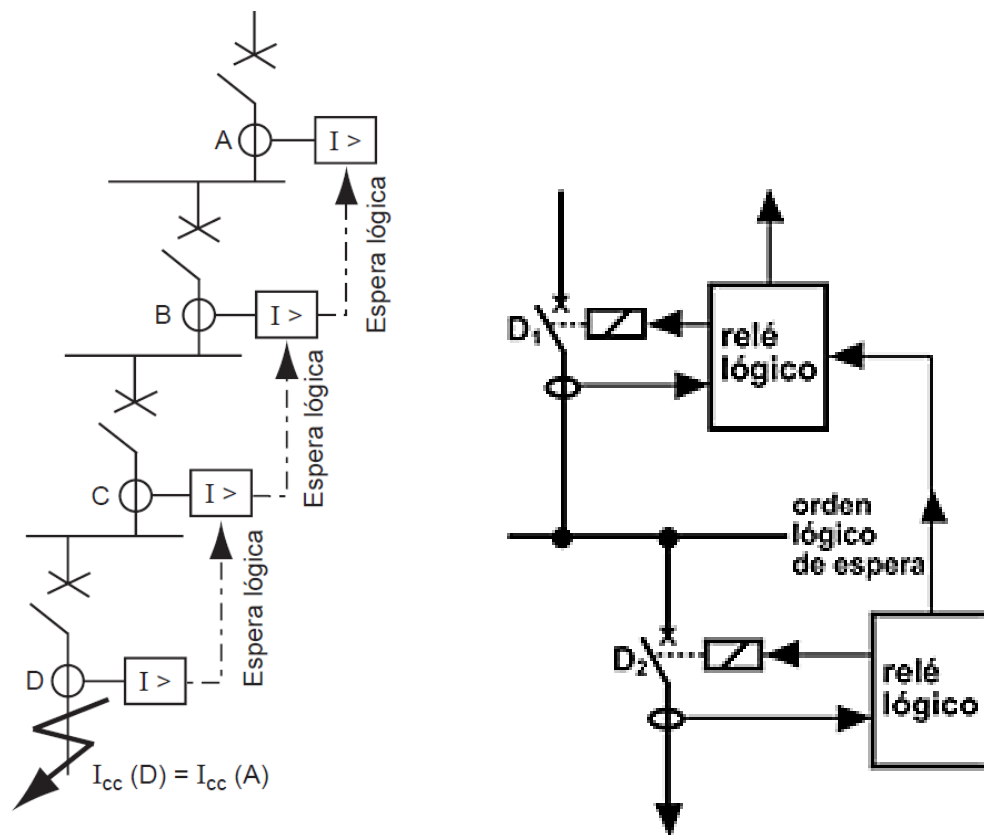


Figura 23 y 24: Ejemplos de selectividad lógica. Fuente bibliográfica [6]

2.5.1.4. *Rapidez*

Permite limitar los daños debidos a un defecto. Es importante una selección adecuada para que las consecuencias del defecto no sean grandes para la red. Reduce también los riesgos de incendio y los costes de reparación debidos al defecto.

2.5.1.5. *Evolutividad*

Una red eléctrica tiene que ser adaptable a modificaciones, ya que con los años hay que hacer numerosos cambios en la red a causa de la evolución de la demanda, la normativa, o de avances tecnológicos. La evolutividad indica el nivel de posibilidades y facilidades para el sistema protección frente a estas modificaciones.

2.5.2. Elementos del sistema de protección

El conjunto de aparatos de maniobra, regulación y control de medida son los que forman un sistema de protección en las instalaciones eléctricas.

Básicamente, este sistema de protección permite realizar:

- El seccionamiento, que se trata de aislar una parte de la red para que se pueda trabajar en ella con total seguridad.
- El mando, que consiste en abrir y cerrar un circuito cuando el operador lo desee.
- La protección, que en caso de defecto o situación anormal aísla la parte de la red afectada.

El sistema de protección se puede estructurar de diferentes maneras, pero generalmente se utiliza una de estas tres opciones:

- Se colocan los elementos de protección por separado.
- Envoltentes mecánicas que contienen los elementos.
- En cuadros eléctricos.

Los elementos que se utilizan son los siguientes.

2.5.2.1. *Captadores o transformadores*

- Transformador de intensidad (TI)

Su función es reducir el valor de la corriente a medir a un valor suficientemente pequeño para que los elementos de medida y protección no sean dañados.

Puede producirse el caso de que la intensidad en el borne primario del condensador sea demasiado alta, poniendo en peligro los aparatos conectados en el secundario. En ese caso se coge un valor máximo de la corriente primaria de tal modo que si la intensidad adquiere ese valor, el secundario desembraga, y así el valor de la corriente del secundario está limitado.

- Transformador de tensión (TF)

Su función es la misma que el transformador anterior pero reduce la tensión. Existen dos tipos de TF distintos, tensión simple y tensión compuesta, según si hay un o dos bornes aislados.

Los transformadores son muy importantes en los sistemas de protección ya que los aparatos de medida no podrían soportar ciertos valores de tensión o corriente, pero

son especialmente necesarios en redes de alta y media tensión, ya que los valores son mucho más altos.



Figura 25: Transformador de Intensidad. Fuente bibliográfica [6]

2.5.2.2. Relés de protección

Una unidad de protección, o relé, tiene como objetivo principal proteger a las personas de los riesgos eléctricos y evitar daños en los equipos, y para lograr este objetivo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Vigilar permanentemente varios parámetros de una parte de la red.
- Actuar cuando se produce una situación anormal.
- Transmitir información para la explotación de la red.

El funcionamiento de un relé de protección se basa en analizar los valores de las magnitudes que le son proporcionadas por los captadores, y si detecta una situación anormal en dichos valores, dar las órdenes de funcionamiento a los interruptores automáticos.

Anteriormente, los relés de protección eran de escasa precisión y sus regulaciones se desviaban con el tiempo, pero actualmente, gracias a la evolución de la tecnología electrónica y el uso de microprocesadores son más precisos y fiables.



Figura 26: Relé de protección Schneider (SEPAM S80). Fuente bibliográfica [6]

2.5.2.3. Interruptores

Hay dos tipos de interruptores, según su función.

- Interruptores automáticos:

Su función es la de cortar una parte del circuito cuando el relé o el elemento de medida se lo indique, es decir, cuando se detecta un defecto en la red.

- Interruptores no automáticos:

Su función principal es el mando de la red, es decir, cortar una parte del circuito cuando un operario lo desee, ya sea para mantenimiento de la red o por otras causas.



Figura 27: Interrupor automático Schneider. Fuente bibliográfica [8]

2.5.2.4. Alimentación del sistema de protecciones

Hay dos tipos de alimentación de los elementos que constituyen el sistema de protecciones (interruptores y relés):

- Sin alimentación auxiliar: Se alimentan directamente a través del circuito vigilado.

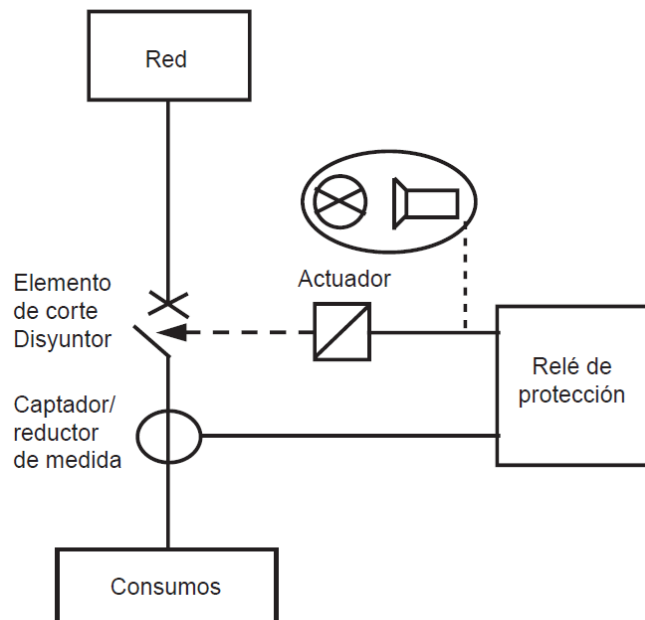


Figura 28: Sistema de protección sin alimentación auxiliar. Fuente [4]

- Con alimentación auxiliar: Se alimentan por una fuente de alimentación externa al circuito vigilado.

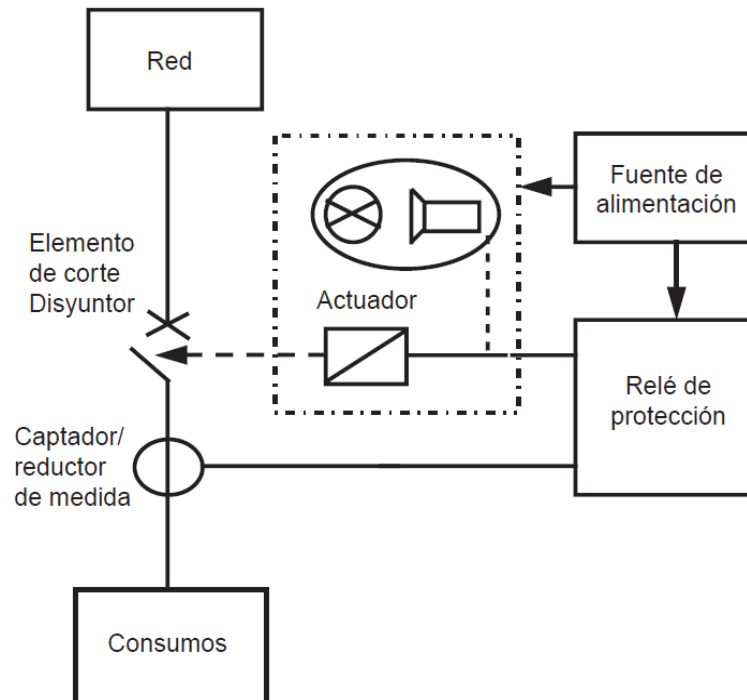


Figura 29: Sistema de protección con alimentación auxiliar. Fuente bibliográfica [4]

Es recomendable una alimentación doble, es decir, una directamente a través del circuito, y en el caso de que la red quedase fuera de servicio, por una fuente de alimentación externa.

2.5.2.5. Sistema de comunicaciones

Permite conocer el estado de interruptores y relés para poder realizar operaciones e intercambiar información. En el rediseño del laboratorio, se utilizaría también para comunicar las maletas portátiles, pero no se realizará este aspecto en este proyecto.

2.5.2.6. *Osciloperturbografías*

Los relés de protección (SEPAM) tienen una función que consiste en la grabación de un gráfico temporal donde se muestran los valores de tensión y corriente instantes antes de que se detecte el defecto de la red. En la configuración interna del SEPAM se puede activar dicha grabación.

De esta manera, el alumno puede observar cómo se comporta la red instantes antes de la detección del defecto, y su correspondiente actuación

2.6. Sistema de comunicaciones

Aunque en este proyecto no se estudie específicamente este aspecto de los sistemas, se considera importante introducirlo para entender lo básico de su funcionamiento.

