Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Estudio del funcionamiento del protocolo *IEC* 60870-5-104 en el entorno ferroviario y de las herramientas existentes para su estudio y desarrollo.

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Autor: Bautista Manzano

Tutor: Isaías Martínez Yelmo

Año 2022

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Estudio del funcionamiento del protocolo *IEC* 60870-5-104 en el entorno ferroviario y de las herramientas existentes para su estudio y desarrollo.

Autor: Bautista Manzano Bravo

Tutor: Isaías Martínez Yelmo

TRIBUNAL:

Presidente: Juan Antonio Carral Pelayo

Vocal 1º: Diego López Pajares

Vocal 2º: Isaías Martínez Yelmo

FECHA: 15 de julio de 2022

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores de la Universidad de Alcalá que han colaborado en mi educación a lo largo de estos años, en especial a Isaías Martínez, por aceptar ser mi tutor para acompañarme y guiarme en esta etapa final.

A mis compañeros de trabajo de Adif, por darme su apoyo en todo momento, en especial a Álvaro González, por su apoyo incondicional para ayudarme a entender el protocolo de comunicaciones utilizado en los sistemas de potencia de las líneas ferroviarias.

A mi mujer, Cristina, por soportarme estos meses duros de trabajo, apoyarme y ser un pilar fundamental en mi vida, y a mis hijas, Alejandra y Aitana, por esos momentos tan divertidos que me habéis dado y que consiguen que uno se olvide de todo.

RESUMEN

En las líneas de trenes de alta velocidad gestionadas por Adif, las subestaciones de tracción son uno de los elementos más importantes de todo el sistema eléctrico. Es fundamental la implementación de un sistema de control y protección óptimo y fiable para mantener un correcto funcionamiento del sistema.

Además, es necesario poder realizar las funciones de monitorización y control de los diferentes elementos que forman parte del sistema eléctrico desde un centro de control remoto haciendo uso del protocolo de comunicaciones *IEC* 60870-5-104.

En el presente trabajo de fin de grado, se explican los diferentes elementos que forman parte del sistema eléctrico y su funcionamiento, el sistema integrado de control distribuido y el programa de control de supervisión y adquisición de datos. Así mismo, se detallan las arquitecturas de redes de comunicaciones utilizadas en las subestaciones de las líneas ferroviarias de alta velocidad gestionadas por Adif y se desarrollan los conceptos básicos del protocolo *IEC* 60870-5-101 y la arquitectura del protocolo *IEC* 60870-5-104, siendo este último una mejora del protocolo *IEC* 60870-5-101 que permite una conectividad a la red mediante *TCP/IP* para poder controlar y supervisar el sistema eléctrico desde un centro de control a distancia.

En última instancia, se realiza una simulación del protocolo *IEC* 60870-5-104 en donde se capturan y analizan los mensajes intercambiados entre una Estación Maestra (*MTU*) y una Estación Remota (*RTU*).

ABSTRACT

On high-speed train lines managed by Adif, traction substations are one of the most important elements of the entire electrical system. It is essential to implement an optimal and reliable control and protection system to maintain the correct operation of the system.

In addition, it is necessary to perform the monitoring and control functions of the different elements that form part of the electrical system from a remote-control centre using the *IEC* 60870-5-104 communications protocol.

This final degree project explains the different elements that form part of the electrical system and how they work, the integrated distributed control system and the supervisory control and data acquisition *software*. It also details the communication network architectures used in the substations of the high-speed railway lines managed by Adif and develops the basic concepts of the *IEC* 60870-5-101 protocol and the architecture of the *IEC* 60870-5-104 protocol, the latter being an improvement of the *IEC* 60870-5-101 protocol that enables connectivity to the network via TCP/IP to control and supervise the electrical system from a remote-control centre.

Ultimately, a simulation of the *IEC* 60870-5-104 protocol is performed where messages exchanged between a master terminal unit (MTU) and a remote terminal unit (RTU) are captured and analysed.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Antecedentes. 1

1.2. Objetivo del Trabajo Fin de Grado. 3

1.3. Estructura del documento. 3

2. ESTADO DEL ARTE 5

2.1. Historia de la electrificación del ferrocarril en España. 5

2.2. Sistemas de electrificación utilizados en líneas AVE. 6

2.3. Equipamiento eléctrico en subestaciones de tracción. 9

2.3.1. Interruptor. 9

2.3.2. Seccionador. 10

2.3.3. Transformador de potencia. 11

2.3.4. Autoválvulas 12

2.3.5. Transformadores de medida y protección. 13

2.4. Sistema Integrado de Control Distribuido en subestaciones y centros de autotransformación en líneas de alta velocidad. 13

2.5. *SCADA*. 14

2.6. Protocolo de comunicación *IEC* 60870-5. 17

2.6.1. Modelos de referencia en sistemas de comunicaciones. 18

2.6.2. Introducción al protocolo *IEC* 60870-5-101. 20

2.6.3. Introducción al protocolo *IEC* 60870-5-104. 25

3. DISEÑO 35

3.1. Redes de comunicaciones en Adif-AV. 35

3.2. Programa de simulación. 36

3.2.1. Pantalla de inicio. 37

3.2.2. Barra de opciones. 39

3.2.3. Configuración inicial del cliente. 42

3.2.4. Configuración inicial del maestro. 43
3.3. Mapeado de *MTU* y *RTU*. 45
3.3.1. Estructura de las tablas de mapeado. 45
3.3.2. Mapeado del cliente. 47
3.3.3. Mapeado del maestro. 47
3.4. Planificación de escenarios. 47
3.4.1. Primer escenario. 48
3.4.2. Segundo escenario. 49
3.4.3. Tercer escenario. 50
4. RESULTADOS 53
4.1. Envío de mensaje *STARTDT*. 53
4.1.1. Diagrama de intercambio de mensajes *STARTDT*. 54
4.1.2. Envío de mensaje de control *STARTDT*. 55
4.1.3. Respuesta al mensaje de control *STARTDT*. 55
4.2. Envío de una señal de interrogación general. 56
4.2.1. Diagrama de intercambio de mensajes al solicitar una interrogación general. 58
4.2.2. Orden de interrogación general. 58
4.2.3. Mensaje de confirmación de interrogación general. 60
4.2.4. Mensaje de información con valor de medida en coma flotante. 61
4.2.5. Mensaje de información de tipo simple. 62
4.2.6. Mensaje de información de tipo doble con marca de tiempo *CP56Time2a*. 64
4.2.7. Mensaje de información de tipo simple con marca de tiempo *CP56Time2a*.65
4.2.8. Mensaje de finalización de interrogación general. 67
4.2.9. Mensaje de reconocimiento con trama S. 68
4.3. Envío de órdenes a un seccionador. 69
4.3.1. Diagrama de intercambio de mensajes de una orden de tipo doble. 70

4.3.2. Orden de apertura de seccionador. 71

4.3.3. Mensaje de confirmación de orden de apertura. 72

4.3.4. Mensaje de información de posición final del seccionador. 73

4.3.5. Mensaje de reconocimiento con trama S. 75

5. CONCLUSIONES 77

6. BIBLIOGRAFÍA 79

Apéndice 1. PRESUPUESTO 81

Apéndice 2. PLANIFICACIÓN TEMPORAL 83

Apéndice 3. TIPOS DE ASDU 85

Apéndice 4. CAUSA DE TRANSMISIÓN 89

Apéndice 5. ELEMENTOS DE INFORMACIÓN 91

Apéndice 6. MAPEADO DEL CLIENTE 93

Apéndice 7. MAPEADO DEL MAESTRO 99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Sistema de corriente alterna 2x25 kV. 1
Figura 2.- Anillo RASE y RLSE dentro de la subestación. [3] 2
Figura 3.- Conexión redes locales del Telemando y RASE con la WAN de Adif. [3] 3
Figura 4.- Sistema 1x25 kV. 7
Figura 5.- Sistema 2x25 kV. 9
Figura 6.- Ventana BaSiDi. 15
Figura 7.- Unifilar SE de Segovia nivel 4. 15
Figura 8.- Ventana alarmas. 16
Figura 9.- Ventana calefacción de agujas. 17
Figura 10.- Relación entre los modelos de referencia OSI, EPA y TCP/IP. 19
Figura 11.- Arquitectura del protocolo de la norma IEC 60870-5-101. 20
Figura 12.- Modo de comunicación balanceado. 21
Figura 13.- Modo de comunicación no balanceado. 21
Figura 14.- Formatos de trama IEC 60870-5-101. [8] 22
Figura 15.- Estructura de una ASDU. [8] 23
Figura 16.- Arquitectura del protocolo IEC 60870-5-104. 26
Figura 17.- Intercambio de datos entre capas en IEC 104. 27
Figura 18.- Formato trama IEC 104. [3] 28
Figura 19.- Campo calificador de estructura variable. [3] 31
Figura 20.- Campo causa de transmisión. [3] 32
Figura 21.- Esquema del sistema completo. 36
Figura 22.- Interconexión de equipos para la simulación. 37
Figura 23.-Pantalla de inicio de la aplicación IEC-Test. 37
Figura 24.- Opciones del menú File de la aplicación IEC-Test. 40
Figura 25.- Opciones del menú Connection de la aplicación IEC-Test. 40
Figura 26.- Opciones del menú Send Data de la aplicación IEC-Test. 40
Figura 27.- Ventana Special Telegrams de la aplicación IEC-Test. 41
Figura 28.- Configuración del cliente en la aplicación IEC-Test. 42
Figura 29.- Configuración del maestro en la aplicación IEC-Test. 44
Figura 30.- Sistema de comunicaciones de Adif simplificado. 47
Figura 31.- Sistema simulado simplificado. 48
Figura 32.- Secuencia de mensajes STARTDT. 49

Figura 33.- Secuencia de mensajes en una solicitud de interrogación general..... 50
Figura 34.- Secuencia de mensajes en una orden de tipo 46. 51
Figura 35.- Secuencia de mensajes STARDT capturados con Wireshark. 54
Figura 36.- Captura Wireshark - Mensaje «STARTDT Act». 55
Figura 37.- Captura Wireshark - Mensaje «STARTDT Con»..... 56
Figura 38.- Captura Wireshark - Mensajes interrogación general..... 57
Figura 39.- Secuencia de mensajes de una solicitud de interrogación general capturados con Wireshark.. 58
Figura 40.- Captura Wireshark - Mensaje de solicitud de interrogación general.. 59
Figura 41.- Captura Wireshark - Mensaje de confirmación de interrogación general. .. 60
Figura 42.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_ME_NC_1.. 61
Figura 43.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_SP_NA_1. 63
Figura 44.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_DP_TB_1. 64
Figura 45.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_SP_TB_1.. 66
Figura 46.- Captura Wireshark - Mensaje de finalización de interrogación general..... 67
Figura 47.- Captura Wireshark - Mensaje de reconocimiento de tramas recibidas en una interrogación general. 69
Figura 48.- Menú contextual de orden tipo doble. 69
Figura 49.- Secuencia de mensajes en la orden de apertura capturados con Wireshark. 70
Figura 50.- Captura Wireshark - Mensaje de orden de apertura. 71
Figura 51.- Captura Wireshark - Mensaje de información de orden ejecutada.. 72
Figura 52.- Captura Wireshark - Mensaje de información de la posición final del seccionador. 73
Figura 53.- Captura Wireshark - Mensaje de reconocimiento de tramas recibidas DC. 75
Figura 54.- Diagrama de Gantt. 83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Campos de la *ASDU*. 29
Tabla 2.- Presupuesto. 81
Tabla 3.- Plan de trabajo. 83
Tabla 4.- Tipos de *ASDU*. 85
Tabla 5.- Códigos de causa de transmisión (*COT*). 89
Tabla 6.- Elementos de información. 91
Tabla 7.- Mapeado del cliente. 93
Tabla 8.- Mapeado del maestro. 99

LISTA DE ACRÓNIMOS

A

Adif: Administrador de infraestructuras ferroviarias.

APCI: Application Protocol Control Information.

APDU: Application Protocol Data Unit.

ASDU: Aplication Service Data Units.

ATF: Autotransformador Final.

ATI: Autotransformador Intermedio.

AVE: Alta Velocidad Española.

B

BaSiDi: Basic Signalling Display.

C

CASDU: Common Address of ASDU.

CCHNE: Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España.

CCO: Centro de Control y Operación.

CFA: Compañía de los Ferrocarriles Andaluces.

COA: Common Address of ASDU.

COT: Cause of Transmission.

CRC: Centro de Regulación y Control.

E

EPA: Enhanced Performance Architecture.

F

FO: Fibra óptica.

G

GI: General Interrogation.

H

HMI: Human-Machine Interface.

I

IEC: International Electrotechnical Commission.

IED: Intelligent Electronic Device.

IOA: Information Objetc Address.

IP: Internet Protocol.

ISO: International Organization for Standardization.

L

LAC: Línea Aérea de Contacto.

LAN: Local Area Network.

LAV: Línea de Alta Velocidad.

LSB: Least Significant Byte.

M

MSB: Most Significant Byte.

MTU: Master Terminal Unit.

MZA: Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante.

O

OSI: Open Systems Interconnection.

P

P/N: Positive/Negative

PLC: Programmable Logic Controller.

POL: Puesto de Operación Local.

PRO: Puesto Regional de Operación.

R

RA: Red de Área.

RASE: Red de Área Local de Subestación.

RENFE: Red Nacional de Ferrocarriles Españoles.

RLSE: Red Local de Subestación.

RTU: Remote Terminal Unit.

S

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition.

SE: Subestación de Tracción.

SF6: Hexafluoruro de Azufre.

SICD: Sistema Integrado de Control Distribuido.

SQ: Structure Qualifier

T

T: Test

TCP: Transmission Control Protocol.

TFG: Trabajo de Fin de Grado.

TI: Type Identification.

TME: Telemando de Energía.

U

UC: Unidad de Control.

UCP: Unidad de Control de Posición.

UCPA: Unidad de Control de Puesto de Autotransformación.

UCS: Unidad de Control de Subestación.

UP: Unidad de Protección.

V

VSQ: Variable Structure Qualifier.

W

WAN: Wide Area Network.

Z

ZN: Zona Neutra.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

Actualmente, el objetivo del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), con la aprobación del Plan Director de Lucha contra el Cambio Climático 2018-2030 [1], es apostar por la electrificación de las líneas ferroviarias y el fomento del uso de sistemas de tracción amigables con el medio ambiente, así como la compra de energía de origen renovable. Esto implica la necesidad de construcción de subestaciones ferroviarias, así como la adecuación de las instalaciones para poder utilizar máquinas con tracción eléctrica, cuyos motores son más ligeros y económicos de operar que los motores diésel.

Hoy en día, en España existen dos sistemas de electrificación: el sistema de corriente continua de 750, 1500 o 3000 V que se utiliza en líneas convencionales y el sistema de corriente alterna de 1x25 kV o 2x25 kV que se utiliza en las líneas de Alta Velocidad Española (AVE).

En las líneas de AVE, el sistema de corriente alterna más utilizado es el de 2x25 kV. Este sistema permite reducir el número de subestaciones reduciendo así el coste, a la vez que permite transmitir mayor potencia, tiene menores caídas de tensión y menores pérdidas. En la figura 1, se muestra la configuración del sistema de 2x25 kV, formada por las Subestaciones de Tracción (SE), los centros de Autotransformación Intermedios (ATI), los centros de Autotransformación Finales (ATF) y las respectivas Zonas Neutras (ZN) para separar las distintas fases de alimentación.

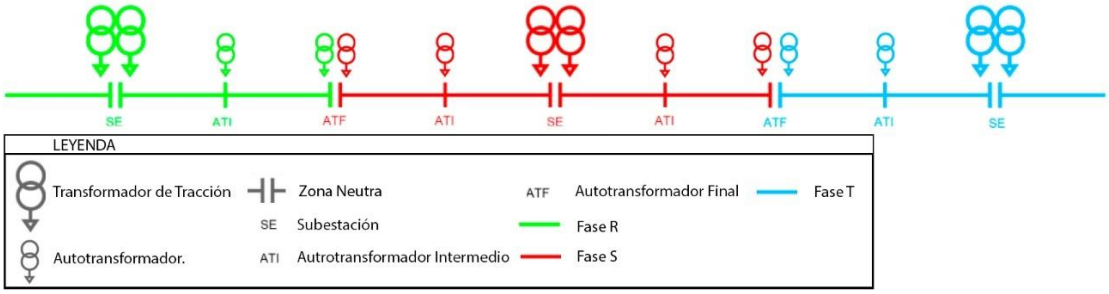


Figura 1.- Sistema de corriente alterna 2x25 kV.

El sistema de control utilizado en las subestaciones de las líneas AVE, es un Sistema Integrado de Control Distribuido (SICD), mediante el cual se realizar el control, la supervisión y la protección de la subestación y de sus líneas de entrada y salida. A diferencia de un sistema centralizado, conseguimos aumentar la fiabilidad, así como reducir costes.

En un sistema distribuido, el control se realiza a través de los diferentes sistemas conectados en red, para ello se utilizan Dispositivos Electrónicos Inteligentes (*IED*) que proporcionan facilidad de comunicación, lo que permite una integración de las funciones de control, protección y medición, y a su vez, aumenta las funciones de operación como son la autosupervisión, análisis de señales y faltas, almacenamiento de datos y eventos, etc [2].

Las comunicaciones se realizan mediante Redes de Área Locales (*LAN*) de alta velocidad de Fibra Óptica (FO) que posibilitan una comunicación rápida y fluida reduciendo errores de transmisión gracias a las codificaciones digitales y a los sistemas redundantes.

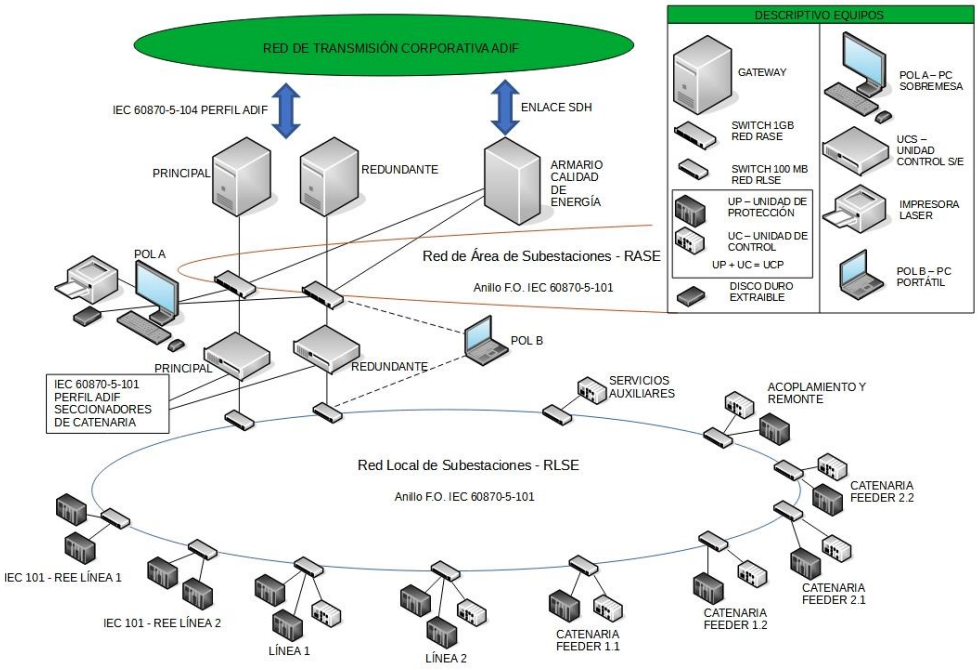


Figura 2.- Anillo RASE y RLSE dentro de la subestación. [3]

En la figura 2 se muestra la interconexión de las tres redes diferentes que existen dentro de una subestación y que se detallan a continuación:

- Red de Área local de Subestación (RASE). Conecta las distintas subestaciones con los ATI y ATF a través de dos anillos de fibra óptica. Utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-101.
- Red Local Subestación (RLSE). Está formada por dos anillos de fibra óptica en donde se conectan los Controladores Lógicos Programables (*PLC*) encargados del control con los encargados de la protección, y que se denominan Unidades de

Control (UC) y de Protección (UP) respectivamente. Se denomina red *EFI.P* y utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-101.

- Red secundaria. Se interconectan los *IED* con las UP. En esta red se utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-103.

Por último, como se puede ver en la figura 3, existe una cuarta red para interconectar la RASE con el telemando de energía a través de la Red de Área Amplia (*WAN*) de Adif. Esta interconexión se realiza mediante dos puertas de enlace o *gateways* utilizando el protocolo *IEC* 60870-5-104 encapsulado sobre *TCP/IP*. Los *gateways* son los encargados de convertir el protocolo *IEC* 60870-5-101 al *IEC* 60870-5-104 y viceversa.

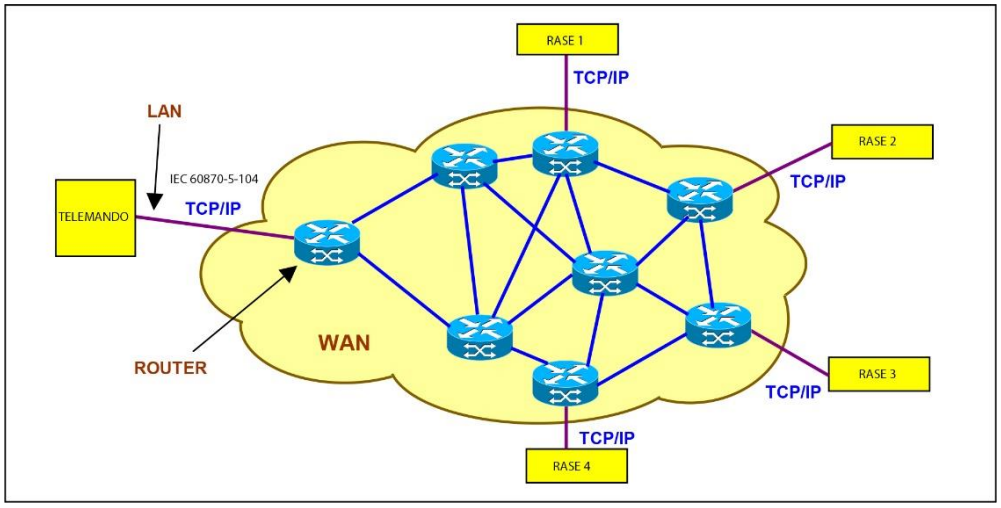


Figura 3.- Conexión redes locales del Telemando y RASE con la WAN de Adif. [3]

1.2. Objetivo del Trabajo Fin de Grado.

El objetivo del trabajo fin de grado es realizar un estudio del funcionamiento del protocolo *IEC* 60870-5-104 que se utiliza para la comunicación entre los telemandos de energía y las subestaciones ferroviarias de las líneas de trenes AVE gestionadas por Adif, estudiando los conceptos de la norma; modos de comunicación, formatos de trama, funciones básicas de aplicación, así como el estudio de herramientas para comprobar el correcto funcionamiento del protocolo y estudio de futuras mejoras en el sistema desplegado actualmente.

1.3. Estructura del documento.

El documento consta de seis capítulos y tres anejos que se organizan siguiendo una estructura clásica. Los diferentes capítulos se detallan a continuación:

- Introducción. En este capítulo se realiza un breve resumen como introducción al tema a tratar que se expone y desarrolla en los capítulos posteriores.
- Estado del Arte. En este capítulo se lleva a cabo la explicación de los sistemas de electrificación utilizados en las líneas AVE, de los equipamientos eléctricos de las subestaciones de tracción, del sistema integrado de control distribuido y del sistema *SCADA* utilizado en Adif. También se desglosa en profundidad el protocolo *IEC* 60870-5-104.
- Diseño. En este capítulo se explica la configuración de las diferentes redes que forman parte del sistema. Dentro de estas redes, nos encontramos con las redes locales, las redes de área y la red *WAN* de Adif.

  Además, se incluye el mapeado completo de una estación maestra y una estación remota en donde se pueden observar los diferentes tipos de señales utilizadas, tanto en sentido monitor, como en sentido control.
- Evaluación y resultados. En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la simulación. Se explican detenidamente los mensajes enviados y recibidos comprobando el correcto funcionamiento del simulador *IEC-Test*.
- Conclusiones. En este capítulo, se detallan las conclusiones extraídas tras la finalización del trabajo.
- Bibliografía. Último capítulo en donde se incluyen todas las referencias bibliográficas consultadas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Historia de la electrificación del ferrocarril en España.

La historia del ferrocarril en España comienza en el siglo XIX. En 1837 se inauguró la construcción de la línea La Habana-Güines en Cuba, antigua provincia española, pero no fue hasta 1848 cuando se construyó la primera línea en la península ibérica que unía Barcelona con Mataró.

A partir de entonces comenzaría una rápida expansión del ferrocarril con la construcción de numerosas líneas de ancho ibérico, a cargo de las que se convertirían en las principales empresas ferroviarias de la época [4].

En 1856 se constituyó la Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA) que fue una de las grandes empresas del sector junto con la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España (CCHNE) creada en 1858 [5]. Unos años más tarde, en 1877, se crearía a partir de la unión de pequeñas empresas ferroviarias que existían en Andalucía, la Compañía de los Ferrocarriles Andaluces (CFA) que llegaría a convertirse en la tercera compañía ferroviaria en España.

No sería hasta 1911, cuando se inauguraría la primera línea electrifica en España sobre ancho ibérico, concretamente el tramo de Gergal y Santa Fé del ferrocarril de Linares a Almería. Se decide emprender su electrificación debido a la fuerte pendiente que tenía el tramo y las locomotoras eléctricas de la época desarrollaban una mayor potencia que las de vapor.

En 1914, se comienza a plantear la electrificación del puerto de Pajares con una rampa en pendiente durante todo el trayecto siendo una de las más duras de España, en donde casi siempre eran necesarias dos locomotoras. Finalmente se aprobó su electrificación en 1918.

A partir de entonces, y tras los buenos resultados de la electrificación del puerto de Pajares, se comenzó a llevar a cabo la electrificación de distintos tramos, aunque a un ritmo muy lento. En 1941, cuando se produce la nacionalización de los ferrocarriles en la Red Nacional de Ferrocarriles Españoles (RENFE), solo había electrificados 7 tramos: Gádor-Nacimiento (31,3 km), Ujo-Busdongo (63 km), Barcelona-Manresa (66 km), Moncada-San Juan de las Abadesas (106 km), Alsasua-Irún (106 km), Ripoll-Puigcerdá

(49 km) y Bilbao-Portugalete (27 km), que solo representaba el 3,5% de la longitud total de la red [6].

En 1946 se publica el Plan General de Electrificación de los Ferrocarriles Españoles, por el que se aprueba el Plan extensivo de electrificación de las líneas de ancho normal que constituyen la Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles, en donde una primera etapa consistirá en alcanzar los 4500 km electrificados en doce años, pero siete años más tarde, en 1953, las líneas electrificadas solo habían crecido en 278 km.

Posteriormente, habrá dos ciclos (1954-1968 y 1973-1981) en donde se concentraría el grueso del avance en electrificación de las líneas, puesto que entre esos dos periodos se tendió el 89,2% de la longitud electrificada total.

Este crecimiento se frenaría de nuevo hasta el año 1992 que fue cuando se inauguró la primera Línea de Alta Velocidad (LAV) que, con una longitud de 471 km, uniría Madrid con Sevilla. Para la construcción de la línea de alta velocidad se decidió utilizar el ancho de vía estándar o internacional (1435 mm), en lugar del ancho ibérico o convencional (1668 mm), además se utilizó un sistema de electrificación de 1x25 kV a frecuencia industrial (50Hz) en corriente alterna con el que se conseguía reducir las pérdidas, así como simplificar y distanciar la construcción de las subestaciones de tracción.

No sería hasta el 2003, con la construcción de la LAV Madrid-Lleida, cuando comenzaría la expansión de la alta velocidad por todo el territorio español, llegando a los 3568,2 km construidos en 2021. Como prácticamente la totalidad de las líneas de alta velocidad están electrificadas, en este último ejercicio las redes de ámbito nacional electrificadas llegaban a los 9933,5 km, lo que representaba el 64,2% del total de las líneas en explotación titularidad de Adif y Adif-Alta Velocidad.

2.2. Sistemas de electrificación utilizados en líneas AVE.

Actualmente, las líneas de alta velocidad gestionadas por Adif se alimentan a 25 kV de corriente alterna a una frecuencia de 50 Hz y las configuraciones existentes son:

- Sistema de 1x25 kV, empleado en la LAV Madrid-Sevilla y en algunos tramos de otras líneas de alta velocidad.
- Sistema de 2x25 kV, empleado en el resto de las líneas de alta velocidad.

El sistema de 1x25 kV tiene la ventaja de que el suministro de energía a la catenaria se realiza con instalaciones más sencillas y se requieren solamente subestaciones

transformadoras. Por otro lado, tiene el inconveniente de que la Línea Aérea de Contacto (LAC) tiene mayor caída de tensión debido a su mayor impedancia, por lo que las subestaciones deben estar situadas a una menor distancia que en el sistema de 2x25kV, siendo la distancia media entre subestaciones de unos 40 km. Además, el retorno de la corriente se realiza en gran parte por el carril, pero se calcula que aproximadamente el 18% de la corriente retorna por las capas superficiales del terreno, lo que provoca fuertes perturbaciones electromagnéticas en el entorno afectando a los sistemas más próximos, muy especialmente a los sistemas de comunicaciones.

La alimentación de los transformadores de tracción se obtiene, normalmente, de líneas de alta tensión de 132 kV, 220 kV o 400 kV. Cada subestación está compuesta por varios transformadores que se alimentan con las mismas fases, lo que nos permite conectar en paralelo ambos transformadores en el caso de necesitar una mayor potencia. A la salida de un transformador tenemos una tensión monofásica de 25 kV, en donde una salida del secundario del transformador alimenta a la catenaria y la otra se conecta al carril que también está conectado a tierra. Para limitar o compensar los desequilibrios en la red de transporte, cada subestación se conecta alternativamente a las distintas fases para alimentar su tramo correspondiente, no pudiéndose conectar dos subestaciones en paralelo en un mismo trayecto por la diferencia de fases existente entre ellas. Por ello, aproximadamente en la mitad del trayecto existe una zona neutra para aislar eléctricamente cada tramo y evitar que el tren pueda producir un cortocircuito entre dos transformadores conectados a diferentes fases.

La configuración del sistema de 1x25 kV se muestra en la figura 4.