El sistema de comunicación es necesario para que los elementos del circuito intercambien información y se puedan comunicar entre ellos. Igual de importante es que dichos elementos puedan transmitir la información que contienen al exterior para poder analizar los datos. Se suelen analizar los datos a través de un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), que tal como indica su nombre, se emplea para controlar y supervisar los datos generalmente de procesos industriales, a distancia.

El problema que había antiguamente era que los fabricantes se centraban solamente en el diseño de su propia red, de esta manera era prácticamente imposible comunicar elementos creados por diferentes fabricantes.

La solución a este problema fue crear ciertas normas generales a la hora del diseño para que todos los elementos de diferentes fabricantes fueran compatibles entre ellos.

De esta idea surgió el modelo OSI (Open System Interconnection), que se define como un modelo de referencia para los protocolos de red, con el objetivo de conseguir conectar sistemas de diferente procedencia.

Modelo OSI

Fue creado por ISO (International Organization for Standardization) como modelo de referencia para el establecimiento de la comunicación en diferentes sistemas técnicos.

Es el resultado de un intento de normalización, que divide el proceso de la comunicación en red, que es extremadamente complejo, en siete niveles, denominados capas OSI. Cada capa tiene su función específica.

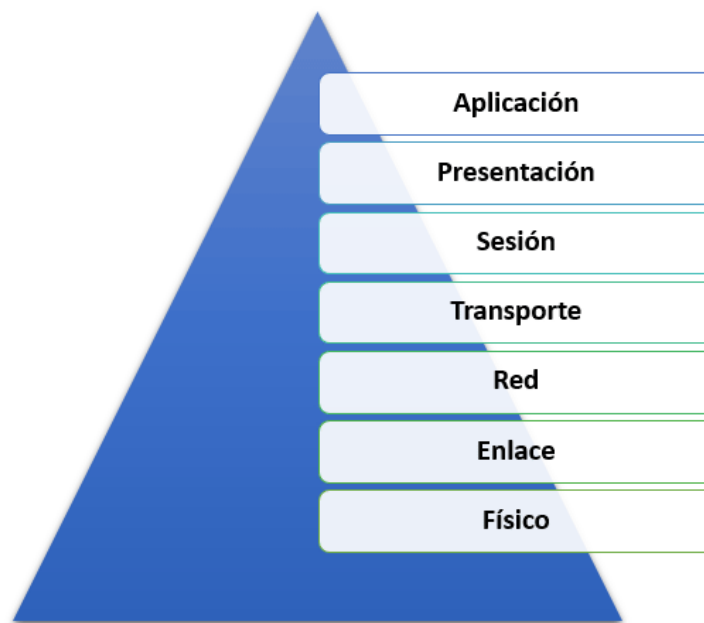


Figura 30: Capas modelo OSI. Fuente bibliográfica [18]

Cada una de estas capas se relaciona solamente con la capa anterior y la posterior, es decir, la capa 5 se relaciona con la 6 y la 7 exclusivamente.

Cada nivel se comunica con su homólogo, es decir, el mismo nivel situado en el otro extremo de la comunicación.

Para finalizar este apartado, se introducirán diferentes conceptos importantes para el sistema de comunicaciones:

Modbus

Es un protocolo de comunicaciones situado en los niveles 1, 2 y 7 del OSI, que se usa para la conexión de un ordenador de supervisión.

Norma IEC61850

Es una norma internacional para la comunicación en subestaciones. Permite integrar las funciones de medición, control, protección y supervisión en una subestación.

Mensajes GOOSE

Estos mensajes facilitan la comunicación entre elementos y permiten transmitir comandos de un dispositivo electrónico inteligente a otro de forma más directa.

3. Laboratorio de protecciones

3.1. Introducción

En este apartado se explicarán los elementos que componen el laboratorio y la situación actual de este.

Debido a la situación de excepcionalidad, no se pudo acceder al laboratorio para ver y fotografiar su estado. Por lo tanto, se utilizará información y fotografías de la referencia bibliográfica [1] (**Ampliación de un laboratorio de protecciones eléctricas en líneas de distribución**), puesto que corresponde a la última modificación del laboratorio y por lo tanto al punto de partida de este proyecto, que el objetivo será crear 4 maletas portátiles a partir de este laboratorio.

Todos los planos que se mostrarán en este apartado fueron realizados por el autor de dicha ampliación, **Rubén Daniel Álvarez Muñoz**.

El laboratorio tiene el objetivo de emular una red de distribución MT en forma de anillo abierto con la que se alimenta tres líneas independientes entre ellas. De esta manera el alumnado podrá familiarizarse con los diferentes elementos que componen dicho laboratorio y experimentar emulando diferentes defectos para ver cómo reaccionan las protecciones y cómo se analiza la información.

La red cuenta con protecciones encargadas de detectar los defectos que puedan surgir, que son:

- Sobrecargas
- Cortocircuitos
- Desequilibrios

Actualmente se dispone de una interface SCADA en un ordenador y conectada a un autómatas en el laboratorio, con el fin de poder supervisar, controlar y analizar el comportamiento de las protecciones.

3.2. Estado actual del laboratorio

En este apartado se adjuntaran las fotografías, para que el lector tenga una imagen general del laboratorio.



Figura 31: Fotografía general del laboratorio en el armario.

En esta primera fotografía, se puede ver el espacio tan reducido en el que se encuentra el laboratorio, actualmente no es el mejor lugar para realizar prácticas con grupos relativamente grandes de alumnos.



Figura 32: Cableado de los SEPAMS



Figura 33: Conexiones sin terminales



Figura 34: Cableado por dentro del armario



Figura 35: Módulo de cargas



Figura 36: Cableado de los SEPAMS

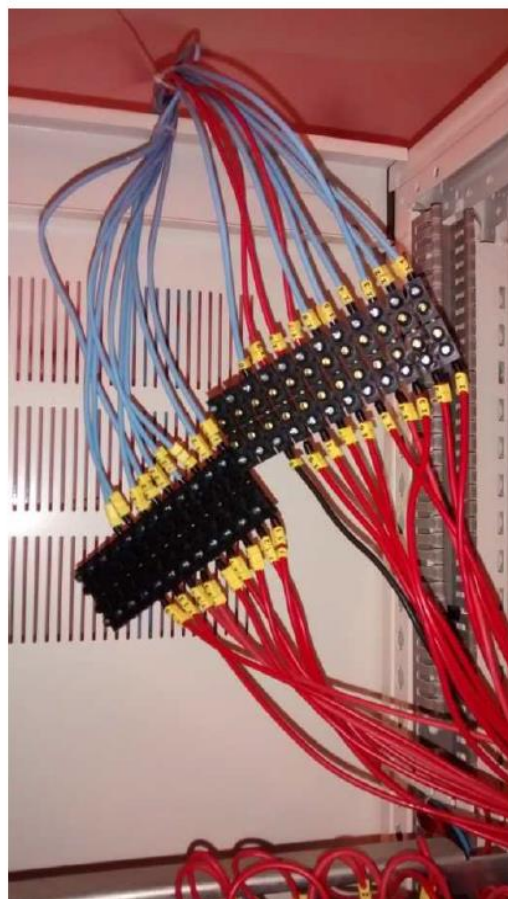


Figura 37: Sistema enchufable del módulo de cargas

3.3. Elementos que componen el laboratorio

En este apartado se expondrán los elementos que componen el laboratorio, así como los planos del circuito junto a una explicación del funcionamiento de éste.

Relés de protección (SEPAM)

En el apartado (2.5.2.2 *Relés de protección*), se ha explicado el funcionamiento y objetivo de un relé. En el caso de este laboratorio, se dispone de cuatro relés para controlar los posibles defectos que los alumnos emulen, la distribución de los cuales se mostrará en los planos del circuito de potencia.

Los relés son:

- SEPAM de cabecera Serie S82 (SEPAM 1.1)
- SEPAM línea 1 Serie M20 (SEPAM 1.1.1)
- SEPAM línea 2 Serie S42 (SEPAM 1.1.2)
- SEPAM línea 3 Serie S41 (SEPAM 1.1.3)

Los cuatro relés son de diferente serie, esto no afectará al funcionamiento básico, ya que el relé desempeñará el mismo rol de actuación, por lo tanto no influirá en el montaje eléctrico de las maletas. Sí es verdad que a nivel de dimensionamiento y funcionalidades de las diferentes series se tiene que tener en cuenta.



Figura 38: Relé de protección Schneider (SEPAM S80). Fuente bibliográfica [6]

Interruptores automáticos:

En el apartado (2.5.2.3 *Interruptores*) se ha explicado la función de un interruptor.

El laboratorio dispone de un interruptor general que está situado aguas arriba del anillo abierto, y tres interruptores que se encuentran cada uno en una de las tres líneas. En los planos del circuito de potencia se verá su distribución.

Los cuatro interruptores pertenecen son de la marca Schneider NS100.

- Interruptor automático general (NS1.1)
- Interruptor automático de la línea 1 (NS1.1.1)
- Interruptor automático de la línea 2 (NS1.1.2)
- Interruptor automático de la línea 3 (NS1.1.3)



Figura 39: Interruptor automático NS100. Fuente bibliográfica [8]

Circuito de potencia

Básicamente, es la red trifásica que se encarga de alimentar el anillo, y por lo tanto las líneas conectadas a él.

Al ser una red trifásica, el punto de conexión a la red del edificio es trifásico y tiene un valor de 400 V. Por motivos de seguridad y del módulo de cargas que se comentará posteriormente, esta tensión se reduce mediante un transformador trifásico en la entrada a un valor de 230 V. Por lo tanto, se dispone de una red trifásica con una tensión de línea de 230 V.

El circuito dispone también dispone de una protección trifásica, que está compuesta por un interruptor diferencial y un interruptor magnetotérmico. Cuenta también con tres interruptores magnetotérmicos trifásicos independientes, uno para cada de las líneas. Estas protecciones no forman parte del sistema de protección que pretende emular la actuación frente a un defecto, sino que tienen la función proteger frente a los defectos que no son provocados por el usuario intencionadamente.

A este circuito de potencia se encuentran conectados todos los contactores del anillo, que en el plano que se verá a continuación reciben el nombre de (K1, K2, K3,

K4, K5, K6, K7, K8 y K9).

Los interruptores automáticos (NS100) también se encuentran conectados al circuito.

Como se verá en los planos, en el inicio del circuito se encuentra ubicado el dispositivo magnetotérmico general (Q1.1), junto al transformador de tensión trifásico de 400 V a 230 V (T1.1) y al interruptor diferencial general (Q2.1), que se han comentado anteriormente.

Seguidamente está el Sepam de cabecera (SE1.1) junto con el interruptor automático general (NS1.1).

Una vez la red llega al anillo, se encuentran los contactores del anillo mencionados anteriormente, y se divide el circuito en las tres líneas independientes.

En cada línea hay un Sepam (SE1.1.1), junto a un interruptor automático (NS1.1.1) y un magnetotérmico (Q1.1.1).

Finalmente se encuentra el módulo de cargas, que se explicará posteriormente.

A continuación se adjuntan los planos dónde se aprecia el circuito de potencia en su totalidad.