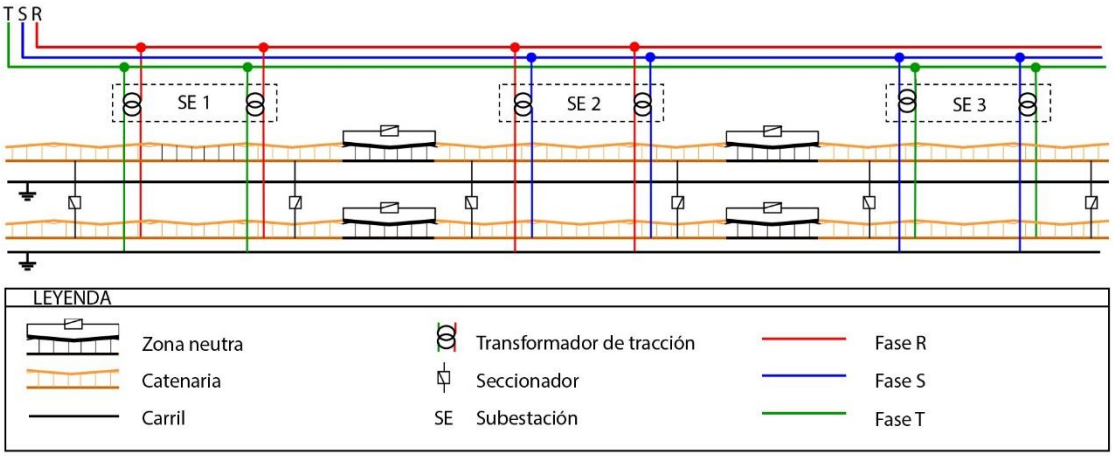


Figura 4.- Sistema 1x25 kV.

A pesar de la sencillez del sistema de 1x25 kV utilizado en la LAV Madrid-Sevilla, se decidió implantar el sistema de 2x25 kV en las nuevas líneas de alta velocidad, debido principalmente a que cerca de las líneas de alta velocidad no existía alimentación en alta tensión para las subestaciones de tracción, y además era muy difícil el tendido de las líneas de alta tensión por problemas ecológicos y ambientales.

El sistema de 2x25 kV se caracteriza por la existencia de dos conductores que se distribuyen a lo largo de la línea, uno es línea aérea de contacto o catenaria y el otro es el *feeder* de retorno, denomina normalmente como *feeder* negativo o *feeder* -25 kV.

En esta configuración eléctrica, el secundario del transformador de la subestación de tracción tiene una toma central que se conecta al carril, el cual está conectado a tierra, y dos tomas laterales que se conectan a la catenaria y al *feeder* negativo respectivamente. La tensión entre el *feeder* negativo y el carril es de 25 kV, pero desfasada 180º con respecto a la que existe entre la línea aérea de contacto y el carril que, al igual que en el sistema de 1×25 kV, es de 25 kV. Por lo tanto, la diferencia de tensión nominal en el secundario entre la línea aérea de contacto y el *feeder* negativo es de 50 kV.

Se necesitan una serie de centros de autotransformación situados a lo largo del trazado, cada 10 o 15 km, para mantener la tensión en la línea, en donde se conectan la línea aérea de contacto y el *feeder* negativo a las tomas externas de los autotransformadores y el carril a la toma central.

Cuando un tren está situado entre una subestación y un autotransformador, la transmisión de potencia funciona de manera similar a un sistema bifásico de 50 kV, lo que implica que, al funcionar con una tensión mayor, la corriente por la catenaria se reduce y, por lo tanto, la caída de tensión en esta configuración eléctrica también disminuye. Además, puesto que la caída de tensión se reduce prácticamente a la mitad, las subestaciones de tracción pueden distanciarse aproximadamente el doble con respecto al sistema de 1x25 kV, entre 60 y 80 km.

También, debido a que la mayor parte de la corriente regresa por el *feeder* negativo y apenas circula corriente por el carril, se reducen de manera significativa las perturbaciones e interferencias electromagnéticas en los equipos cercanos.

En las subestaciones del sistema de 2x25 kV, hay instalados dos transformadores de 60 MVA que se alimentan de fases distintas, lo que implica que tenga que haber una zona neutra delante de la subestación. Por lo tanto, cada transformador alimenta el tramo

correspondiente desde la zona neutra de la subestación hasta la zona neutra del ATF adyacente como se muestra en la figura 5.

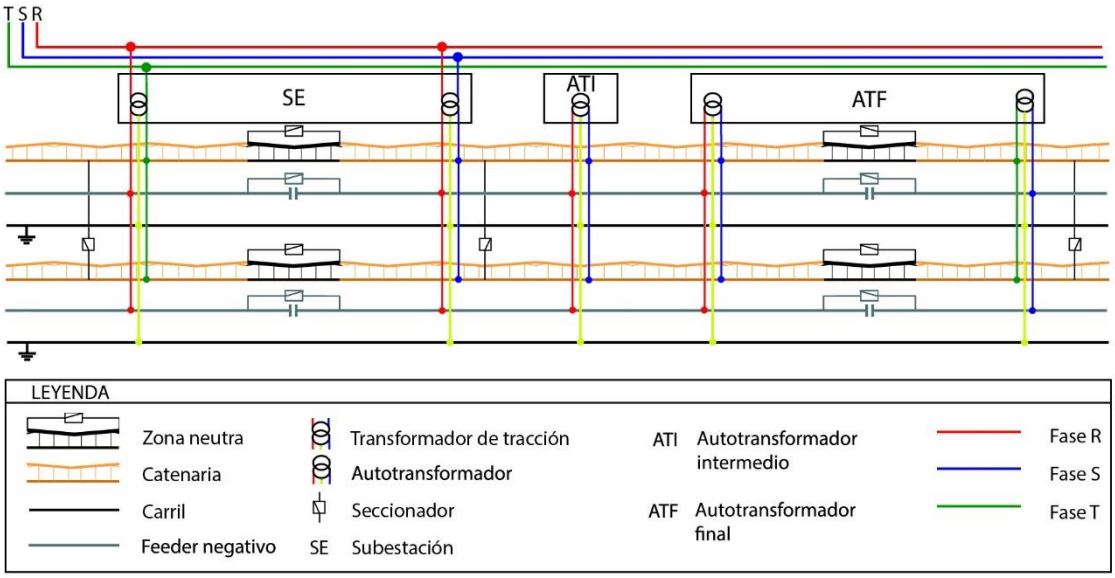


Figura 5.- Sistema 2x25 kV.

2.3. Equipamiento eléctrico en subestaciones de tracción.

Las subestaciones de tracción se componen de un conjunto de elementos para poder realizar correctamente su función. El elemento principal de la subestación es el transformador, quien se encarga de modificar la tensión de la energía eléctrica que recibe desde la red de transporte, que suele ser de 132, 220 o 400 kV, hasta el valor de tensión de 25 kV que se utiliza en las infraestructuras de AVE en España.

Dentro de las subestaciones existen distintas partes que permiten que la energía pueda usarse y distribuirse correctamente. Estos elementos se explican a continuación.

2.3.1. Interruptor.

Un interruptor tiene básicamente dos funciones; la de energizar o desenergizar una determinada zona de un sistema de potencia eléctrico bajo condiciones normales de funcionamiento y la capacidad de interrumpir las corrientes de cortocircuito de una forma segura resistiendo las fuerzas electromagnéticas que se generan.

El interruptor se puede considerar como uno de los elementos más importantes dentro una subestación, puesto que su comportamiento va a determinar el nivel de fiabilidad que puede tener el sistema eléctrico de potencia.

Un interruptor está formado normalmente por dos contactos que al separarse interrumpen la circulación de la corriente. Al ser un elemento que se puede maniobrar en carga, se considera que funciona correctamente siempre que sea capaz de extinguir el arco que se forma entre sus contactos en el momento de la apertura.

Una característica principal de los interruptores es el medio que se utiliza para la extinción del arco, diferenciándose los siguientes tipos:

- Interruptor de aire.
- Interruptor de aceite.
- Interruptor de vacío.
- Interruptor de Hexafluoruro de Azufre (SF6).

En las líneas de alta velocidad gestionadas por Adif se utilizan interruptores de SF6, debido a las excelentes propiedades dieléctricas que tienen.

Los interruptores también se pueden clasificar en función del número de fases a proteger y controlar, pudiendo ser monopolares, bipolares o tripolares. En el sistema de 1x25 kV se utilizan interruptores monopolares en las cabinas que alimentan la catenaria, así como en el devanado primario y secundario del transformador. En cambio, en el sistema de 2x25 kV los interruptores monopolares solo se utilizan en el devanado primario del transformador, mientras que en el devanado secundario y en las cabinas que alimentan la catenaria y el *feeder* negativo se utilizan interruptores bipolares.

El disparo o la apertura del interruptor se realiza a través de la energía almacenada en unos muelles que son tensados por un motor de corriente continua. Esta alimentación está asegurada por unos bancos de baterías que hay en la subestación.

Inmediatamente después de la apertura del interruptor, el motor procede a tensar el muelle de nuevo. Para poder cerrar el interruptor, el sistema de protección y control debe recibir la información de que el muelle está tensado para que en el caso de producirse un disparo se pueda interrumpir la circulación de corriente sin ningún problema.

2.3.2. Seccionador.

Los seccionadores se utilizan dentro una subestación para aislar diferentes elementos de la instalación. Una característica muy importante es la flexibilidad, ya que nos permite realizar diferentes conexiones entre las líneas y las barras.

Los seccionadores se diferencian de los interruptores porque únicamente son elementos de aislamiento y no de corte, por lo que se deben maniobrar sin carga. Además, no se requiere una velocidad de operación alta.

El control de los seccionadores puede ser mediante accionamiento motorizado o manual. Los seccionadores motorizados se maniobran mediante circuitos electrónicos de control y los seccionadores manuales mediante una manivela que se inserta en el armario del seccionador, cuando esté situado a la intemperie, o a través de la celda, cuando se encuentre dentro del edificio de la subestación.

El accionamiento de un seccionador motorizado se realiza mediante un motor de corriente continua con doble sentido de giro y un circuito de control. La UCP monitoriza la posición del seccionador mediante un sensor de posición o final de carrera para que en el caso de que el seccionador se encuentre en posición indefinida, impedir el cierre del interruptor.

Además, para organizar enclavamientos eléctricos entre seccionadores de distintas posiciones, existe una bobina de permiso que bloquea el accionamiento mientras esta no esté excitada.

2.3.3. Transformador de potencia.

El transformador es una máquina estática de corriente alterna que permite elevar o reducir la tensión de un circuito eléctrico manteniendo la frecuencia. Para convertir la energía eléctrica de un nivel de tensión a otro se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética.

Tal y como se comentó anteriormente, el sistema predominante en las líneas de alta velocidad es el de 2x25 kV, en donde además de las subestaciones, son necesarios centros de autotransformación compuestos por uno o varios autotransformadores.

Los autotransformadores difieren de los transformadores en su parte constructiva, puesto que los devanados de un autotransformador están conectados en serie y, por lo tanto, están acoplados eléctrica y magnéticamente, mientras que, en el caso de un transformador los devanados están separados, por lo que solamente están acoplados magnéticamente a través del flujo mutuo que circula por el núcleo.

Los transformadores y autotransformadores están sumergidos en aceite, que sirve como aislante eléctrico y como refrigerante, y se componen de cuatro partes:

- Tanque de expansión.

- Aisladores.
- Radiadores o disipadores de calor.
- Cuba de aceite.

Además, existe un equipamiento secundario asociado al transformador que opera con una alimentación auxiliar en baja tensión y que se compone por los siguientes aparatos y sistemas:

- Protecciones propias del transformador: relé de Buchholz, válvula de sobrepresión, protección de imagen térmica e indicadores de nivel de aceite.
- Alimentación auxiliar redundante.
- Refrigeración que se realiza mediante el intercambio de calor entre el aceite en el interior de la cuba y el aire en el exterior, a través de los radiadores de forma natural.
- Control del cambiador de tomas para regular la tensión en el lado de baja, de modo que se consiga tener una tensión prácticamente constante en la catenaria.

2.3.4. Autoválvulas

También se conocen como descargadores de sobretensión o pararrayos. La función de las autoválvulas es absorber las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, por maniobras o por otras causas, para evitar que se puedan llegar a perforar los aisladores ocasionando desperfectos en las instalaciones.

Para que realicen su función correctamente, deben estar permanentemente conectadas entre la línea de alta tensión y tierra. De esta forma, en el momento que se produce una sobretensión, la resistencia interna de la autoválvula disminuye, derivando la energía de la sobretensión a tierra.

Las autoválvulas se eligen de forma que estas actúen antes de que el valor de la sobretensión alcance el valor de la tensión de aislamiento de los elementos a proteger.

En las subestaciones de tracción de las líneas de alta velocidad, las autoválvulas se sitúan en la entrada del primario del transformador y en los pórticos de salida que alimentan la línea aérea de contacto.

2.3.5. Transformadores de medida y protección.

Son transformadores diseñados para alimentar circuitos de medida, protección y control. Además, permiten aislar estos circuitos de la alta tensión reduciendo a valores no peligrosos y normalizados las características de tensión e intensidad de la red eléctrica.

Dentro de los transformadores de medida y protección existen dos tipos:

- Transformador de tensión: se conectan en paralelo y reducen la tensión.
- Transformador de intensidad: se conectan en serie y reducen la intensidad. Están formados por uno o varios núcleos, en donde, en este último caso, se utiliza un núcleo para el circuito de medida y el resto para los relés de protección.

También se pueden clasificar según su utilidad:

- Transformadores de medida: se destinan a alimentar instrumentos de medida, contadores y otros aparatos análogos. Tienen una precisión muy buena y se configuran para que se saturen al 20-30% del valor nominal impidiendo el paso de corriente para proteger los equipos que alimentan.
- Transformadores de protección: se destinan a alimentar los relés de protección. Tienen un punto de saturación alto, de varias veces el valor nominal, para permitir la transmisión de información a la protección en el caso de una falta.

2.4. Sistema Integrado de Control Distribuido en subestaciones y centros de autotransformación en líneas de alta velocidad.

En las subestaciones y los centros de autotransformación de las líneas de alta velocidad está implementado el Sistema Integrado de Control Distribuido, el cual tiene la misión de realizar en tiempo real la gestión, supervisión y mando de los elementos asociados mediante las diferentes unidades de control y protección.

Mediante el SICD se pueden controlar las instalaciones que están distribuidas a lo largo de un área geográfica localizada, pero también se monitorizan las áreas colaterales para poder realizar una correcta gestión de los enclavamientos.

La monitorización y la supervisión de todos los equipos existentes en cada una de las instalaciones se realizan simultáneamente a nivel local y a nivel remoto, pero el control de los elementos de una instalación determinada solo la puede tener un nivel, es decir, o

bien los mandos se realizan desde el puesto local o bien se realizan desde el puesto remoto, pero nunca se podrán realizar desde dos niveles distintos a la vez.

En el nivel local existen dos modos de control:

- Modo SE, ATI o ATF: a través de una red *LAN* interna en cada instalación, operando a 100 Mb/s, se controla la subestación o centro de autotransformación desde el Puesto de Operación Local (POL) de la propia instalación. Este puesto está formado por una Interfaz Hombre-Máquina (*HMI*) en donde está instalado un programa de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (*SCADA*).
- Modo RASE: a través de dos anillos de fibra óptica, se encarga de conectar las diferentes subestaciones y centros de autotransformación entre sí, operando a 1 Gb/s. Desde este nivel se pueden controlar todas las instalaciones pertenecientes a la misma Red de Área (RA), desde el POL de cualquiera de ellas.