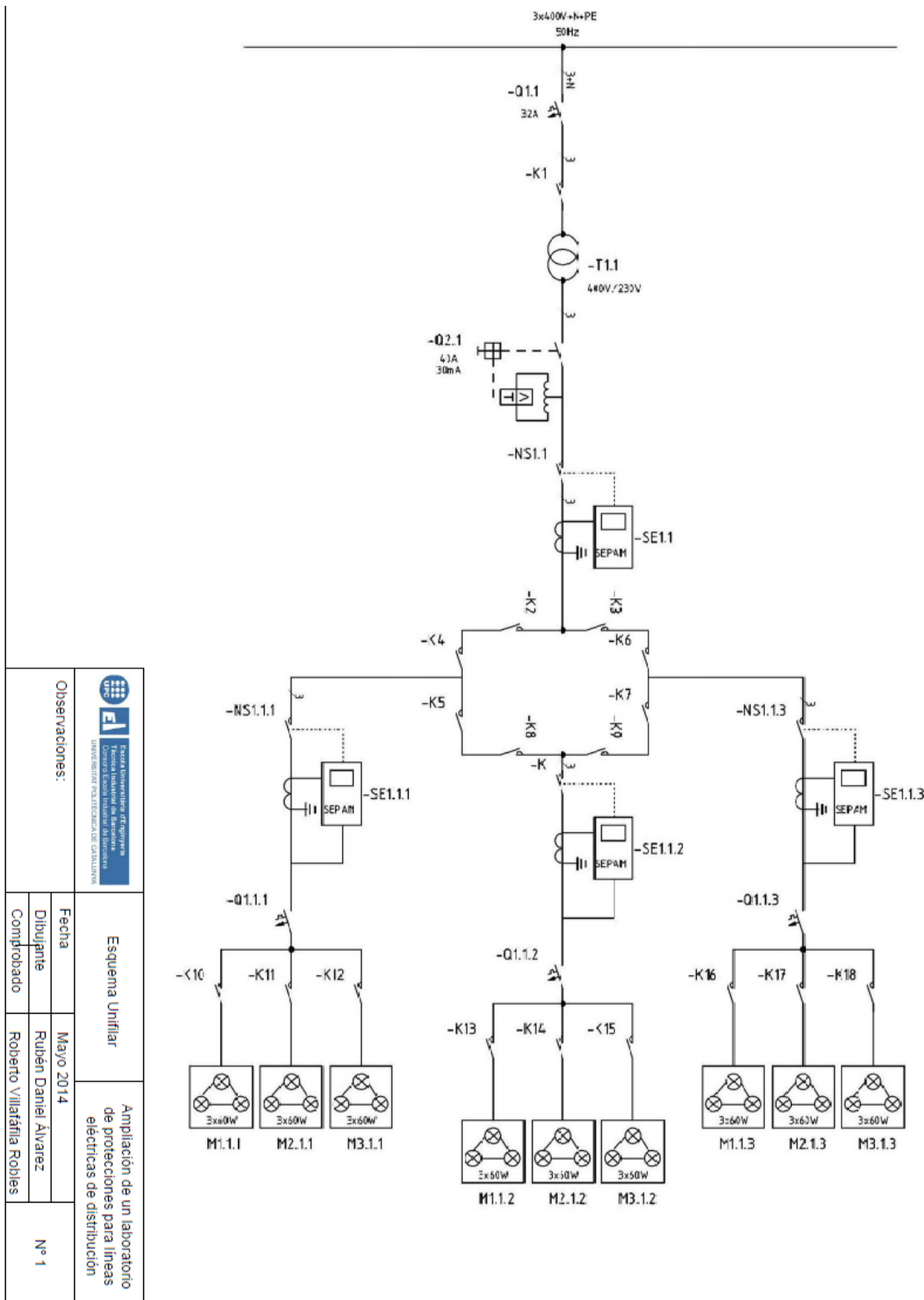


Figura 40: Esquema general del circuito.

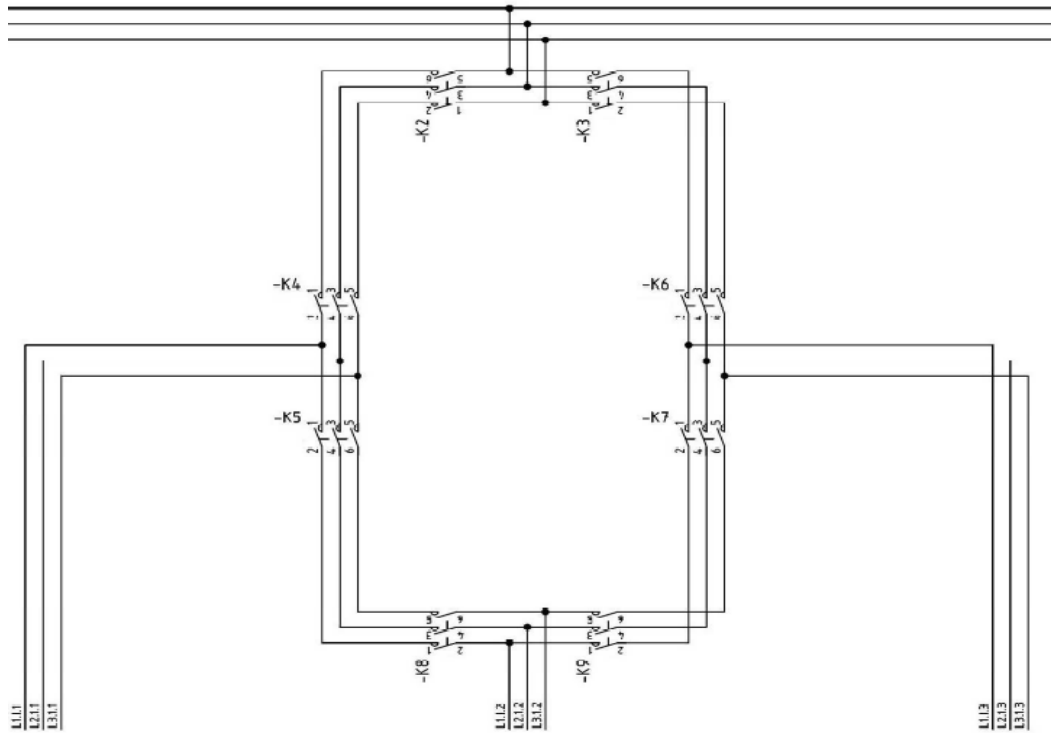


Figura 41: Esquema del anillo

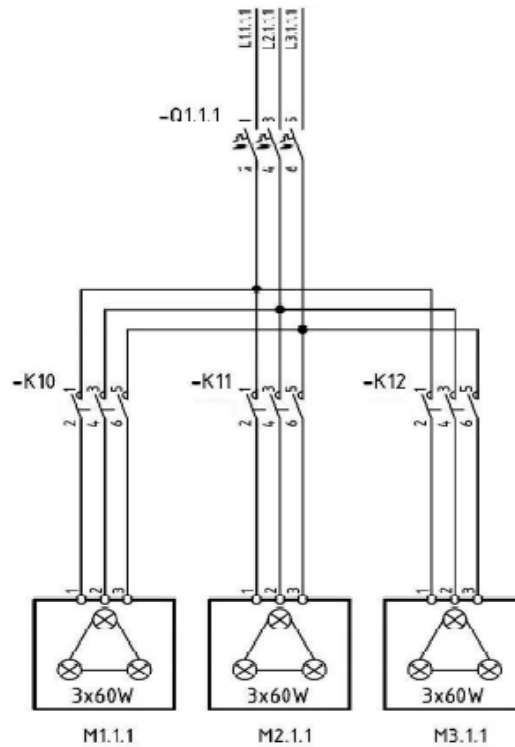


Figura 42: Esquema de una línea conectada al modulo de cargas

Circuito de maniobra:

Es el conjunto de conductores que alimenta a los dispositivos y permite el intercambio de señales entre ellos.

En este caso, el punto de conexión a la red es monofásico, y de un valor de 230 V, puesto que los SEPAMS son monofásicos. Dispone de una protección general monofásica compuesta por un interruptor diferencial y uno magnetotérmico.

Igual que en el caso del circuito de potencia, estas protecciones no forman parte del sistema de emulación, sino que protegen el bienestar de las personas en caso de defectos no intencionados.

En este circuito se diferencian dos redes, una de 230 V, y otra de 24 V, ya que algunos elementos funcionan con 24 V. Para obtener dicho valor de tensión, se ubica un transformador que convierte los 230 V de corriente alterna en 24 V de corriente continua.

A este circuito están conectados los SEPAMS.

A continuación se adjuntan los planos.