En el nivel remoto solo existe un modo de control, en donde el control de las instalaciones lo tendrá un único puesto remoto, quedando el resto de los puestos como respaldo:

- Modo Telemando de Energía (TME): desde el Centro de Control y Operación (CCO) o Puesto Regional de Operación (PRO) integrado en el Centro de Regulación y Control (CRC) correspondiente, a través de la red corporativa de ADIF, se pueden controlar todas las instalaciones sobre las que se tenga mando.

2.5. *SCADA*.

El acrónimo *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*), se utiliza para designar a la aplicación que tiene como finalidad la supervisión y el control de una instalación de forma remota. Gracias a este programa se pueden integrar, desde un solo lugar, todos los datos que hayan sido recogidos desde diferentes sensores, autómatas y equipos.

Actualmente, existen múltiples empresas que desarrollan programas *SCADA*. En el telemando de energía de trenes de alta velocidad ubicado en Puerta de Atocha que gestiona Adif, el sistema *SCADA* se basa en la plataforma «*VICOS P1000 / Sinaut Spectrum v 4.7*» desarrollado por Siemens.

En este caso, para la supervisión y control de las líneas de alta velocidad, el programa se compone de los siguientes elementos:

- La ventana principal *BaSiDi* (*Basic Signalling Display*). Esta es la ventana principal que se ejecuta una vez nos hemos autenticado en el sistema y es desde

donde se pueden abrir las ventanas necesarias para poder controlar y supervisar todo el sistema, ya sean ventanas de los unifilares de las SE, ATI, ATF, catenaria o consumidores que contienen elementos que se pueden maniobrar, ventanas de alarmas, ventanas de señales, ventanas de estaciones remotas, etc. Se muestra en la figura 6.

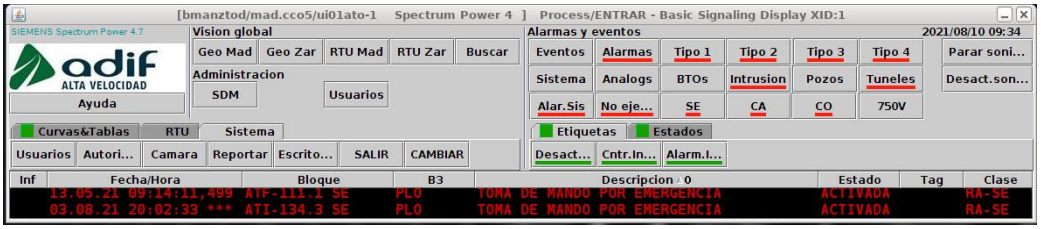


Figura 6.- Ventana BaSiDi.

- Ventana de unifilares. Desde esta ventana se controlan todos los elementos relacionados con la energía de aquellas líneas pertenecientes al ámbito de supervisión del CCO correspondiente.

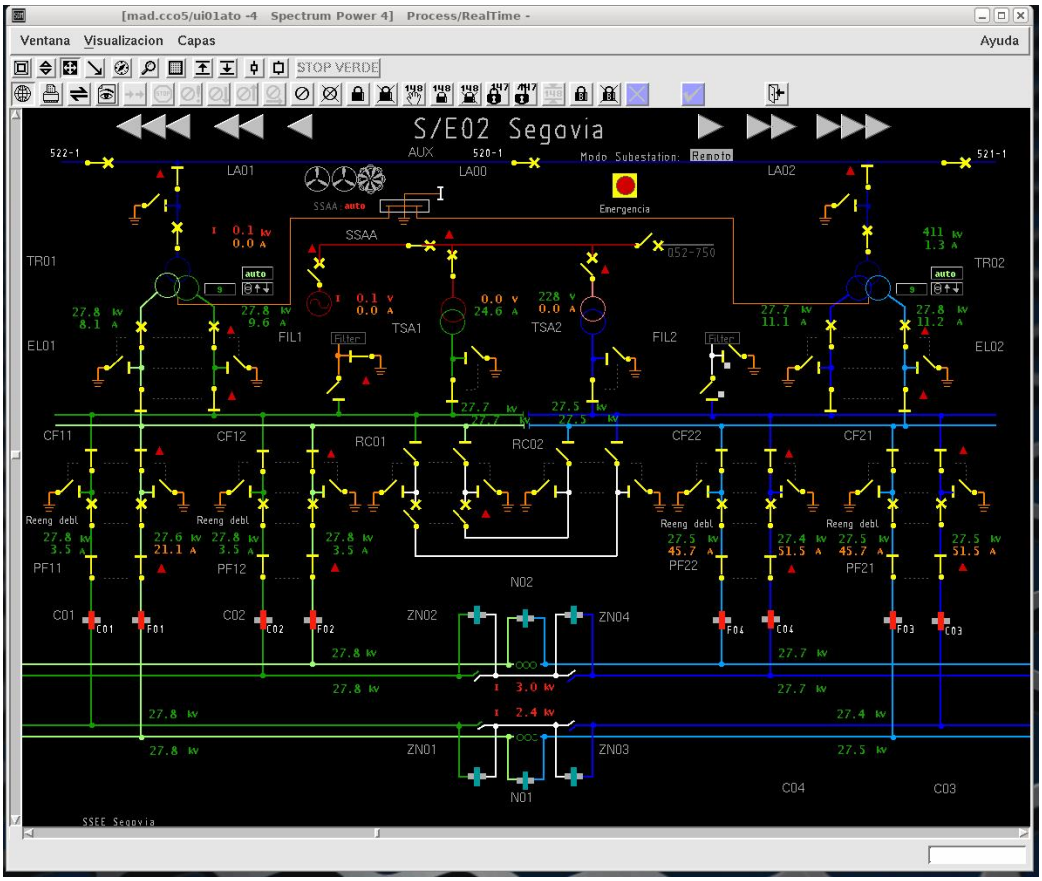


Figura 7.- Unifilar SE de Segovia nivel 4.

Esta ventana se puede abrir según 5 niveles de supervisión, siendo el nivel 1 el que corresponde al máximo nivel de supervisión y mínimo nivel de detalle, y el nivel 5 al mínimo nivel de supervisión y máximo nivel de detalle. Cuando se utiliza el nivel 1 correspondiente al máximo nivel de supervisión y mínimo nivel de detalle es posible visualizar todas las subestaciones y centros de autotransformación de la línea ferroviaria desde donde únicamente se podrán controlar los elementos más importantes que son los interruptores. En el caso contrario, cuando se utiliza el nivel 5 correspondiente al mínimo nivel de supervisión y máximo nivel de detalle, se podrán controlar todos los elementos de la subestación o centro de autotransformación.

En la figura 7 se muestra la SE de Segovia en nivel 4.

- Ventana de alarmas. Desde el BaSiDi se pueden abrir distintas ventanas con diferentes tipos de alarmas: según el tipo de prioridad, alarmas en subestaciones, catenaria o consumidores, todas las alarmas, etc. En esta ventana podremos visualizar los mensajes de alarma correspondientes al tipo elegido que se mostrarán con diferentes colores según el nivel de prioridad, siendo el color rojo el nivel de prioridad 1. Esta ventana se muestra en la figura 8.

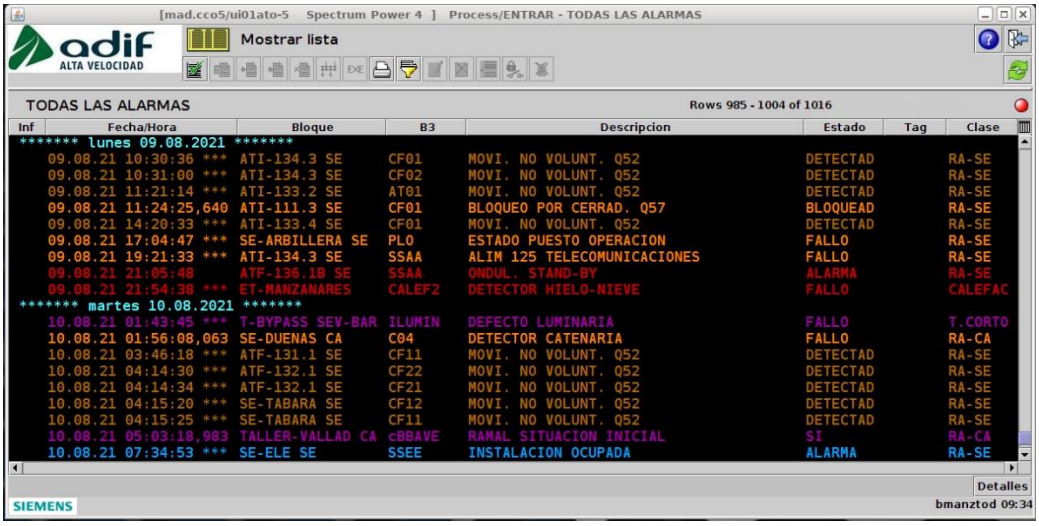


Figura 8.- Ventana alarmas.

- Ventana resumen túneles o calefactores. Esta ventana nos muestra un resumen del estado de las luminarias de los túneles o del estado de las calefacciones de agujas. Desde esta ventana, además de mostrarnos un resumen del estado de cada elemento, también es posible ejecutar órdenes de apagado o encendido. La ventana se muestra en la figura 9.

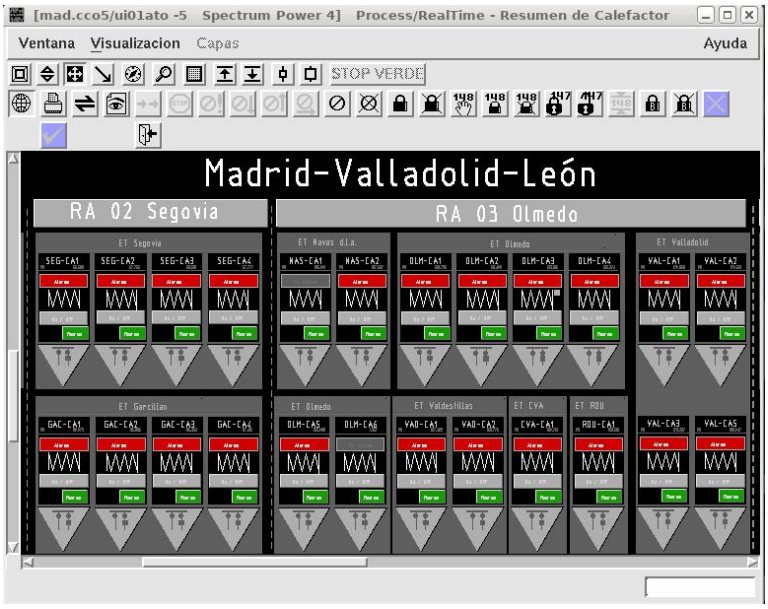


Figura 9.- Ventana calefacción de agujas.

- Ventana de estaciones remotas. Desde esta ventana podemos ver visualmente si existe algún problema de comunicación con las diferentes instalaciones de RASE, RACA y RACO. También podemos cambiar de canal de comunicación, de *Front-End* y podemos realizar interrogaciones generales a cualquier estación remota.
- Ventana de curvas y tablas. Desde esta ventana podemos visualizar la evolución de la tensión o corriente en un determinado punto a lo largo del tiempo para poder detectar fallos o sobrecargas en la red.

2.6. Protocolo de comunicación *IEC* 60870-5.

El estándar *IEC* 60870, desarrollado por la Comisión Electrotécnica Internacional, define los criterios a seguir para la monitorización y el control de equipos y sistemas de energía a distancia.

Se divide en varias partes, las cuatro primeras partes definen los principios generales, las condiciones ambientales y los requisitos de rendimiento, y la parte 5 describe los componentes de los protocolos de comunicaciones y se compone de las siguientes secciones:

- *IEC* 60870-5-1. Formatos de trama de transmisión.
- *IEC* 60870-5-2. Servicios de transmisión de enlace de datos.
- *IEC* 60870-5-3. Estructura general de datos de aplicación.
- *IEC* 60870-5-4. Definición y codificación de elementos de información.

- *IEC* 60870-5-5. Funciones básicas de aplicación.

Y de los siguientes estándares complementarios:

- *IEC* 60870-5-101. Tareas básicas de telecontrol.
- *IEC* 60870-5-102. Transmisión de datos de medición.
- *IEC* 60870-5-103. Intercambio de información con equipos de protección.
- *IEC* 60870-5-104. Acceso a la red para *IEC* 60870-5-101 mediante perfiles de transporte estándar.

Por lo tanto, el protocolo de comunicaciones *IEC* 60870-5-104, también conocido como *IEC* 104, es una extensión del protocolo *IEC* 60870-5-101, de forma abreviada *IEC* 101, en donde se eliminan las cabeceras de transmisión serie y se añaden otras nuevas para permitir una conectividad a la red mediante *TCP/IP*.

Para comprender el protocolo *IEC* 104, es necesario realizar una introducción de los modelos de referencia que se utilizan en los sistemas de comunicaciones, así como del protocolo de comunicaciones *IEC* 101.

2.6.1. Modelos de referencia en sistemas de comunicaciones.

En 1984 la Organización Internacional de Normalización (*ISO*) publicó la norma *ISO/IEC* 7498 titulada «Modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos», también conocida como «Modelo de referencia *OSI*», para la estandarización de las redes de ordenadores garantizando la interoperabilidad entre los distintos fabricantes.

El modelo de referencia *OSI* divide el proceso de comunicación entre dos dispositivos en siete capas. Cada capa va a tener una función bien definida y aunque no es necesario el uso de todas las capas, todos los enlaces de comunicaciones van a tener una fuente de datos (capa 7) y una ruta física (capa 1), así como la mayoría también una capa de enlace de datos (capa 2) para proporcionar protección sobre la integridad del mensaje. Estas tres capas forman el modelo de referencia de Arquitectura de Rendimiento Mejorado o modelo de referencia *EPA*.

El modelo de referencia *EPA* es una forma simplificada del modelo *OSI* que proporciona un rendimiento óptimo para las aplicaciones de telecontrol [7].

El protocolo *IEC* 101 se basa en el modelo *EPA* de tres capas para las comunicaciones de datos. En este caso, al utilizarse conexiones serie no son necesarias las capas de transporte

y red, pero sí la capa de enlace para conseguir que la información fluya entre dos máquinas que estén conectadas directamente. Además, cuando el medio de comunicaciones está compartido por más de dos máquinas, es necesario arbitrar su uso. Esta tarea se realiza en la subcapa de control de acceso al medio.

Por otro lado, el protocolo *IEC* 104, que como se ha indicado anteriormente es una extensión del protocolo *IEC* 101 en donde se eliminan las cabeceras de transmisión serie y se añaden otras nuevas para permitir la transferencia de datos dentro de una *WAN*, se basa en el modelo *TCP/IP* creado por Vinton Cerf y Robert E. Kahn, en la década de los 70. En este caso, se añade la capa de transporte para proporcionar control de errores, segmentación, control de flujo, control de congestión y direccionamiento de aplicaciones, y la capa de red que utiliza el direccionamiento *IP* para enrutar los datos a través de las diferentes redes.

En la figura 10 se representa la relación entre el modelo *OSI*, el modelo *EPA* y el modelo *TCP/IP*.

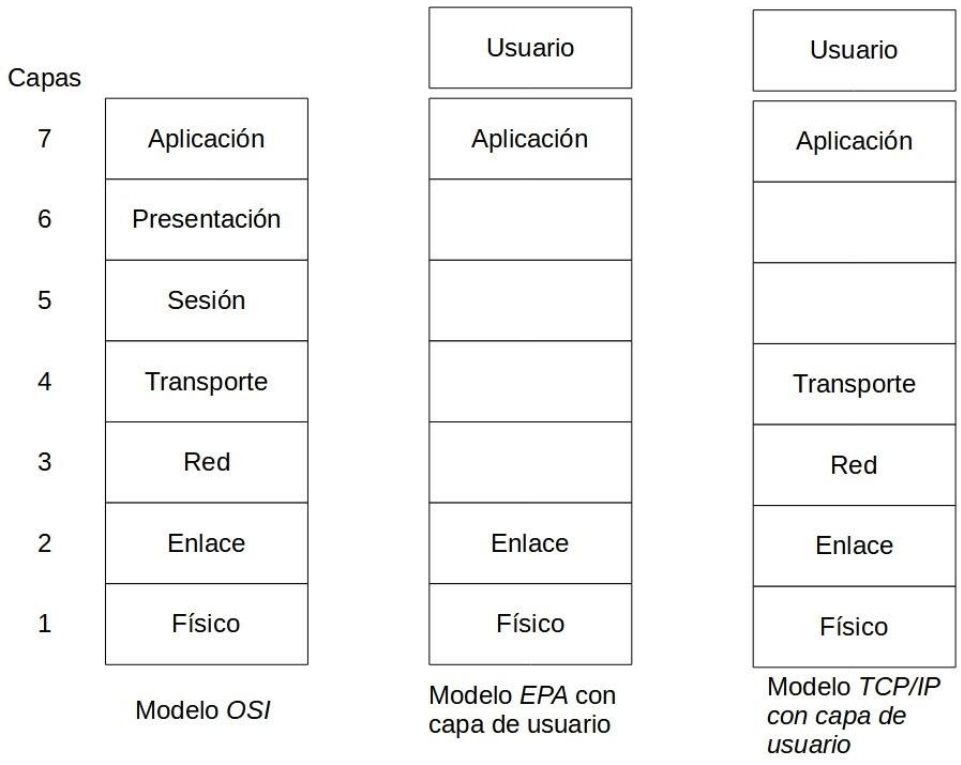


Figura 10.- Relación entre los modelos de referencia OSI, EPA y TCP/IP.

En los modelos *EPA* y *TCP/IP* que se muestran en la figura 10 y que son en los que se basan los protocolos *IEC* 101 e *IEC* 104 respectivamente, se les ha añadido una capa de usuario para representar las diferentes funciones o procesos que se deben definir para un

correcto funcionamiento del sistema de telecontrol, proporcionando interoperabilidad entre los equipos dando lugar a un sistema de telecontrol totalmente operativo en vez de un simple sistema de comunicación de datos.

2.6.2. Introducción al protocolo *IEC* 60870-5-101.

2.6.2.1. Arquitectura del protocolo *IEC* 101.

Una representación precisa de la arquitectura de comunicaciones de la norma *IEC* 101 sería equivalente al modelo *EPA* con la capa de usuario adicional.

En la figura 11 se muestra la relación de las secciones que conforman la parte 5 de la norma con la arquitectura del protocolo *IEC* 101 según un modelo de 4 capas.

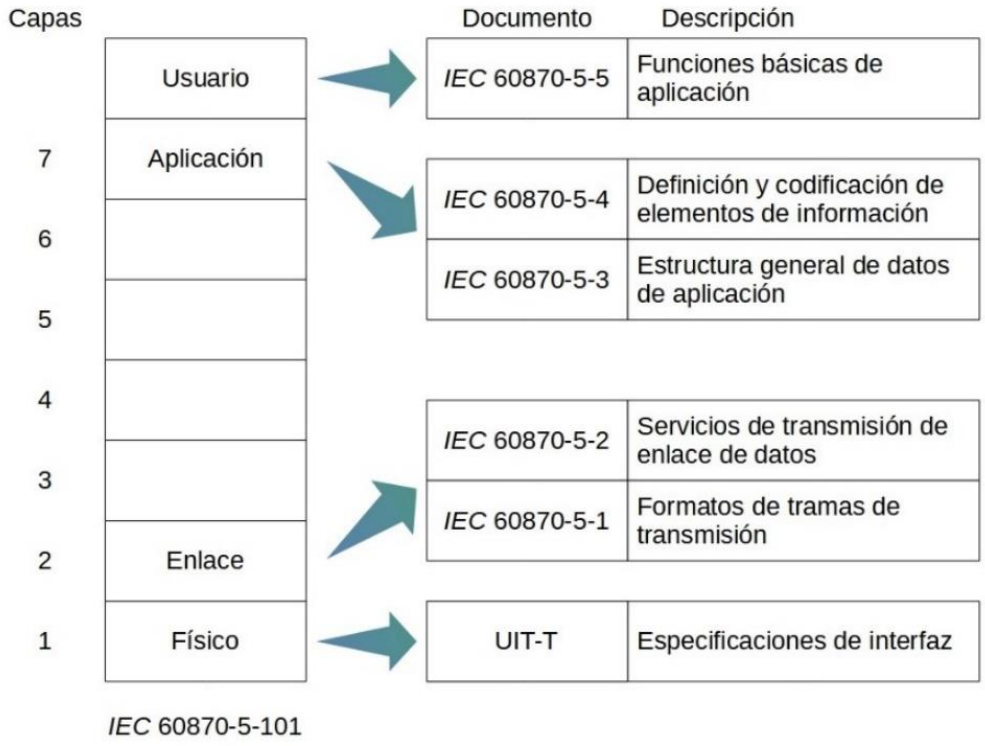


Figura 11.- Arquitectura del protocolo de la norma IEC 60870-5-101.

2.6.2.2. Modos de comunicación.

- Balanceado. Se usa cuando existe un enlace de comunicación dedicado punto a punto. La comunicación es *full duplex* lo que permite que una estación remota o *RTU* (*Remote Terminal Unit*) pueda enviar datos de forma espontánea sin necesidad de ser interrogada por el centro de control [8]. En la figura 12 se muestra la conexión de dos estaciones remotas con el centro de control mediante dos enlaces dedicados.

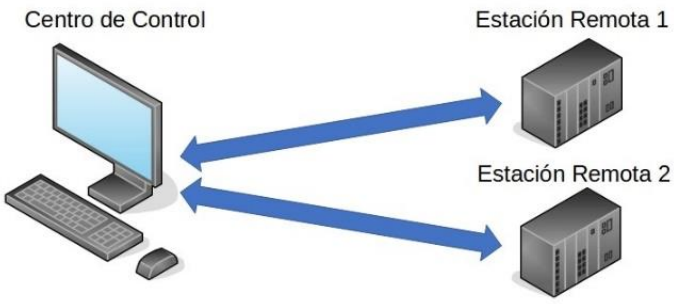


Figura 12.- Modo de comunicación balanceado.

- No balanceado. Se usa en enlaces compartidos punto a multipunto. La comunicación es *half duplex*, por lo tanto, la estación remota solo envía datos cuando es interrogada por el maestro. El maestro interroga de manera cíclica todas las estaciones remotas [8]. En la figura 13 se muestra la conexión de tres estaciones remotas con el centro de control mediante un enlace compartido.

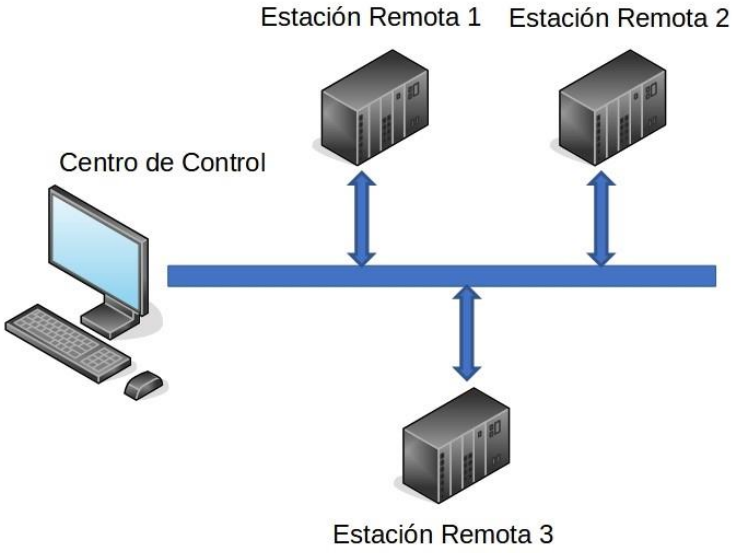


Figura 13.- Modo de comunicación no balanceado.

2.6.2.3. Formatos de tramas.

En el protocolo *IEC* 101 se definen dos formatos de trama, una trama de longitud fija que se utiliza para enviar mensajes de control y una trama de longitud variable que se utiliza para enviar mensajes de la capa de aplicación [8].

Las tramas de datos se pueden clasificar en dos tipos; las que contienen órdenes desde el centro de control a la estación remota y las que contienen informaciones desde la estación remota al centro de control. Las tramas de control se utilizan para que el centro de control

pregunte a la estación remota si tiene información y para que esta conteste en el caso de no tener información preparada.

Las tramas se dividen en dos campos: control y datos de aplicación o *ASDU* (*Aplication Service Data Units*)., aunque el campo de datos de aplicación puede no existir si no hay datos para transmitir.

En la figura 14 se muestran los formatos de trama definidos en el protocolo *IEC* 101 y que son:

- Trama de longitud fija. Se inicia con el valor hexadecimal 0x10 seguido de un campo de control, opcionalmente un campo para la dirección del objeto, el Código de Redundancia Cíclica (CRC) para la detección de errores y finaliza con el valor 0x16.
- Trama de longitud variable. Se inicia con el valor hexadecimal 0x68, un campo de longitud de trama por duplicado y de nuevo el valor 0x68 seguido por un campo de control, opcionalmente un campo para la dirección del objeto, el código CRC para la detección de errores y finaliza con el valor 0x16.

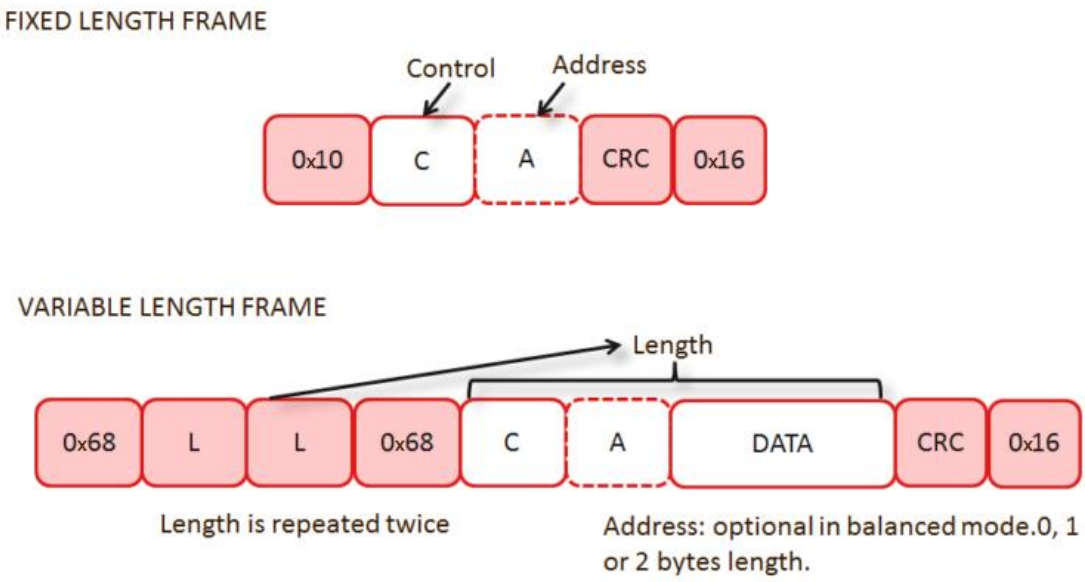


Figura 14.- Formatos de trama IEC 60870-5-101. [8]

2.6.2.4. Funciones básicas de aplicación.

En la sección 5 de la parte 5 de la norma *IEC* 60870 (*IEC* 60870-5-5) se definen las funciones básicas de aplicación. Estas funciones se utilizan en los mensajes de la capa de

aplicación para poder ejecutar procesos coordinados entre el centro de control y las estaciones remotas, como pueden ser:

- Inicialización de las estaciones remotas.
- Adquisición de datos por petición cíclica.
- Envío periódico.
- Envío de eventos.
- Interrogación general.
- Sincronización horaria.
- Comandos de control.
- Envío de contadores.
- Carga de parámetros.
- Comandos de prueba.
- Transferencia de ficheros.
- Medida del retardo de envío.

2.6.2.5. Estructura general de las *ASDU.*

Las *ASDU* transportan informaciones u órdenes en función del sentido de comunicación. Se denomina sentido monitor cuando transportan informaciones sobre eventos capturados en la estación remota hacia el centro de control y sentido control cuando transportan las órdenes desde el centro de control a la estación remota.

Todas las *ASDU* están compuestas por diferentes campos, tal y como se muestra en la figura 15.

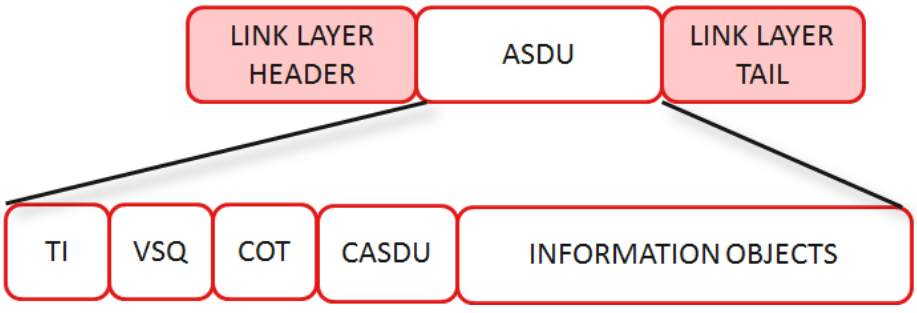


Figura 15.- Estructura de una ASDU. [8]

La función de los diferentes campos es la siguiente:

- *TI* (*Type Identification*): número que identifica el tipo de ASDU y, por lo tanto, cómo están estructurados los datos.
- *VSQ* (*Variable Structure Qualifier*): permite conocer el número de objetos de información que contiene el *ASDU* y su forma de direccionamiento.
- *COT* (*Cause of Transmission*): motivo de la transmisión. Además, opcionalmente se puede incluir un byte con el identificador del centro de control.
- *CASDU* **(***Common Address of ASDU*): dirección de la capa aplicación que recibe o envía el mensaje, o también llamada dirección de la estación remota.
- *Information Objects*: lleva el contenido del servicio solicitado o la información notificada.

Además, las *ASDU* se pueden clasificar en diferentes tipos según la información que se envía:

- Información de proceso en sentido monitor (M_XX_XX_X): se envían datos sobre los estados de las medidas, posiciones de paso, etc.
- Información de proceso en sentido control (C_XX_XX_X): se envían mandos simples, mandos dobles, consignas, etc.
- Información del sistema en sentido monitor (M_EI_NA_1): se envía el fin de la inicialización.
- Información del sistema en sentido control (C_XX_XX_X): se envían comandos de interrogación general, interrogación de contadores, lectura, sincronización horaria, etc.
- Información de parámetros en sentido control (P_XX_XX_X).
- Transferencia de ficheros (F_XX_XX_X).

2.6.2.6. Objetos de información.

El campo *Information Object* de una *ASDU*, está formado por la dirección de objeto *IOA* (*Information Objetc Address*), el valor de campo, la calidad de la información y opcionalmente una marca de tiempo.