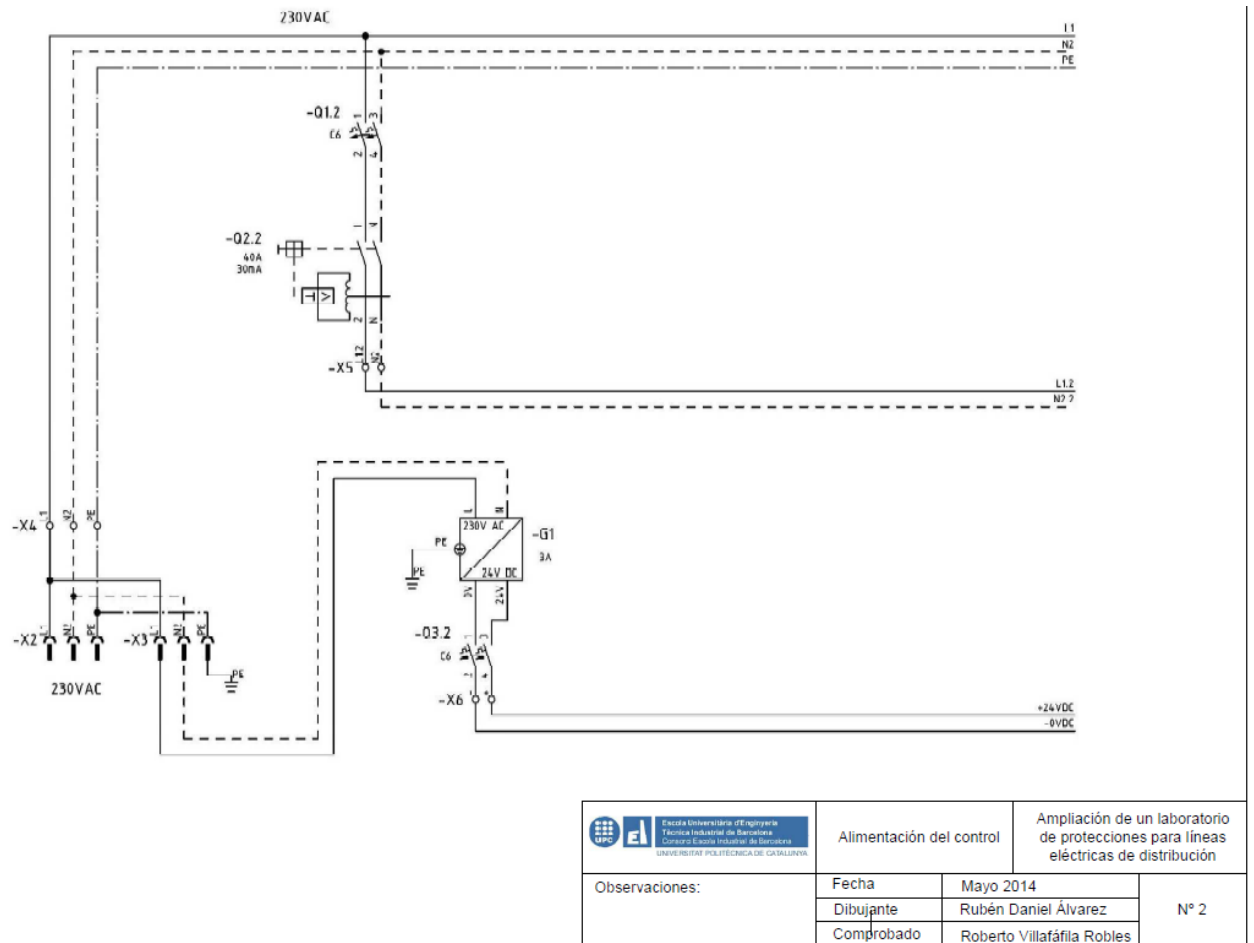


Figura 43: Esquema de la toma monofásica

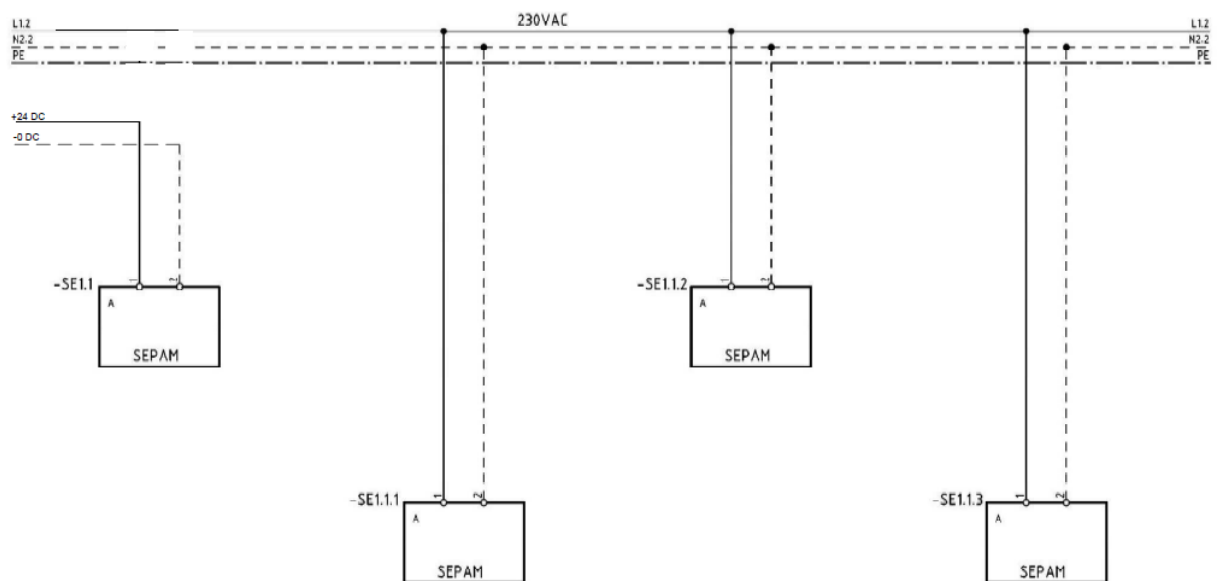


Figura 44: Alimentación de los SEPAM

En la **Figura 43** se aprecian las dos redes para alimentar los SEPAMS, tal y como se ha comentado anteriormente, una de 24 V y la otra de 240V.

El SEPAM de cabecera (SE1.1), está alimentado a una tensión de 24 V en corriente continua (DC), y los otros tres, que son los SEPAMS de cada línea (SE 1.1.1, SE 1.1.2, SE 1.1.3), están alimentados a una tensión de 230 V en corriente alterna (AC).

Módulo de cargas:

Una vez definidos todos los elementos que intervienen en el circuito, tan solo falta por ver como se emulan los diferentes defectos en la red. Esto se hace a través del módulo de cargas.

Este aparato consiste en una tabla que contiene 27 bombillas. Estas bombillas están conectadas a través de cableado de tal manera que quedan distribuidas en las tres líneas, es decir, en cada línea 9 bombillas, y 3 conectadas a cada fase de la línea.

El objetivo de tener esta distribución de bombillas es la posibilidad de dar una carga diferente en una línea, por lo tanto, depende de cuántas bombillas estén conectadas al circuito se tendrá una carga u otra.

- 3 bombillas iluminadas emulan una carga nominal en la línea.
- 6 bombillas iluminadas emulan una sobrecarga en la línea.
- 9 bombillas iluminadas emulan un cortocircuito en la línea.

La idea reside en que, al tener 3 bombillas conectadas a cada fase de una línea, si el usuario conecta los 3 contactores (1 por cada fase), se encenderán 9 bombillas, lo que producirá un aumento de carga excesivo que provocará un cortocircuito. En cambio, si el usuario desea provocar una sobrecarga, conectará solo 2 contactores, de manera que se iluminen 6 bombillas. Del mismo modo, para emular la carga

nominal solo tendrá que conectar un contactor.

PLC (Autómata)

El laboratorio incorpora un autómata programable (PLC) de la marca Schneider. Permite supervisar y operar el laboratorio mediante un ordenador con la interfaz SCADA.

Sin este dispositivo no sería posible realizar las simulaciones, puesto que los alumnos realizan las prácticas a través del ordenador, dónde programan los elementos de protección (SEPA) escogiendo criterios de selectividad según la actividad, y realizan pruebas jugando con los contactores para simular los defectos.

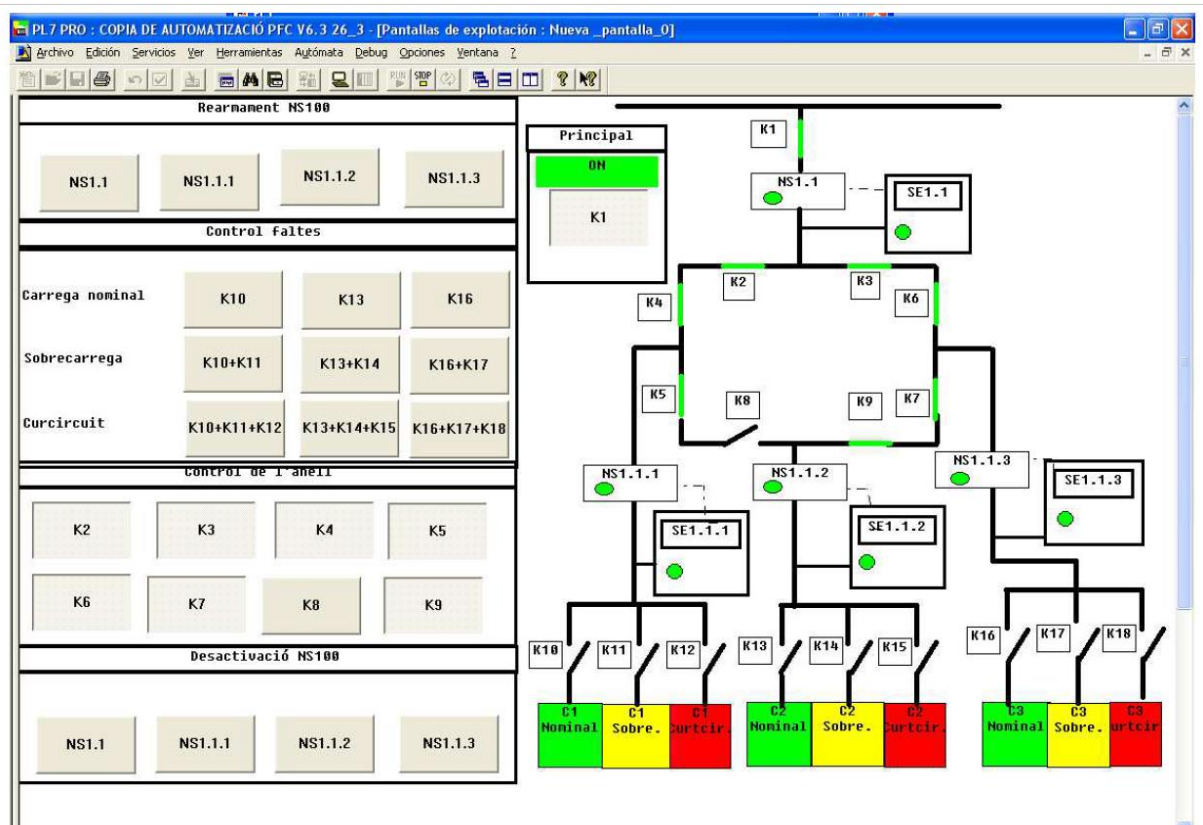


Figura 45: Pantalla de explotación

Esta es la pantalla mediante la cual los alumnos realizan las prácticas, controlando que contactores abrir o cerrar, etc.

Módulos de comunicación

Aunque el proyecto no tratará estos módulos, se mencionan en este apartado.

El laboratorio incorpora diferentes módulos de comunicación:

- ACE949
- ACE850TP
- ECI850

Son los encargados de traducir la información que suministran los SEPAMS a la norma IEC61850.

4. Reestructuración conceptual del laboratorio

Una vez visto y entendido el funcionamiento del laboratorio actual, se puede llevar a cabo la reestructuración conceptual.

Recapitulando, el objetivo inicial del proyecto era separar el laboratorio en 4 maletas portátiles para solucionar problemas de espacio y accesibilidad, de tal manera que en las prácticas en el laboratorio se pudiera separar a los alumnos por grupos y poder realizarlas de manera más pragmática.

Se decidió dividirlo en 4 maletas, porque el circuito se puede descomponer en 4 partes que tienen esquemas eléctricos muy semejantes, la parte de la red que se le ha denominado en el proyecto como cabecera, y las 3 líneas que derivan del anillo. Pese a la reestructuración, el nuevo laboratorio que se intenta conseguir tiene que tener la misma funcionalidad que el actual, simplemente el proyecto consiste en que se pueda desplazar.

Tal y como se explicará más adelante, solamente se ha realizado la estructuración de una de las maletas, y esa maleta corresponde a una de las líneas que derivan del anillo.

4.1. Componentes de una maleta

En este apartado se describen todos los elementos que se tendrán que incorporar en una maleta para garantizar su correcto funcionamiento y las piezas que se utilizarán.

4.1.1. Conexión al cuadro trifásico

Puesto que se trabaja con una red trifásica, ya que se emula una red de distribución, la maleta se tendrá que poder enchufar mediante un cable trifásico.

Primeramente, para realizar esta conexión, el laboratorio ya dispone de cuadros trifásicos ubicados en la pared.



Figura 46: Cuadro trifásico Schneider.

Como no se pudo acceder al laboratorio, no se dispone de fotografías de los cuadros trifásicos ubicados en él, así que se han adjuntado éstas de ejemplo.

Los 5 polos que aparecen en el conector corresponden a las tres fases, neutro y conductor de protección.