2.6.2.7. Identificación de información.

Para identificar de dónde viene la información, cada dato que se envía mediante el protocolo *IEC* 101 se identifica por dos direcciones: la dirección de aplicación *CASDU* y la dirección de objeto *IOA*.

2.6.2.8. Tipos de objetos de información.

Los tipos de objetos de información se clasifican en cuatro categorías principales:

- Señales digitales
- Señales analógicas
- Contadores.
- Comandos y ajustes.

2.6.2.9. Bits de calidad de las señales.

Mediante los bits de calidad se indica información extra en función del tipo de dato. A continuación, se describen los bits de calidad:

- Invalid (IV): indica si el valor es válido o invalido.
- Substituted (SB): indica si el valor es real o se ha sustituido manualmente.
- Blocked (BL): indica si la señal está bloqueada
- Overflow (OV): indica si la medida está fuera de rango.

2.6.2.10. Datado temporal de la información.

La marca de tiempo se utiliza cuando la estación remota envía cambios digitales de forma espontánea para que el centro de control tenga cronológicamente datada la secuencia de eventos ocurridos.

En el caso de envío de información ante una interrogación general, no es necesaria una marca de tiempo, puesto que se trata del estado actual de las variables.

2.6.3. Introducción al protocolo *IEC* 60870-5-104.

Una vez realizada la introducción al protocolo *IEC* 101, se va a explicar detalladamente el protocolo *IEC* 104.

2.6.3.1. Arquitectura del protocolo *IEC* 60870-5-104.

Tal y como se ha visto en apartados anteriores, una representación precisa de la arquitectura del protocolo *IEC* 101 se corresponde con un modelo de cuatro capas. En el caso del protocolo *IEC* 104, la arquitectura debe incluir capas adicionales del modelo *OSI* para facilitar el transporte de mensajes a través de la red. Estas capas adicionales son la capa de transporte que nos permite transmitir la información en ambas direcciones mediante el uso del protocolo *TCP* y la capa de red que nos permite enrutar la información a través de las diferentes redes haciendo uso del protocolo *IP*.

En la figura 16 se muestra la relación de las secciones que conforman la parte 5 de la norma con la arquitectura del protocolo *IEC* 104.

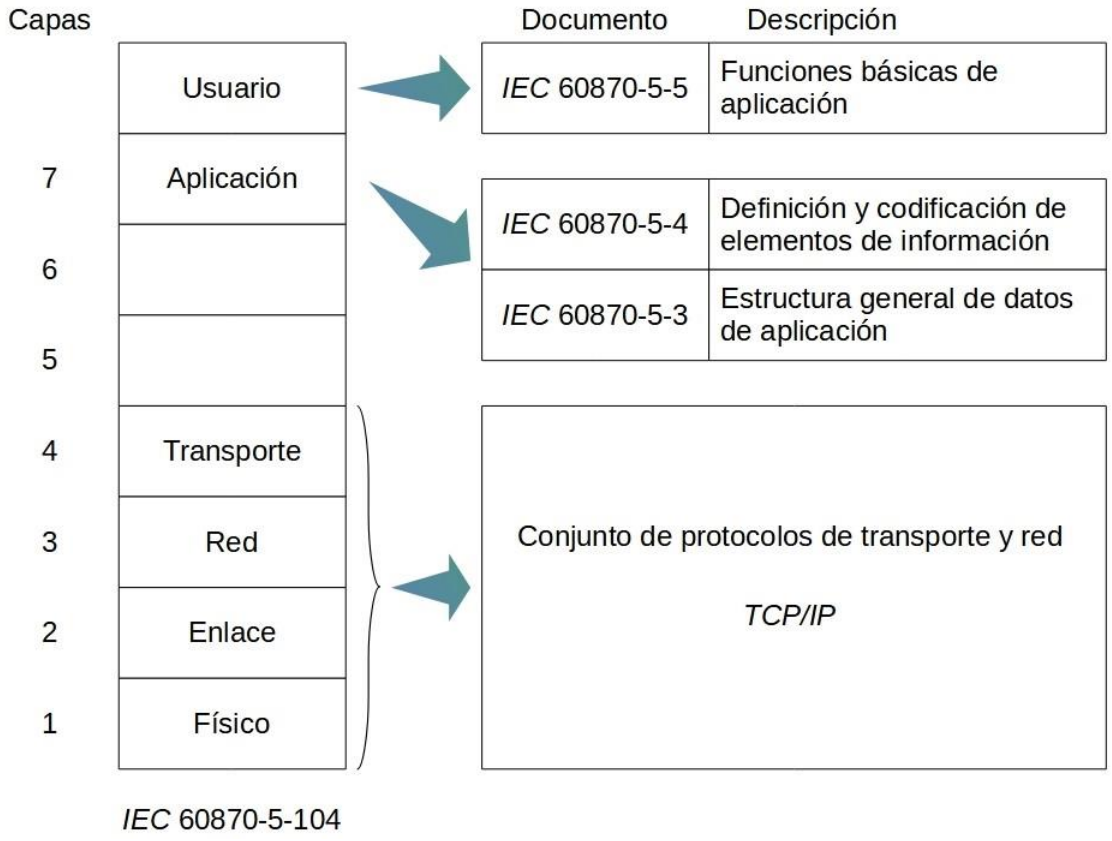


Figura 16.- Arquitectura del protocolo IEC 60870-5-104.

2.6.3.2. Formato de la trama

Como se ha comentado anteriormente, para la transferencia de órdenes o informaciones entre las distintas entidades, el protocolo *IEC* 104 hace uso del modelo *TCP/IP*, en donde la capa de transporte se encarga de proporcionar control de errores, segmentación, control de flujo, control de congestión y direccionamiento de aplicación, y la capa de red es la

responsable de enviar los paquetes de datos de una entidad a otra a través de múltiples redes mediante direccionamiento *IP*.

El intercambio de datos que se realiza entre las diferentes capas se muestra en la figura 17.

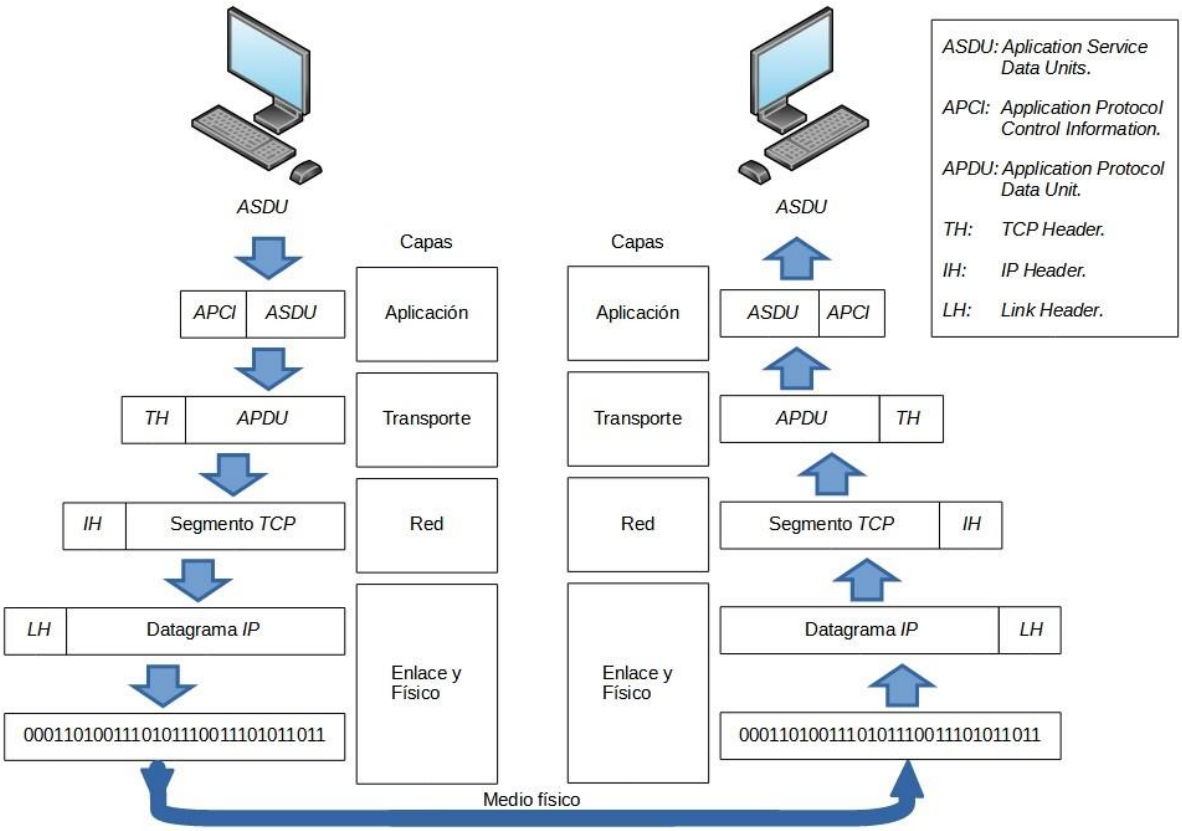


Figura 17.- Intercambio de datos entre capas en IEC 104.

Según la norma, el formato de la trama del protocolo *IEC* 104 a nivel de aplicación recibe el nombre de *APDU* (*Application Protocol Data Unit*) y está dividida en dos campos:

- *APCI* (*Application Protocol Control Information*). Está formado por 1 byte de inicio de trama con el valor hexadecimal 0x68, otro byte para indicar la longitud de la trama y otros 4 bytes que forman el campo de control. El campo de control se utiliza para identificar el tipo de trama que se envía o recibe, es decir, si es una trama de tipo I, de tipo S o de tipo U, y para los contadores de número de secuencia recibida o enviada.
- *ASDU* (*Application Service Data Unit*). Este campo es igual al campo definido en el protocolo *IEC* 101, en donde se transporta la información de los eventos en

sentido monitor y de las órdenes en sentido control. El campo *ASDU* solo aparece en aquellas tramas donde se transmiten informaciones u órdenes.

En la figura 18 se muestra el formato de una trama *IEC* 104.

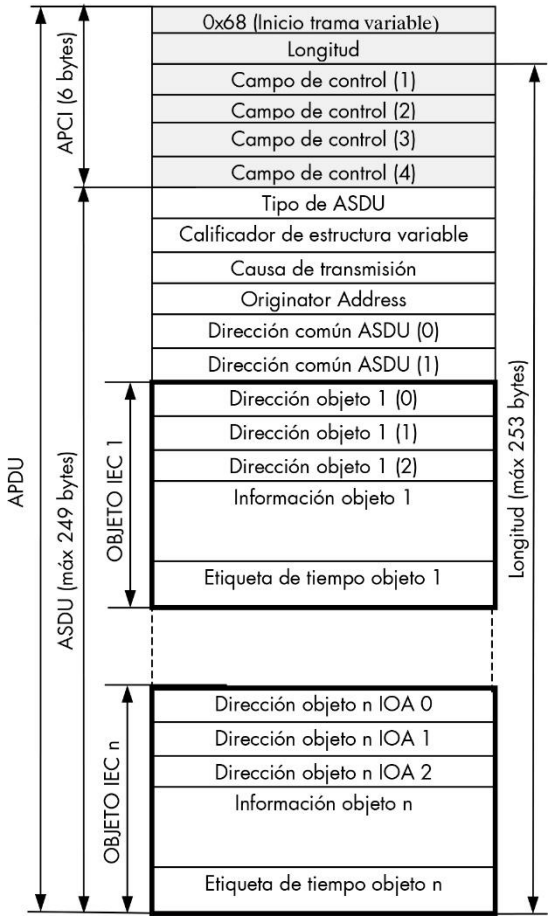


Figura 18.- Formato trama IEC 104. [3]

Según los valores del campo de control del *APCI* se definen tres tipos de tramas:

- Trama I. Esta trama es la única que contiene el campo *ASDU*. En el campo de control se indica que es una trama tipo I y, además, se incluyen dos contadores; uno con el número de secuencia de la trama recibida y otro con el de la enviada. Estos dos contadores se utilizan para conocer por parte de la estación remota y del centro de control cuántas de las tramas emitidas han llegado a su destino.
- Trama S. Es una trama de apoyo de la trama I. El receptor enviará una trama S para confirmar todas las tramas I recibidas cuando no tenga necesidad de enviar una nueva orden o información mediante otra trama I. En el caso de enviar una

trama I con alguna orden o información, también se incluiría la confirmación de las tramas recibidas.

- Trama U. Esta trama permite establecer y parar la comunicación entre el centro de control y la estación remota, así como comprobar que la comunicación está activa en las dos direcciones.

2.6.3.3. Formato de la *ASDU.*

La *ASDU* define la estructura general mediante la cual podemos intercambiar información entre centro de control y la estación remota.

La norma *IEC* 104 define las diferentes informaciones u órdenes que se pueden intercambiar entre centro de control y la estación remota, y que reciben el nombre de objetos *IEC*.

Los objetos *IEC* se clasifican en grupos que contienen señales o informaciones de iguales características. Cada grupo define un tipo de *ASDU,* entre los cuales tenemos de tipo información simple o información doble, de tipo medida analógica codificada en formato de coma fija de 16 bits o en coma flotante de 32 bits, de tipo orden doble, etc.

Cada *ASDU* puede transportar el valor de varios objetos *IEC* siempre que sean del mismo tipo. Para ello el campo *ASDU* se organiza en campos comunes a todos los objetos *IEC* y en campos con información propia de cada objeto *IEC*.

En la tabla 1 se muestran los campos que forman la *ASDU* con el nombre adoptado en el perfil Adif 104, el nombre original en inglés, el tamaño en bytes y su significado.

TABLA 1.- CAMPOS DE LA *ASDU*.

CAMPO	NOMBRE ORIGINAL	TAMAÑO (BYTES)	SIGNIFICADO
Campos comunes			
Tipo de ASDU	«Type identification»	1	Tipo de ASDU. Ejemplo: orden simple, orden doble, información simple, información doble, etc.
Calificador de Estructura variable	«Variable Structure Qualifier»	1	Número de objetos y tipo de direccionamiento utilizado: individual o secuencial.
Causa de Transmisión	«Cause of Transmission»	1	Causa origen de la transmisión. Ejemplo: orden del centro de control, evento espontáneo, etc.
Dirección de origen	«Originator Address»	1	Dirección del centro de control que ha originado la orden para el caso de ASDU tipo orden.
Dirección común	«Common Address»	2	Dirección de la estación remota a la que va dirigida la orden o de la que proviene la información

CAMPO	NOMBRE ORIGINAL	TAMAÑO (BYTES)	SIGNIFICADO
Campos de cada objeto *IEC*			
Dirección *IEC* del objeto	«Information Object Address»	3	Dirección del objeto (señal) dentro de la estación remota. Si no se utiliza toma valor 0.
Valor del objeto	«Information Elements»	1 a 5	Valor del objeto. Depende del tipo de objeto: • Informaciones tipo simple o doble: 1 byte. • Orden simple o doble: 1 byte. • Medidas en coma fija de 16 bits: 3 bytes. • Medidas en coma flotante de 32 bits: 5 bytes. • Contadores de 32 bits: 5 bytes. Parte de los bits no utilizados para la información se dedican a indicar la calidad de la información u opciones en el caso de órdenes.
Etiqueta de tiempo	«Time Tag»	7	Momento de la captura o procesamiento de la medida o de envío de la orden. Se codifica como fecha y hora, con resolución de milisegundo según lo indicado para CP56Time2a.
Fuente: Adif. [3]			

A continuación, se describen los campos mostrados en la tabla 1.