El conductor de protección no se ha definido anteriormente, ya que su utilización no se encuentra en todos los circuitos. En el caso del laboratorio sí que se utiliza, así que en esta reestructura deberá estar. Es un conductor que en condiciones normales no conduce corriente y su función es garantizar la seguridad de las personas al tocar la maleta, para que no haya problemas al tocarla, al ser metálica.

La conexión con este tipo de enchufe obviamente no se puede realizar con un cable doméstico monofásico, se realiza a través de un dispositivo llamado CETAC.



Figura 47: CETAC trifásico. Fuente bibliográfica [26]

Una vez conocido el tipo de conector que se debe utilizar al cuadro, la maleta debe ser capaz de conectarse mediante un cable con un extremo con CETAC.

Para realizar la conexión se utilizará una manguera trifásica. Esta manguera dispondrá de un extremo con el conector CETAC recién descrito, que se conectará al cuadro trifásico de la pared.



Figura 48: Manguera trifásica con CETAC en el extremo. Fuente bibliográfica [27]

En la entrada de la maleta se colocará una bornera, o también llamada regleta, de entrada. A esta bornera habrá que conectar la manguera por el otro extremo. Por lo tanto, un extremo de la manguera, estará abierto sin aislante para conectar los

cables de dentro de la manguera a la bornera.

En la figura mostrada, los dos extremos disponen de conectores, pero en el caso del proyecto, se utilizará el circuito abierto en un extremo tal y como se ha comentado, para poder conectarlo a la regleta.

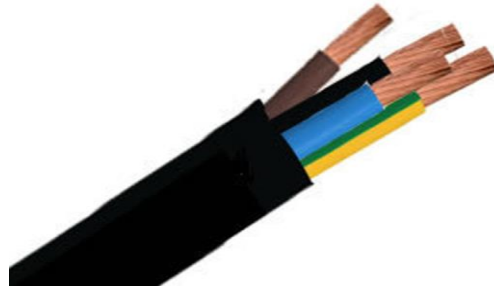


Figura 49: Cable trifásico con extremo abierto. Fuente bibliográfica [28]

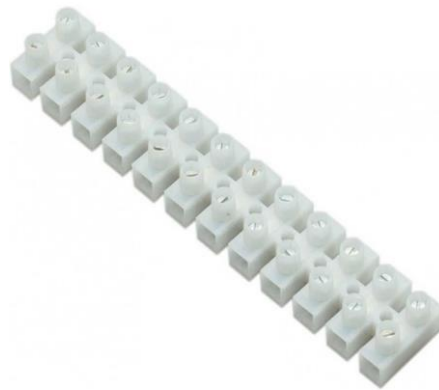


Figura 50: Regleta (bornera). Fuente bibliográfica [30]

Como se puede ver en la **Figura 49**, dentro de la manguera habrán 5 cables, que tal cómo se ha comentado corresponden a tres fases, neutro y conductor de protección.

Para realizar el cableado de la manguera con la bornera, se decidió que se haría de tal manera que maleta y manguera quedarán juntas, es decir, la manguera solidaria a la maleta. Por lo tanto, cuando se necesite utilizar la maleta, sencillamente se tendrá que transportar junto a la manguera, y buscar un cuadro trifásico para poder

conectar el CETAC.

Es cierto que se puede diseñar de tal manera que la manguera y la maleta no sean solidarias, es decir, mediante un enchufe en la maleta para poderlo desenchufar o enchufar cada vez que se quisiese utilizar.

Aunque es una opción válida y sería lo mismo en términos eléctricos, a nivel de dimensiones de la maleta y simplicidad de diseño sería menos pragmático, puesto que es mucho menos complejo conectar los cables directamente a la bornera.

Una vez realizado esto, ya se daría por terminada dicha conexión.

4.1.2. Relé de protección (SEPAM) e interruptor automático

Tal y como se ha visto en el apartado (3.3 *Elementos que componen el laboratorio*), cada línea que deriva del anillo dispone de un relé de protección y su correspondiente interruptor automático para detectar e intervenir en los diferentes defectos que simule el alumno. Por lo tanto, cada maleta deberá de disponer de ambos elementos, el relé para detectar el defecto y el interruptor para cortar el flujo de corriente.

Los SEPAMS del laboratorio se alimentan por monofásico, así pues, el SEPAM situado en la maleta tiene que alimentarse de la misma manera.

Para ello, se podría conectar la maleta mediante un cable monofásico a un enchufe monofásico del laboratorio, y de esta manera hacer llegar al SEPAM una tensión de 230 V.

Pero en vez de conectar este cable, es mucho más práctico conseguir esta alimentación monofásica a partir de la trifásica que entra a la maleta mediante la manguera. Para esto, se hace un puente en la regleta de entrada para duplicar una de las fases y el neutro, y de esta manera se realiza el cableado a esta fase y el neutro, obteniendo así la alimentación monofásica del SEPAM.

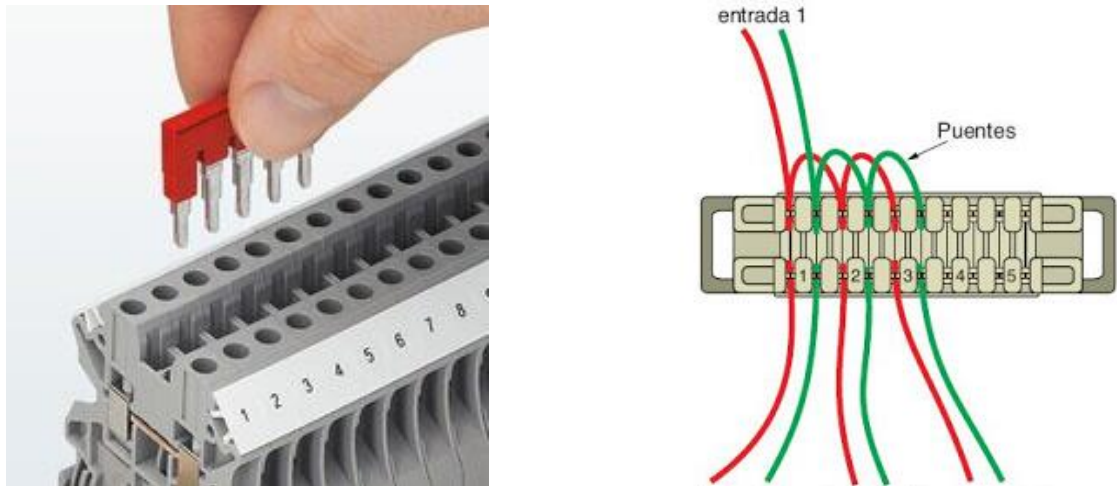


Figura 51 y 52: Puentes eléctricos. Fuente bibliográfica [31] y [32]

En las figuras se aprecian diferentes formas de realizar un puente, mediante cables cortos que unen dos puntos de la regleta o mediante aparatos como el de la figura de la izquierda. Gracias a los avances tecnológicos cada vez hay más maneras de realizar puentes.

Tras realizar el puente y conectar el relé a una fase y neutro, ya estaría funcionando el flujo en el circuito y el relé en cuanto se conecta la maleta al cuadro trifásico.

4.1.3. Conexión al módulo de cargas

Respecto a la estructuración funcional de una maleta, solo faltaría la conexión al módulo de cargas. Cómo en este proyecto no se incorpora la sustitución del módulo de cargas y, por lo tanto, la eliminación de este, la maleta tendrá que estar conectada mediante cable al módulo de cargas. Esto impedirá transportar la maleta más lejos de la longitud del cable, pero se conseguirá solucionar eliminando el módulo de cargas en futuras ampliaciones, tal y como se explicará en el apartado (5. *Futuras Ampliaciones*).

Mientras no se lleva a cabo dicha ampliación, el módulo de cargas seguirá existiendo y por lo tanto hay que incorporar a la maleta una salida para poder

conectarlo. De esta manera los alumnos podrán seguir realizando prácticas con total normalidad.

La maleta, por tanto, debe disponer de una salida para realizar dicha conexión. Una vez más se realizará la conexión mediante cableado a borneras.

En este caso, se realizará desde la bornera de salida de la maleta hasta el módulo de cargas. Obviamente este cableado deberá ser trifásico. Respecto al módulo de cargas, no hace falta realizar ninguna variación, puesto que le estaría llegando exactamente lo mismo que le llegaba en el laboratorio actual.

4.1.4. Transformador trifásico

Otro elemento que hay que añadir en la maleta es un transformador trifásico, y es que las bombillas son de 230 V, y en caso de realizar el cableado comentado en el apartado anterior, estarían recibiendo 400 V, porque están puestas en triángulo.

Así pues, es necesario colocar un transformador trifásico que reduzca la tensión de 400 V a 230 V.

Aquí se produce un inconveniente en lo que viene a ser el objetivo del proyecto, que pretendía también economizar el espacio y simplificar el circuito. El problema reside en que antes de realizar la separación en maletas, solo había un transformador aguas arriba del anillo que reducía la tensión de 400 V a 230 V, y por tanto no era necesario colocar un transformador en cada una de las tres líneas que derivaban del anillo.

En cambio, en el caso tratado, será necesario añadir a la entrada de la maleta el transformador trifásico, por lo tanto se necesitará un transformador para cada maleta.

Se considera que quizá no es el diseño óptimo, y se podría optimizar en futuras ampliaciones.

4.1.5. Magnetotérmico trifásico

Se ha visto en el apartado (3.3 *Elementos que componen el laboratorio*), que cada línea que deriva del anillo dispone de un interruptor magnetotérmico trifásico, que no forma parte del sistema de protección ante la simulación de los defectos. Es sencillamente por seguridad.

Por lo tanto, estos elementos también deberán incorporarse en cada maleta.



Figura 53: Interruptor magnetotérmico trifásico Schneider. Fuente bibliográfica [34]

4.1.6. Conexión entre maletas

Con los componentes que se han incluido en la maleta hasta ahora, ya sería suficiente para que la maleta funcionará de manera individual.

Ahora falta poder conectar la maleta con otra maleta para poder emular el anillo y tener definitivamente el circuito completo. Para ello, simplemente se realizará otro puente en la misma regleta de la entrada trifásica de la maleta, y actuará como salida. En la regleta, antes de hacer el puente, hay 5 componentes de entrada (las 3 fases, el neutro y el conductor de protección), además de la fase y el neutro duplicado que se ha realizado anteriormente mediante el puente para conseguir la alimentación monofásica.

Por lo tanto este nuevo puente tendrá que duplicar estos 5 componentes (las 3 fases, el neutro y el conductor de protección). Una vez hecho el puente, mediante cableado se unirán estos 5 componentes con los de la otra maleta, y de esta manera tener así las maletas conectadas en paralelo y formar así el anillo.

La parte del puente estará vacía si no se quisiera conectar otra maleta.

El objetivo de poder conectar las maletas entre sí es para que el alumnado pueda realizar la coordinación de las diferentes protecciones de las maletas, como se ha explicado en el apartado (2.5.1 *Parámetros de protecciones*), la selectividad.

Para que se pueda realizar la experimentación de dicha coordinación de protecciones, es necesario poder comunicar los SEPAMS a través del puerto de Ethernet. La conexión del cable de Ethernet en el caso del SEPAM S80 puede ir directamente al relé, pero es importante mencionar que no todos los SEPAM que hay en el laboratorio tienen el puerto de Ethernet frontal. Más adelante, en el apartado de adaptaciones se explicará con más detalle.

4.2. Esquema eléctrico

Se ha realizado el esquema eléctrico de una maleta que deriva del anillo, y en este apartado se adjuntará el esquema con su correspondiente explicación.

Para entender el esquema, se describe a continuación la notación.

Elementos	
Q.1	Magnetotérmico trifásico
T.1	Transformador de tensión trifásico 400 V / 230 V
NS.1	Interruptor automático trifásico con rearme
T.I.1	Transformador de intensidad fase 1 40/5
T.I.2	Transformador de intensidad fase 2 40/5
T.I.3	Transformador de intensidad fase 3 40/5
Q.1.1	Magnetotérmico monofásico alimentación 230 V AC
Q.2.1	Interruptor diferencial monofásico alimentación 230 V AC, 40 A, 30 mA

Tabla 1: Notación de los elementos

Se han utilizado los mismos elementos con las mismas características que ya estaban en el laboratorio.

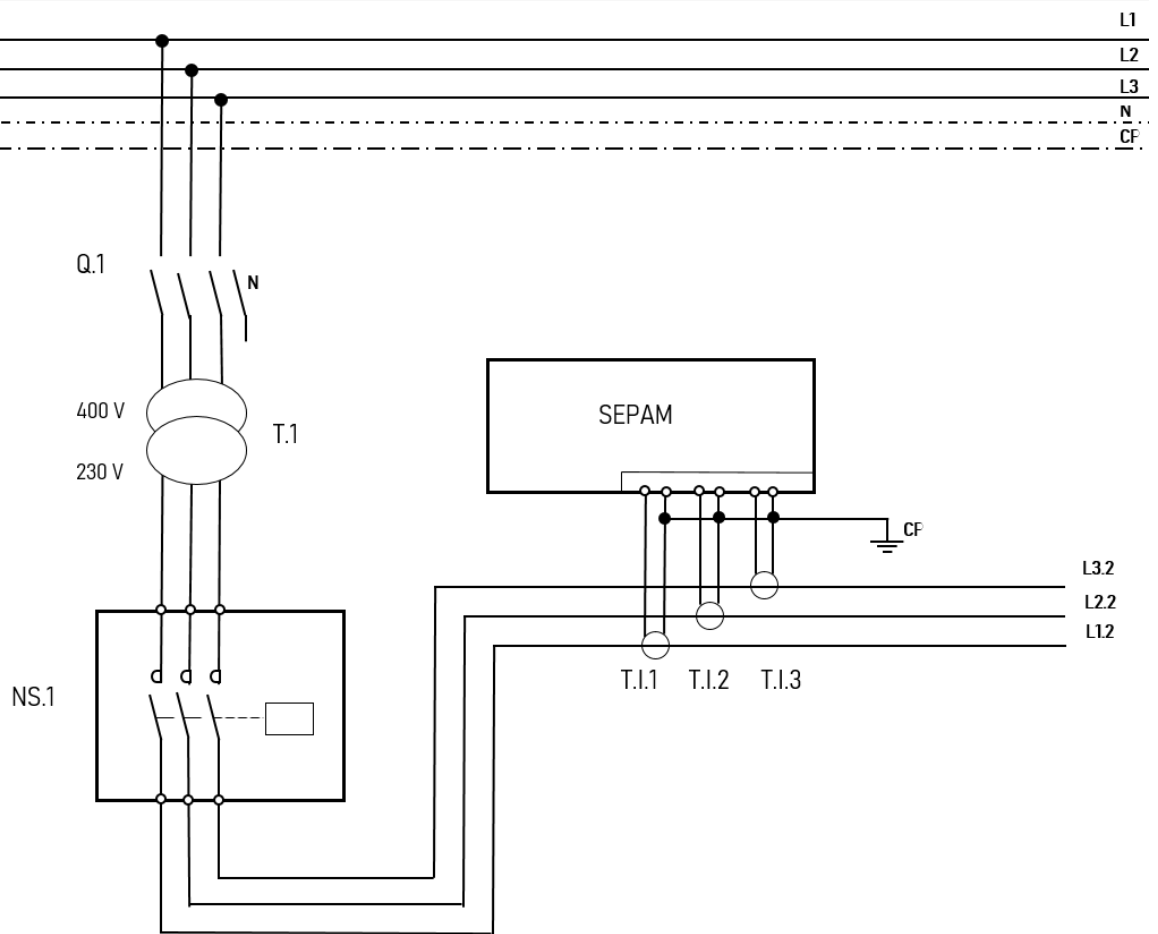


Figura 54: Esquema eléctrico del circuito trifásico por el interior de la maleta.

Como se aprecia en el esquema, la red trifásica entra a la maleta y pasa por un magnetotérmico trifásico, para garantizar la seguridad. Seguidamente pasa por un transformador, que reduce la tensión de 400 V a 230 V, para que cuando se conecte la salida de la maleta al módulo de cargas el funcionamiento sea el correcto.

Más adelante se encuentra situado el interruptor automático junto al relé (SEPAM). Tal como se ha explicado, estos dos dispositivos serán los encargados de detectar los defectos provocados por el alumno y actuar cuando sea necesario.

Una vez la red pasa por todos estos elementos, saldrá de la maleta y se conectará al módulo de cargas.

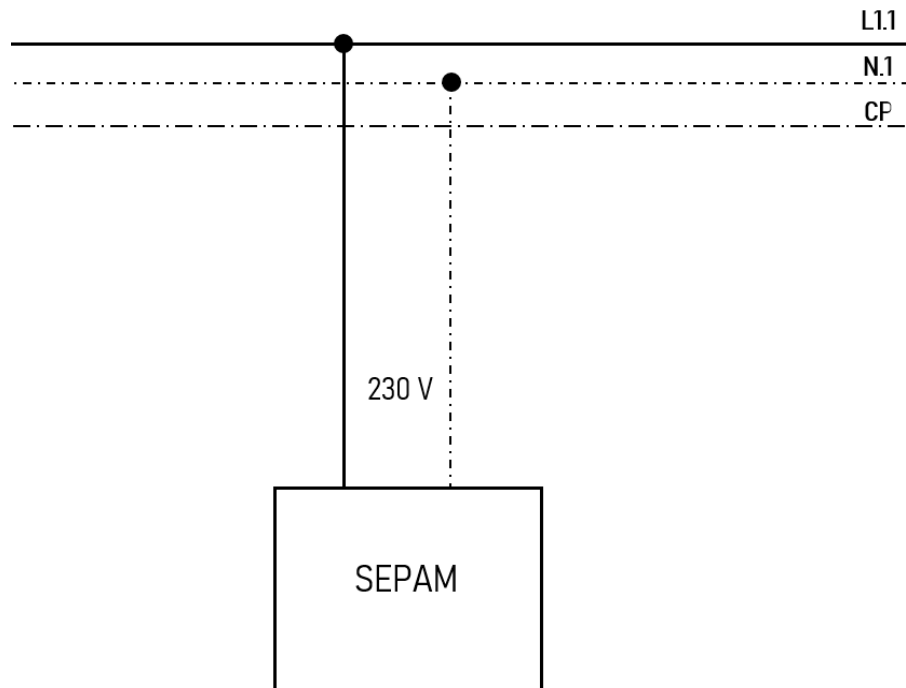


Figura 55: Esquema de la alimentación monofásica del SEPAM

El SEPAM se alimenta por red monofásica, por tanto se conecta a una fase (L1.1) y el neutro (N.1).

Este esquema eléctrico cambiará en el apartado de adaptaciones para la maleta de cabecera.

4.3. Parte física de la maleta

Como ya se ha comentado, por motivos de excepcionalidad, solo se ha considerado hacer la estructura conceptual de una maleta, y más adelante en el apartado de adaptaciones se explicará que modificaciones habría que hacer en el resto de maletas.

Respecto a la parte física de las maletas, existen actualmente muchas maletas estándares de diferentes proveedores, maletas de relés de protección. En este proyecto no se realiza el diseño de la maleta, exclusivamente la estructura conceptual de ésta. Aun así, se considera útil de cara al lector poder ver cómo es una maleta en la realidad.

Es imprescindible que la maleta sea de unas dimensiones dónde quepa el relé de protección (SEPAM S80), que será el elemento de más volumen que habrá que introducir. Además, tiene que caber todo el cableado y el interruptor magnetotérmico, el interruptor (NS100) y el transformador de tensión. Normalmente, en las maletas estándares que ofrecen los diversos proveedores, el relé de protección tiene la pantalla fuera, es decir, el relé por dentro y la pantalla del mismo por fuera. De ésta manera el usuario puede ver lo que indica el relé.

También están por fuera diferentes botones y Leds para que el usuario pueda operar desde la maleta. En este proyecto no será posible, pero tal como se verá en el apartado (5. *Futuras Ampliaciones*), es el objetivo a largo plazo.

El resto de dispositivos y el cableado va cubierto y dentro de la maleta, de manera que no esté a la vista de las personas, por protección.

A continuación, se adjuntan diferentes maletas estándares de diferentes proveedores.



Figura 56: Maleta SEPAM S80. Fuente bibliográfica [1]



Figura 57: Maleta PTE-50-CE. Fuente bibliográfica [37]

Actualmente en el laboratorio se dispone de la maleta mostrada en la **Figura 56**.

Se adjunta a continuación las medidas del relé de protección SEPAM S80, que debe estar incrustado en la maleta.

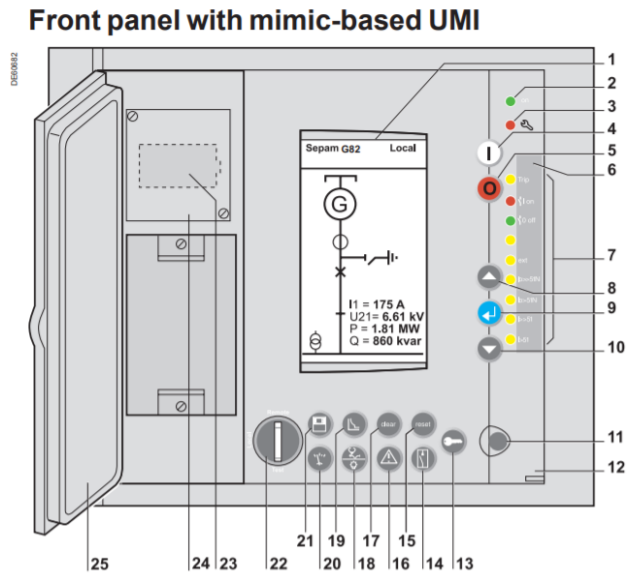


Figura 58: Vista frontal SEPAM S80. Fuente bibliográfica [43]

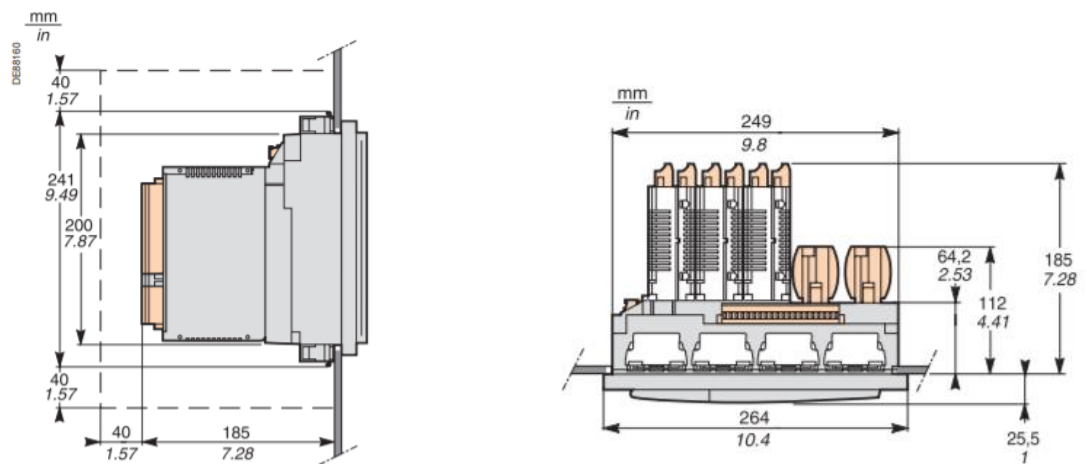


Figura 59 y 60: Vista frontal y desde arriba SEPAM S80. Fuente bibliográfica [43]

Por lo tanto, se tendría que tener una maleta, tal como mostrada en las figuras, de tal manera que el SEPAM S80 estuviera incrustado, respetando las medidas de éste.