2.6.3.4. Tipo de *ASDU.*

Se utiliza un número entre el 1 y 255 para identificar el tipo de objeto *IEC* que contiene el *ASDU*. El rango del 1 al 127 están definidos en la norma y el resto forman el rango privado en donde cada empresa puede definir sus propios tipos de *ASDU*.

Por temas de claridad se suele utilizar un mnemónico en lugar del número.

La codificación del mnemónico para cada tipo de *ASDU* se estructura según cuatro campos separados por el símbolo «_» y cuyo significado, de izquierda a derecha, se muestra a continuación:

- Primer campo. Indica el grupo al que pertenece la *ASDU.* Existen cuatro grupos distintos de los cuales, en el Perfil Adif 104, solo se utiliza el grupo para informaciones y para órdenes.
    - «M» para informaciones sobre eventos, alarmas, posiciones, etc.
    - «C» para órdenes.
    - «P» para parámetros. No utilizado.

- «F» para transferencia de ficheros. No utilizado.

- Segundo campo. Indica el tipo de información o de orden. A continuación, se muestran algunos ejemplos:
  - «CS». Sincronización del reloj.
  - «SP». Información de tipo simple (alarma, evento).
  - «DP. Información de tipo doble (posición de aparato).
  - «DC». Orden de tipo doble (orden de abrir o cerrar).
  - «IC». Comando de interrogación.
- Tercer campo. Indica el tipo de etiqueta de tiempo que llevan asociadas las órdenes y las informaciones.
  - «Nx». No lleva etiqueta de tiempo.
  - «Tx». Lleva etiqueta de tiempo.
  - «xA». Etiqueta de tipo A. Valores normalizados con calidad.
  - «xB». Etiqueta de tipo B. Valores escalados con calidad.
  - «xC». Etiqueta tipo C. Valores en coma flotante con calidad.
  - «xD». Etiqueta tipo D. Valores normalizados sin calidad.
- Cuarto campo. Indica la Norma en la que se define la *ASDU*. En nuestro caso, el valor 1 indica que está definido en el protocolo *IEC* 101 o en el *IEC* 104.

Los tipos de *ASDU* definidos en la norma que son los que se utilizan en Adif, se muestran en el apéndice 1.

2.6.3.5. Calificador de estructura variable.

Indica el número de objetos de información que contiene el *ASDU* y cómo se direccionan.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	SQ	Número de objetos IEC en el ASDU (0 a 127)						

Figura 19.- Campo calificador de estructura variable. [3]

Este campo se divide en las dos partes que se muestran en la figura 19 las cuales se explican a continuación:

- **Calificador de Estructura (*SQ*).** Cuando su valor es 0, indica que la estructura es una secuencia de objetos de información en donde cada objeto lleva su propia dirección y, por lo tanto, no necesitan ser direcciones consecutivas.

  Cuando su valor es 1 la estructura solo contiene la dirección del primer objeto de información que se corresponde con el primer elemento de información. Para identificar la dirección del objeto de información que se corresponde con cada elemento, hay que sumar la dirección del primer objeto con la posición de cada elemento y, por lo tanto, las direcciones tienen que ser consecutivas.

- **Número de objetos.** Indica el número de objetos de información que contiene el *ASDU*. Puede haber un máximo de 127 objetos y si no es necesario toma valor 0.

2.6.3.6. Causa de transmisión.

Indica la razón por la cual se ha transmitido el *ASDU* desde el maestro al cliente o viceversa.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	T	P/N	Causa					

Figura 20.- Campo causa de transmisión. [3]

Este campo se divide en las tres partes que se muestran en la figura 20 las cuales se explican a continuación:

- ***Test (T).*** Define si el *ASDU* se genera en modo *test* (*bit* a 1) o en modo normal (*bit* a 0).

- ***Positive/Negative (P/N).*** Ante una orden recibida, el cliente responderá con una confirmación positiva (*bit* a 0) si acepta la orden o negative (*bit* a 1) si la rechaza.

- ***Cause of transmission (COT).*** Es un código de seis *bits* que se utiliza para interpretar la información en la estación de destino. Para cada tipo de ASDU se define un subconjunto de códigos que son significativos.

  Los códigos *COT* que están definidos en la norma se muestran en el apéndice 2.

2.6.3.7. Dirección de origen.

Identifica al centro de control que ha enviado una orden a una estación remota, de manera que esta última pueda devolver una confirmación, aceptando o rechazando la orden, al propio centro de control.

Cuando la estación remota envía un mensaje de información sin haber recibido previamente una orden de algún centro de control, el campo dirección de origen toma el valor 0 y, por lo tanto, la información la recibirán todos los centros de control del sistema.

2.6.3.8. Dirección común.

Indica la dirección *IEC* de la estación remota. Se le llama dirección común porque está asociada a todos los objetos de información de la estación remota correspondiente.

2.6.3.9. Dirección *IEC* del objeto.

La dirección *IEC* del objeto de información es el primer campo del objeto de información e identifica un dato en particular dentro de una estación remota

Cuando la dirección no es relevante toma el valor 0. El campo *IOA* puede tener una longitud de uno, dos o tres *bytes*, aunque una estación remota solo puede gestionar, como máximo, 65536 direcciones de objetos de información.

2.6.3.10. Valor del objeto.

La norma *IEC* 104 define el formato de los objetos de información para cada tipo de *ASDU*, en donde se indica qué elementos de información forman parte de cada tipo y cómo se estructuran.

Los diferentes tipos de elementos de información que están definidos en la norma se muestran en el apéndice 3.

2.6.3.11. Etiqueta de tiempo.

La norma define los tres formatos de tiempo que se explican a continuación:

- CP56Time2a. Este formato de tiempo tiene una longitud de 7 *bytes* y nos da información de los milisegundos (2 *bytes*), minutos (1 *byte*), horas (1 *byte*), día de la semana y del mes (1 *byte*), mes (1 *byte*) y año (1 *byte*).

  Se utiliza para la sincronización del reloj. Hay que tener en cuenta que, aunque los días de la semana están definidos, no se utilizan y, por lo tanto, su valor se establece a 0.

- CP24Time2a. Normalmente se utiliza como etiqueta de tiempo de los objetos de información. Tiene una longitud de 3 *bytes* y nos da información de los milisegundos (2 *bytes*) y de los minutos (1 *byte*).
- CP16Time2a. Este se suele utilizar para los tiempos de operación de elementos. Tiene una longitud de 2 bytes y solo nos da información de los milisegundos.

3. DISEÑO

3.1. Redes de comunicaciones en Adif-AV.

Dentro de la subestación existen tres redes diferentes que se interconectan a través de *switches* y que se denominan:

- Red de Área local de Subestación (RASE). Conecta las distintas subestaciones con los ATI y ATF a través de dos anillos de fibra óptica oscura de tipo monomodo. La fibra óptica se distribuye por un lado de la vía y vuelve por el otro, en donde cada instalación se va conectando a la FO del lado de la vía donde se ubica esta, cerrándose el anillo en los ATF y formando una red *Ethernet* en anillo a 1 Gb/s. Utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-101.
- Red Local Subestación (RLSE). Está formada por dos anillos de fibra óptica de tipo multimodo en donde se conectan los diferentes equipos de la instalación eléctrica a través de *switches*. Cada posición dotada de una Unidad de Control de Posición (UCP), compuesta por UC y UP, se conecta a un *switch* formando de esta manera una red *Ethernet* en anillo de 100 Mb/s denomina red *EFI.P* y que utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-101.
- Red secundaria. Es la red interna de cada posición en donde se interconectan los *IED* con las UCP.

Para la conexión de la RLSE y la RASE se utilizan dos *PLC* de tipo industrial que realizan funciones de servidor intercambiando información entre ambas redes y gestionando, entre otros, los modos de mando de la instalación. Estos equipos se denominan Unidad de Control de Subestación (UCS) y Unidad de Control de Puesto de Autotransformación (UCPA), y se ubican en las subestaciones y centros de autotransformación respectivamente.

Por último, existe una cuarta red que es la que interconecta la RASE con el telemando de energía a través de la red de área amplia de Adif. Esta interconexión se realiza mediante dos pasarelas o *gateways* utilizando el protocolo *IEC* 60870-5-104 encapsulado sobre *TCP*. Los *gateways* son los encargados de convertir el protocolo *IEC* 60870-5-101 al *IEC* 60870-5-104 y viceversa.

En la figura 21 se muestra la interconexión de las distintas redes del sistema completo.

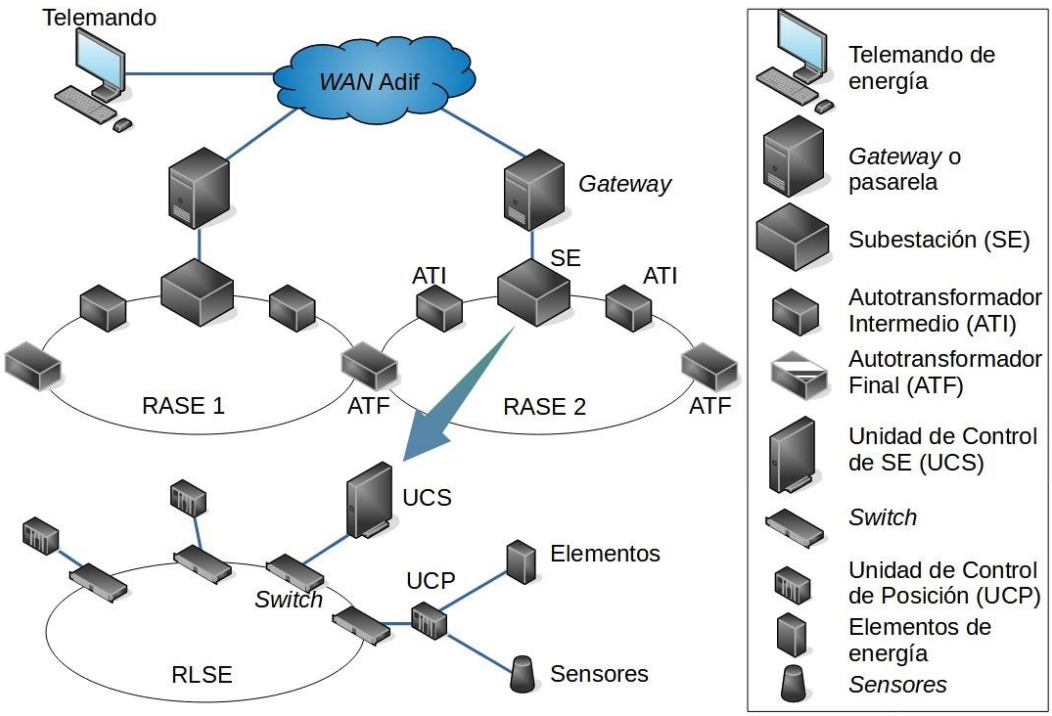


Figura 21.- Esquema del sistema completo.

3.2. Programa de simulación.

Para la selección del simulador se han analizado diferentes programas de simulación, pero se ha elegido el programa *IEC-Test* [9] porque, al ser el programa utilizado por el personal técnico de Siemens que desarrolla y mantiene el sistema *SCADA* que se utiliza en los telemandos de energía de Adif Alta Velocidad, está adaptado para poder utilizar la estructura de datos de los mapeados utilizados en Adif , se ha diseñado para realizar distintas pruebas de comunicaciones del protocolo *IEC* 104 mediante la simulación de diferentes señales para, posteriormente, poder analizar los resultados obtenidos y además, es un programa sencillo de configurar y manejar. También es un programa que se ha utilizado en diferentes trabajos de investigación como en [10] y [11].

Los demás programas analizados se han descartado porque presentaban ciertas limitaciones de uso.

También se ha utilizado la aplicación de código abierto *Wireshark* [12] como analizador de red ya que nos permite ver todo lo que ocurre en la red, capturando distintos paquetes para después poder realizar un análisis exhaustivo del tráfico.

Para realizar la simulación, el programa *IEC-Test* se ejecutó en dos ordenadores distintos dentro de la misma red, uno realizando la función de maestro y el otro de cliente. El

cliente se ha configurado con la dirección *IP* 192.168.1.223 y puerto 2404 y el maestro con la dirección *IP* 192.168.1.44 y puerto 51823.

En la figura 22 se muestra cómo se conectan los dos equipos a la misma red para realizar la simulación.

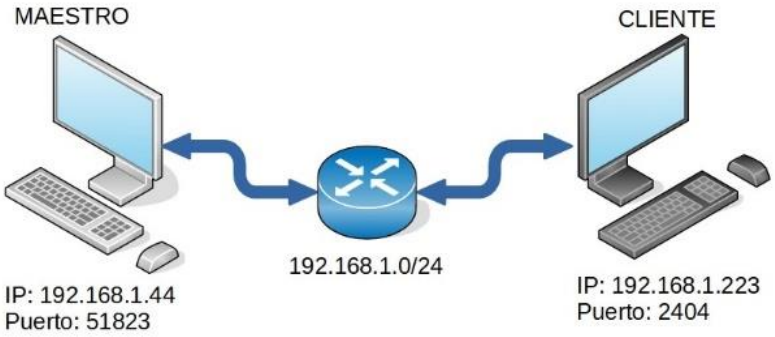


Figura 22.- Interconexión de equipos para la simulación.

A continuación, se va a explicar el manejo del programa de simulación, de los diferentes menús, así como la configuración necesaria para realizar la simulación.

3.2.1. Pantalla de inicio.

Como se muestra en la figura 23, la pantalla principal del *IEC-Test* se divide en tres secciones: la primera sección, que está situada en la parte superior, es un filtro para seleccionar determinados objetos de información; la segunda sección, en la parte media, es donde se introduce el mapeado de los objetos de información; y en la tercera sección, en la parte inferior, se muestran los estados de las conexiones.

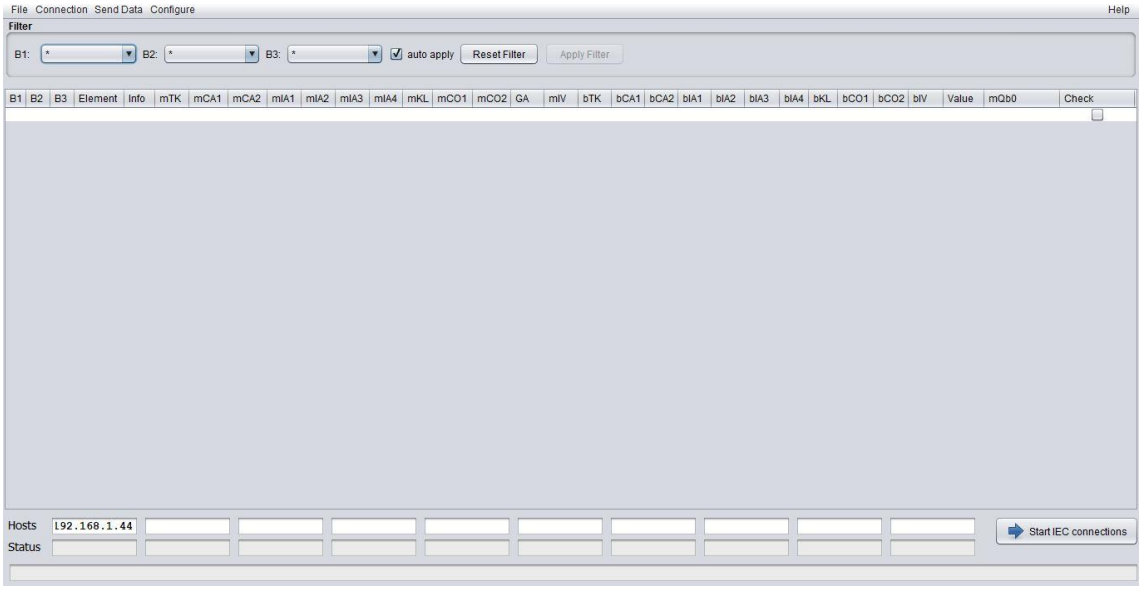


Figura 23.-Pantalla de inicio de la aplicación IEC-Test.