Respecto a las otras maletas, cada una tendría que tener incrustado su SEPAM correspondiente, ya que en el laboratorio no todos son iguales. Pero la maleta tendría que ser de unas dimensiones prácticamente idénticas, ya que los SEPAMS no varían mucho de dimensiones entre series, y el resto de dispositivos son los mismos para todas las maletas que derivan del anillo. La maleta de cabecera sería un poco diferente, tal y como se verá a continuación.

4.4. Adaptaciones para las otras maletas

Como solamente se ha realizado el diseño conceptual de una de las maletas, y esta maleta corresponde a una de las tres líneas que derivan del anillo en el laboratorio actual, en este apartado se pretende presentar qué modificaciones se tendrían que hacer en el resto de maletas. No se pretende entrar a analizar de manera profunda los cambios pero sí mencionar los más importantes.

4.4.1. Al resto de maletas que derivan del anillo

Estas serán las adaptaciones más sencillas respecto a la maleta que se ha trabajado. Y es que el circuito eléctrico de las otras dos restantes será casi igual, puesto que las tres maletas derivan de un punto de la red trifásica en común y la salida va a parar a un módulo de cargas, que es el mismo en las tres líneas. Lo único que habría que incorporar en una de las maletas eléctricamente hablando es un transformador de tensión de 230 V AC a 24 V DC, puesto que hay un SEPAM que se alimenta a 24 V.

Lo que sí que cambiará y será muy importante a tener en cuenta, es que tal y como se ha mencionado anteriormente, no todos los SEPAM tienen el puerto de Ethernet frontal, por lo tanto no se realizará de la misma manera el cableado. En la maleta

que tiene el SEPAM el cual no dispone del puerto, habrá que realizar la siguiente modificación.

El SEPAM necesitará unas cajas, que actúan como conversores de un protocolo al protocolo de Ethernet. Estas cajas no se estudian en este proyecto, pero sí que hay que tenerlas en cuenta de cara a futuras ampliaciones, puesto que las cajas estarían dentro de la maleta y por lo tanto la estructura física sería distinta.

4.4.2. A la de cabecera

Respecto a esta maleta, habría que realizar una serie de cambios. Hay que recordar que a esta maleta no se le unirá a su salida el módulo de cargas.

Habría que realizar dos cambios en esta maleta, uno es sencillamente no conectar en la bornera de salida el módulo de cargas.

Respecto al otro cambio, anteriormente se ha visto que la alimentación del SEPAM de cada maleta es monofásica. Lo cierto es que en el laboratorio actual, antes de que la red monofásica llegue al SEPAM se dispone de un interruptor magnetotérmico y un interruptor diferencial, por seguridad.



Figura 61: Interruptor diferencial Schneider. Fuente bibliográfica [6]



Figura 62: Magnetotérmico monofásico Schneider. Fuente bibliográfica [35]

Para no tener que poner estos dispositivos en cada maleta, se decidió ponerlo solo en la maleta de cabecera. De ésta manera se ahorraría espacio en las maletas restantes y lo único que habría que hacer es cablear la salida monofásica de la bornera de salida de la maleta de cabecera a la regleta de entrada de las otras maletas.

El único inconveniente de hacerlo de este modo es que las otras maletas no podrían enchufarse al cuadro trifásico sin estar conectadas a la maleta de cabecera, por cuestiones de seguridad.

El esquema eléctrico de la alimentación del SEPAM de cabecera es el siguiente.

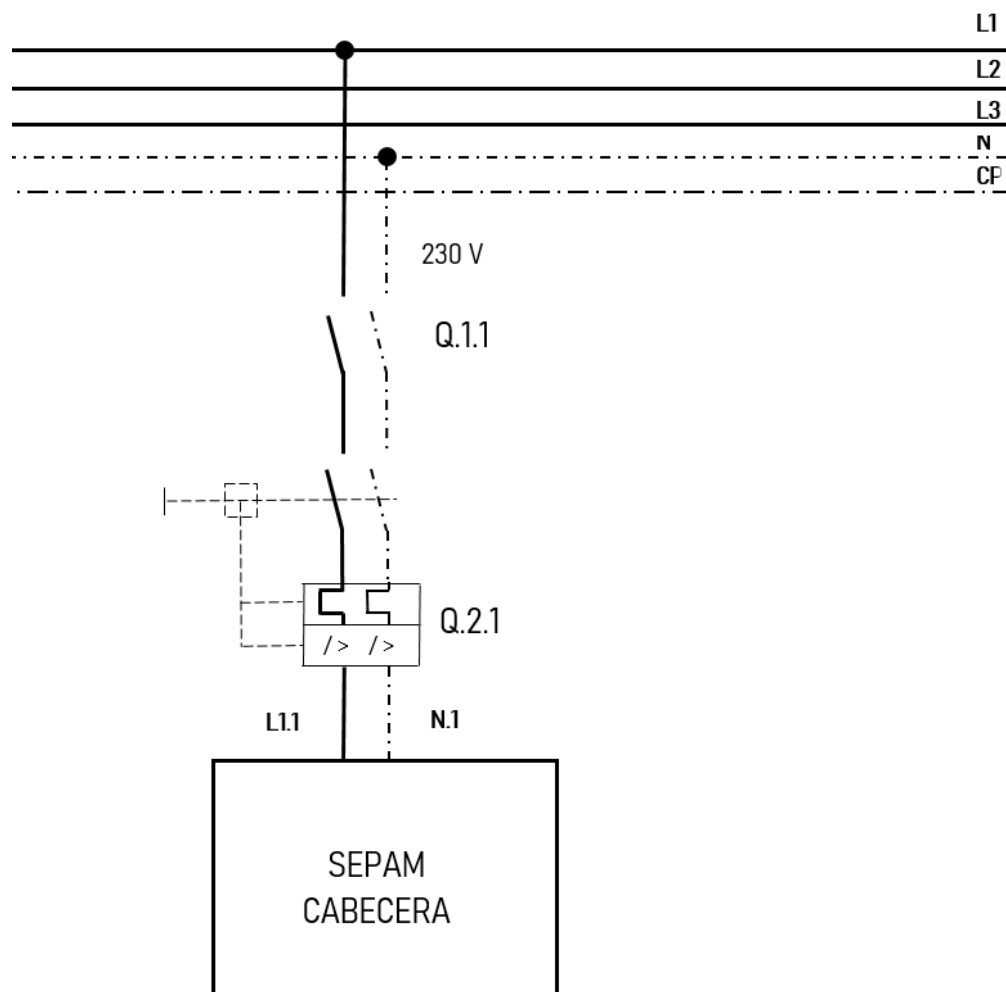


Figura 63: Esquema eléctrico de la alimentación del SEPAM de cabecera

4.5. Ordenador y módulo de cargas

Respecto al ordenador, existe todo un proceso de automatización para simular los defectos, tal como se ha visto, en una interfaz. Uno de los objetivos a largo plazo es quitarlo y que se pueda realizar su función en las maletas. Pero en esta primera evolución del proyecto no se modifica y se deja tal y como está. Así pues, los alumnos deberán simular los defectos desde dicho ordenador.

Con el módulo de cargas ocurre lo mismo, el objetivo a largo plazo también es quitarlo.

Por lo tanto, de momento las maletas deberán conectarse al armario, así que no habrá desaparecido del todo, aunque ya se tendrá la mayor parte del laboratorio en maletas transportables.

4.6. Selectividad

Las prácticas que se realizan en el laboratorio consisten en que el alumno se familiarice con los elementos que hay y especialmente en simular defectos y a su vez coordinar las protecciones para ver cómo actúan. Esto es decidir la selectividad.

Hay muchas formas de optimizar la selectividad, es complicado encontrar la más óptima, puesto que depende de muchos parámetros y del tipo de topología, pero por general las mejores aproximaciones a la selectividad óptima se realizan mediante programación lineal.

No es el objetivo encontrar la selectividad óptima mediante cálculos, sino que el objetivo es que el alumno haga pruebas con diferentes tipos de selectividad, eligiendo valores y viendo así como se comportan las protecciones.

En las prácticas, lo ideal sería empezar por introducir al alumno la selectividad amperimétrica, ya que es la más fácil de entender puesto que solo se trata de diferenciar por nivel de intensidad el relé de cabecera con los otros tres. Hay que tener en cuenta que para las líneas que derivan del anillo:

- 3 bombillas iluminadas corresponde a la carga nominal.
- 6 bombillas iluminadas corresponde a una sobrecarga.
- 9 bombillas iluminadas corresponde a un cortocircuito.

Para la de cabecera:

- 18 bombillas iluminadas corresponde a una sobrecarga.
- 27 bombillas iluminadas corresponde a un cortocircuito.

Está claro que el SEPAM de cabecera actuará con niveles de intensidad más altos.

Una vez el alumno entiende la selectividad por niveles de intensidad, se le puede introducir la cronométrica. Aquí deberá experimentar con diferentes tiempos de actuación para el relé de cabecera y para los otros tres.

Finalmente, el alumno puede coordinar las protecciones cambiando la actuación en tiempo definido por curvas de actuaciones inversas. De esta manera podrá ver que cuanta más intensidad circula a partir de la intensidad de fallo, más rápido actuarán los relés.

Por lo tanto, el sistema de coordinación de protecciones no tiene que diferir del que se estaba realizando hasta ahora.

5. Futuras ampliaciones

En este proyecto, se ha hecho una primera evolución, lo más pragmática posible en la situación de excepcionalidad, que ha sido un paso hacia el objetivo a largo plazo que se quiere conseguir respecto al laboratorio. En consecuencia, en este apartado se presentarán las futuras ampliaciones que habría que realizar en el proyecto para cumplir dichos objetivos.

- Realizar el esquema eléctrico y la estructura conceptual de la maleta de cabecera, puesto que solo se ha realizado para una de las líneas que derivan del anillo.
- Realizar el diseño físico de las maletas con los elementos que tienen que llevar, que son los que se han descrito.
- Implementar las modificaciones explicadas en el apartado de adaptaciones para disponer de la estructura conceptual de todas las maletas.
- Introducir en el proyecto el sistema de comunicaciones entre las coordinaciones de protección.
- Eliminar el módulo de cargas, y sustituir su función mediante la adición de divisores de corriente y de tensión en el circuito en el interior de las maletas. Actualmente, hay maletas Schneider dónde no es necesario tener que conectar y desconectar cargas para producir diferentes corrientes y provocar defectos.
- Eliminar el ordenador para simular los defectos. Otro de los objetivos a largo plazo es que los alumnos puedan configurar los relés y simular los defectos exclusivamente en las maletas. En cuyo caso, habría que realizar cambios en la estructura conceptual de la maleta de este proyecto, puesto que por ejemplo no debería necesitar cableado al módulo de cargas.
- Realizar una modificación en la estructura para que todas las maletas puedan actuar como la de cabecera, y viceversa.

6. Presupuesto

Puesto que exclusivamente se ha realizado la reestructuración conceptual de una maleta, en ningún caso se ha hablado de los materiales o elementos específicos y sus características para incorporar en el laboratorio, solo se puede realizar un presupuesto de las horas dedicadas al proyecto.

Se han realizado aproximadamente 280 h de trabajo de investigación para este proyecto, a 15 €/h:

$$280 \text{ h} * 15 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 4200 \text{ €}$$

Conclusiones

Para finalizar el proyecto, se repasará el objetivo principal y se explicarán los resultados.

El objetivo principal del proyecto era reestructurar un laboratorio ubicado en un armario, separándolo en 4 maletas portátiles para mejorar la accesibilidad y la docencia.

A los pocos días de empezar el proyecto, empezó el estado de alarma y la situación provocada por el Covid-19. Eso impidió el contacto con el laboratorio. Además, limitó mucho la comunicación con el director del trabajo, así como la realización de éste.

Por lo tanto, se decidió centrarse exclusivamente en realizar una reestructuración conceptual de una de las maletas y así dar un pequeño paso hacia el objetivo final.

Se convirtió en un trabajo de investigación por parte del autor, ya que fue imposible la realización de la parte física.

Se puede considerar este proyecto como una primera evolución, lo más pragmática posible en la situación de excepcionalidad, en el que el laboratorio no se ha reestructurado completamente, ya que el módulo de cargas y el autómatas seguirán ubicados en el armario, por lo tanto habrá que cablear todavía con éste. Sí que se habrá conseguido ubicar los relés e interruptores fuera del armario. Por lo tanto, en esta evolución no desaparece el armario completamente.

Pese a ello, se han introducido los esquemas eléctricos del circuito que habría que introducir en una maleta, así como los elementos que debería contener la maleta.

Respecto a lo personal, me gustaría añadir que mi conocimiento en el campo eléctrico al inicio del proyecto era prácticamente nulo, y fue una de las motivaciones personales por las que decidí emprender este proyecto, puesto que considero que la eléctrica es un tema importante del que se trabaja más bien poco en las ingenierías.

Ha sido realmente complicado llevar a cabo toda la investigación, ya que ha sido un trabajo exclusivamente teórico sin poder tener contacto con el laboratorio, aspecto que ha complicado mucho la realización del proyecto.

Aun así, he podido ampliar en una medida muy grande mi conocimiento respecto al funcionamiento de las redes de distribución, los defectos, las protecciones, los esquemas eléctricos, etc.

Me hubiera gustado poder realizar el proyecto en el ámbito más práctico y poder realizar el diseño de las maletas. En resumen, ha sido un proyecto diferente por la situación vivida, pero que me ha abierto una nueva rama de conocimiento.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Roberto Villafáfila, director del proyecto, por darme la oportunidad de realizarlo y por facilitarme información y acceso a diferentes datos relevantes para el proyecto. También por reunirse conmigo a través de video llamada en esta situación tan complicada de estado de alarma que hemos vivido.

También me gustaría agradecer el apoyo que me ha dado mi familia, puesto que ha habido momentos de estrés y de mucha dificultad en la realización de este proyecto y me han apoyado en todo momento.

Bibliografía

- [1] Ampliación de un laboratorio de protecciones eléctricas en líneas de distribución (Autor: Rubén Daniel Álvarez Muñoz) [\[https://upcommons.upc.edu/\]](https://upcommons.upc.edu/)
- [2] Cuaderno Técnico nº 141: Las perturbaciones eléctricas en BT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [3] Cuaderno Técnico nº 155: Las redes de distribución pública de MT en el mundo [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [4] Cuaderno Técnico nº 167: La selectividad energética BT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [5] Cuaderno Técnico nº 193: Las técnicas de corte en MT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [6] Centro de Formación Schneider: Protecciones eléctricas en MT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [7] Centro de Formación Schneider: Centros de Transformación MT/BT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [8] Cuaderno Técnico nº 201: Selectividad con los interruptores automáticos de potencia BT [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)
- [9] Electrical Power Systems (P.S.R Murty)
- [10] Fault Diagnosis on Medium Voltage (MV) Electric Power Distribution Networks: The Case of the Downstream Network of the AES-SONEL Ngouso Sub-Station. (Thomas Tamo Tatié, Joseph Voufo) [\[https://www.researchgate.net/publication/26614198_Fault_Diagnosis_on_Medium_Voltage_MV_Electric_Power_Distribution_Networks_The_Case_of_the_Downstream_Network_of_the_AES-SONEL_Ngouso_Sub-Station\]](https://www.researchgate.net/publication/26614198_Fault_Diagnosis_on_Medium_Voltage_MV_Electric_Power_Distribution_Networks_The_Case_of_the_Downstream_Network_of_the_AES-SONEL_Ngouso_Sub-Station)
- [11] Types of Faults in Electrical Power Systems [\[https://www.electronicshub.org/types-of-faults-in-electrical-power-systems/\]](https://www.electronicshub.org/types-of-faults-in-electrical-power-systems/)

- [12] Electrical Power System Fault Analysis [<https://eie.uonbi.ac.ke/sites/default/files/cae/engineering/eie/ELECTRICAL%20POWER%20SYSTEM%20FAULT%20ANALYSIS.pdf>]
- [13] Use Graphical User Interface NEPLAN to Calculate the Transmission Lines Faults in Power System (Mustafa MahmoodAbd) [<http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD6600.pdf>]
- [14] Protección de instalaciones frente a sobretensiones y sobretensiones [http://www.upv.es/electrica/material_tecno/Transparencias_PDF/T6/tema_6.pdf]
- [15] Desequilibrios y sus consecuencias en los Centros de Transformación [<https://quintoarmonico.es/2009/08/02/desequilibrios-y-sus-consecuencias-en-los-centros-de-transformacion/>]
- [16] Desequilibrios en el sistema trifásico [<https://mecfi.es/equilibrio-trifasico>]
- [17] Asimetría de fases en redes eléctricas [<https://www.contaval.es/asimetria-fases-redes-trifasicas/>]
- [18] Modelo OSI [<https://www.profesionalreview.com/2018/11/22/modelo-osi/>]
- [19] Layers of OSI model [<https://www.geeksforgeeks.org/layers-of-osi-model/>]
- [20] Líneas eléctricas aéreas o subterráneas en una instalación eléctrica [<http://www.comuval.com/blog/lineas-electricas-areas-o-subterranas.html>]
- [21] Distribución de redes aéreas de media y baja tensión [<https://coggle.it/diagram/W9i1i3Gn417qTx6A/t/distribuci%C3%B3n-de-redes-a%C3%A9reas-de-media-y-baja-tensi%C3%B3n>]
- [22] Sistemas de conexión de neutro y de las masas en redes de distribución de energía eléctrica [http://www.f2i2.net/documentos/lsi/rbt/ITC_BT_08.pdf]
- [23] Las 3 reglas esenciales para la selectividad en protecciones diferenciales [<http://circuitor.es/es/documentacion-es/articulos/1226-las-3-reglas-esenciales-para-la-selectividad-en-protecciones-diferenciales>]
- [24] Coordinación de las protecciones BT [<https://download.schneider->

- electric.com/files?&p_File_Name=Coordinacion+de+las+protecciones+del+n+eutro.+La+selectividad.pdf]
- [25] Optimización de la protección eléctrica de la subestación tierra colorada [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2560/IME_192.pdf?sequence=1&isAllowed=y]
- [26] Cetac 63a [<https://www.manomano.es/cat/cetac+63a>]
- [27] Manguera eléctrica trifásica de 32 A [<http://www.alquimat.com/manegues-electriques/?lang=es>]
- [28] Cable trifásico RV-K 4x16 Negro [<https://www.merkasol.com/Cable-Trifasico-RV-K-4x16-Negro>]
- [30] Regleta empalme 16mm² 12 Bornas [<https://distribucioneselectricas.com/regletas-de-conexion/305-regleta-empalme-16mm2-blanca-12-bornas.html>]
- [31] Phoenix contact [https://www.phoenixcontact.com/online/portal/es?1dmy&urile=wcm:path:/eses/web/main/products/subcategory_pages/Screw_connection_P-15-01/db7ba1fe-06e4-4673-b3bc-35cc7888a22a]
- [32] Infraestructuras de comunicación [<http://alvaromendezgarrido.blogspot.com/2011/11/conexion-de-una-linea-de-entrada-y.html>]
- [33] Interruptor automático magnetotérmico [<http://bentz5.blogspot.com/2015/09/interruptor-automatiko-magnetotermico.html>]
- [34] <https://www.electricidad.tienda/automatico-trifasico/automatico-magnetotermico-c-ik60n-3pn-63a-schneider-a9k-24763-2501.html>
- [35] <https://www.electricidad.tienda/automatico-monofasico/automatico-magnetotermico-c-1n-25a-ik60n-schneider-a9k-17625-109.html>
- [36] Interruptor magnetotérmico [<https://www.areatecnologia.com/electricidad/magnetotermico.html>]

- [37] <https://smcint.com/es/product/comprobador-pte-50-ce-pruebas-de-relevador/>
- [38] Laboratorios Remotos: Actualidad y Tendencias Futuras (Ronald Zamora Musa) (Facultad de Ingeniería, Corporación Universidad de la Costa – CUC, Barranquilla, Colombia)
- [39] Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal (Carlos J.Zapata, German E.Mejía)
- [40] Sistemas de laboratorios remotos sobre instrumentación de tiempo real: Aplicación a laboratorios de medida de tensión interfacial. (Jesús Luis Muros Cobos)
- [41] Sistemas de distribución (Autor: Anónimo) [\[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/784/A4%20SISTEMAS%20DE%20DISTRIBUCION.pdf?sequence=4\]](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/784/A4%20SISTEMAS%20DE%20DISTRIBUCION.pdf?sequence=4)
- [42] Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas (Isidro Calvo, Ekaitz Zulueta, Unai Gangoiti, José Manuel López)
- [43] Electrical network protection, Sepam series 20, series 40, series 60, series 80, Digital protection relays (Catalogue 2018) [\[https://www.se.com/es/es/\]](https://www.se.com/es/es/)