El filtro se utiliza para reducir la información que se muestra en pantalla cuando tenemos un mapeado de gran tamaño con distintas instalaciones, tipos de alimentación o elementos. Por ello, es necesario saber que el mapeado o conjunto de datos que se almacenan en la base de datos, sigue una estructura jerárquica de bloques, en donde la máxima jerarquía la ocupan los nombres de las instalaciones (campo B1), que a su vez se dividen en el tipo de fuente de alimentación (campo B2) y en los distintos elementos u objetos de información (campo B3).

El mapeado del maestro o cliente que queremos simular se muestra en la segunda sección. A continuación, se explican las columnas que se han utilizado:

- B1, B2 y B3: Los campos B1, B2 y B3 nos informan de a qué instalación o tipo de alimentación pertenece cada objeto de información.
- *Element*: Nombre para identificar el objeto de información.
- *Info*: Detalle sobre el objeto de información en cuestión.
- *mTK*: Tipo de *ASDU*. Cuando la aplicación se ejecuta en modo maestro, solo admitirá del tipo 45 al 51 y del 58 al 64 para poder ejecutar órdenes y si se ejecuta en modo cliente, solo admitirá del tipo 1 al 21 y del 30 al 40 para poder enviar informaciones.
- *mCA1 y mCA2*: Dirección común de la estación remota. Cuando la aplicación funciona en modo cliente, sería la dirección de la propia estación remota, pero si funciona en modo maestro, sería la dirección de la estación remota con la que queremos establecer comunicación. Se compone de dos *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *mCA1* el *byte* menos significativo.
- *mIA1, mIA2 y mIA3*: Dirección *IOA* del objeto de información. Si la aplicación está funcionando en modo cliente, sería la dirección del objeto que va a responder a una solicitud de interrogación general, si está funcionando en modo maestro, sería la dirección del elemento que se quiere controla y que tiene que coincidir con los campos *bIA1*, *bIA2* y *bIA3* del lado cliente. Se compone de tres *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *mIA1* el *byte* menos significativo.
- *bTK*: Tipo de orden *IEC* sobre el objeto de información. Este campo solo se rellena en el modo cliente para indicar al maestro que el elemento tiene un objeto de

información y otro de control. El tipo *bTK* del cliente debe coincidir con el tipo *mTK* del maestro.

- *bCA1 y bCA2*: Dirección común de la estación remota donde se ubica el objeto de información sobre el que se pueden ejecutar órdenes. Estos campos solo se rellenan en el cliente y deben coincidir con los campos *mCA1* y *mCA2* del maestro. Se compone de dos *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *bCA1* el *byte* menos significativo.
- *bIA1, bIA2, bIA3*: Dirección *IOA* del objeto de información sobre el que se pueden ejecutar órdenes. Estos campos solo se rellenan en el cliente y deben coincidir con los campos *mIA1*, *mIA2* y *mIA3* del maestro. Se compone de tres *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *bIA1* el *byte* menos significativo.
- *Value*: Valor que se simula. En el caso de utilizar valores con decimales, el separador de decimales es el punto. Si se utilizase cualquier otro signo de puntuación o si este campo estuviese vacío, no sería posible enviar una orden y tampoco se enviaría la información correspondiente como respuesta a una solicitud de interrogación general.
- *mQb0*: Calidad de la señal.
- *Check*: Es una lista de comprobación, por lo tanto, se utiliza para verificar manualmente aquellas órdenes o informaciones que se han enviado y ejecutado correctamente.

En la tercera sección se van a mostrar los estados de las diferentes conexiones que se utilicen. Cuando se establezca una conexión, en el campo *Status* se mostrará la palabra *Started*.

3.2.2. Barra de opciones.

Una vez explicadas las diferentes partes de la pantalla principal, se va a continuar con la barra de opciones de la aplicación.

En la figura 24 se muestran las opciones del menú *File* desde donde se puede crear un mapeado nuevo, abrir un mapeado existente o guardar el mapeado actual, así como salir del programa.

Los datos se tienen que almacenar en un archivo de *Excel* como valores separados por comas.

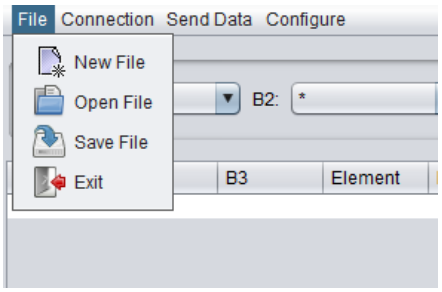


Figura 24.- Opciones del menú File de la aplicación IEC-Test.

En la figura 25, se muestran las opciones del menú *Connection* desde donde se pueden iniciar o parar las conexiones con los *hosts*.

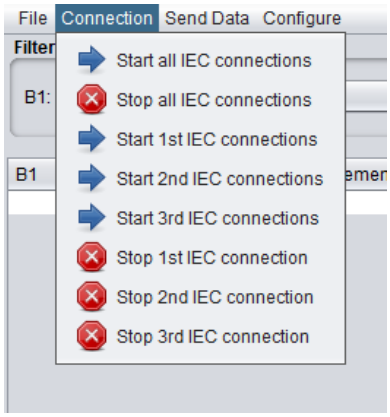


Figura 25.- Opciones del menú Connection de la aplicación IEC-Test.

En la figura 26 se muestra el menú *Send Data*.

En este punto, hay que tener en cuenta que únicamente se van a poder enviar aquellos datos que tengan algún valor en el campo *Value*, independientemente de que el envío se realice mediante alguna opción del menú *Send Data* o en respuesta de una solicitud de interrogación general.

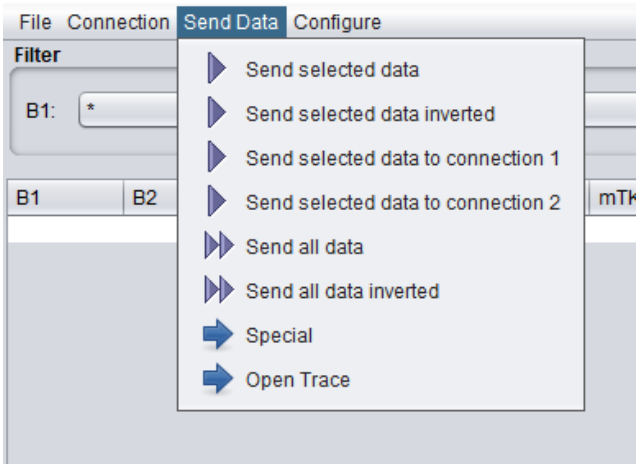


Figura 26.- Opciones del menú Send Data de la aplicación IEC-Test.

A continuación, se explican las distintas opciones:

- *Send selected data*: Se envía el dato seleccionado.
- *Send selected data inverted*: Se envía el dato seleccionado con el valor invertido.
- *Send selected data to connection 1, 2:* Se envía el dato seleccionado a la conexión 1 o 2 en el caso de tener varios hosts configurados.
- *Send all data:* Se envían todos los datos.
- *Send all data inverted:* Se envían todos los datos con el valor invertido.
- *Special:* Esta opción abre una nueva ventana desde donde se pueden envía tramas de error (*TK135*) o de interrogación general (*TK100*). En nuestro caso únicamente se ha utilizado la trama de interrogación general, en donde es necesario introducir la dirección *CASDU*, también llamada *COA*, de la estación remota que queremos interrogar y la *COT*.

  La ventana *Special Telegrams* se muestra en la figura 27.

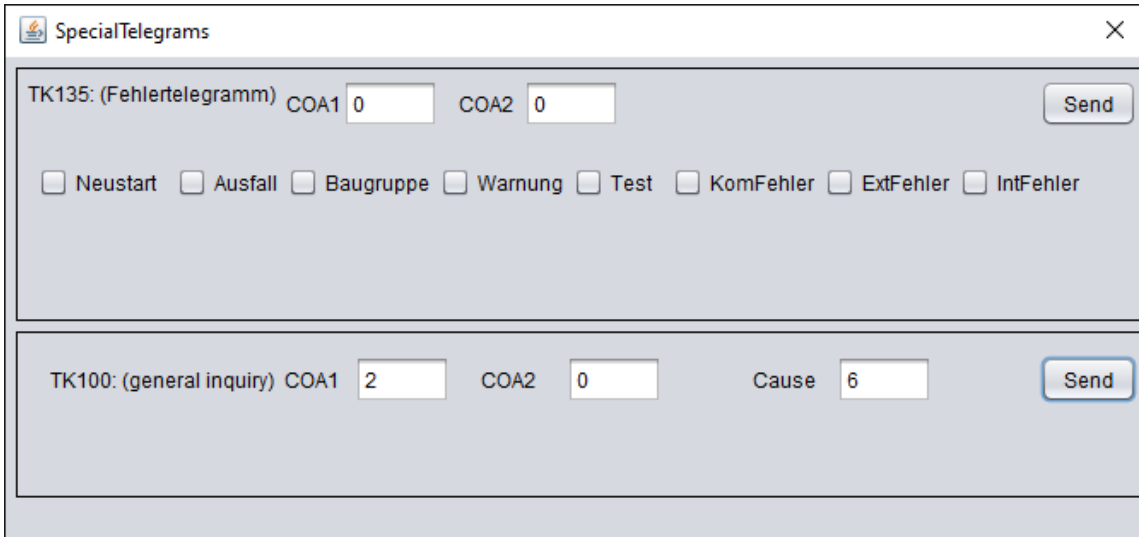


Figura 27.- Ventana Special Telegrams de la aplicación IEC-Test.

- *Open Trace*: Abre una ventana en donde se muestra el estado de la conexión, así como las tramas enviadas y recibidas para poder analizarlas.

Por último, tenemos menú *Help*, desde donde se abre una ventana con un manual de ayuda muy básico, y el menú *Configure*, que se va a detallar en los siguientes apartados para diferenciar la configuración del cliente y del maestro.

3.2.3. Configuración inicial del cliente.

Para realizar la configuración del cliente, tenemos que abrir la ventana *Properties* desde el menú *Configure* y aquí se introducirá la dirección *IP* del maestro, así como el puerto a través del cual se va a establecer la comunicación con el maestro. Los datos de configuración se muestran en la figura 28.

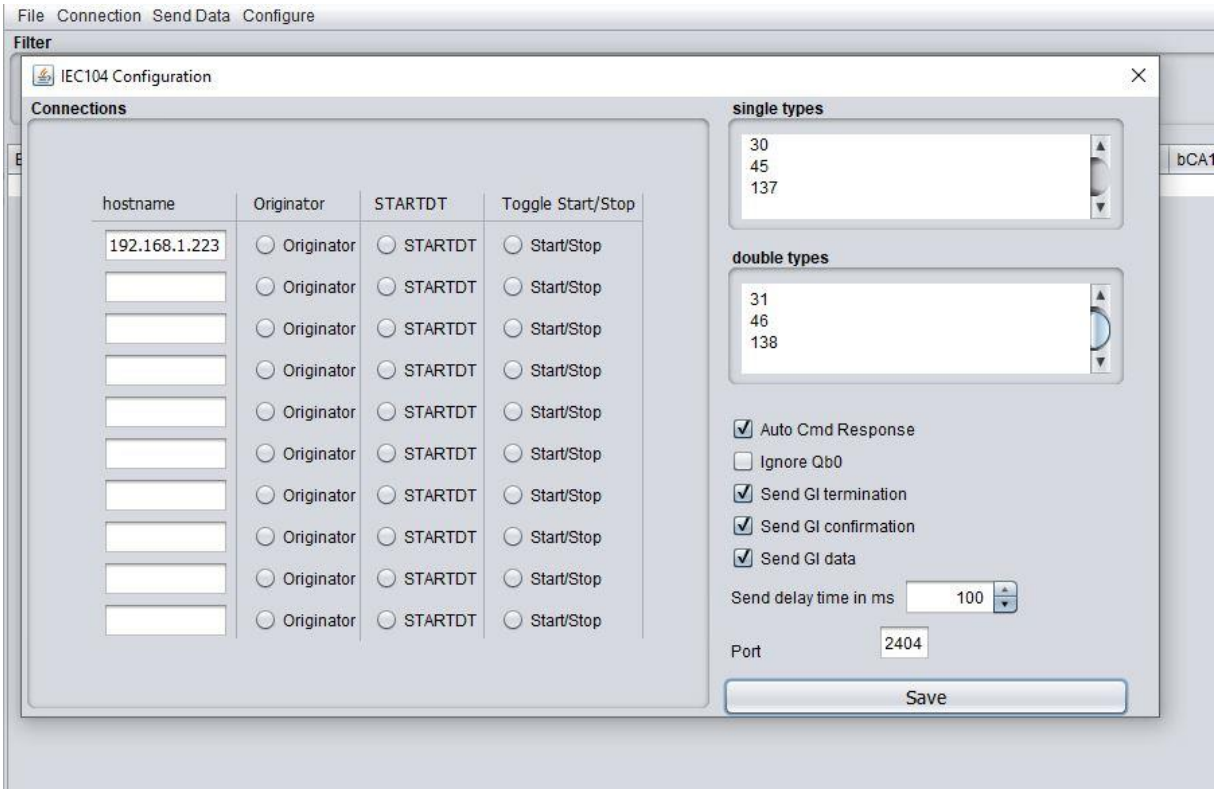


Figura 28.- Configuración del cliente en la aplicación IEC-Test.

A continuación, se indica el significado de los distintos elementos de la ventana de configuración:

- *Host name:* Se introduce la dirección IP del maestro.
- *Originator*: Indica quién inicia la comunicación. Como en este caso estamos configurando el cliente, se deja sin activar.
- *STARTDT*: Si la activamos se enviaría la trama de comienzo de transmisión de datos. Solo la activaremos en la configuración del maestro ya que será quien inicie la comunicación.
- *Toggle Start/Stop*: Solo se utiliza para pruebas especiales.

- *Auto Cmd Response*: Cuando está activo, simula el cambio de estado de una orden recibida generando las correspondientes respuestas. Solo es posible la simulación de un cambio de estado en aquellos elementos que tengan definidas direcciones *IEC* de información y control.
- *Ignore Qb0*: Envía todos los datos como ACTUAL (9) sin tener en cuenta la columna mQb0.
- *Send GI termination*: Envía la trama de finalización del comando de interrogación general.
- *Send GI confirmation*: Envía la trama de confirmación del comando de interrogación general.
- *Send GI data*: El cliente, después de recibir un comando de interrogación general, enviará al maestro todos los datos que tengan relleno el campo *Value*.
- *Send delay time in ms*: Retrasa el envío de los mensajes el número de milisegundos que se haya especificado.
- *Port*: Se indica el puerto a través del cual el cliente estará escuchando.
- *Single and double types*: Se declaran las variables de tipo simple y doble que se van a utilizar para que el simulador muestre el menú contextual correspondiente. En el caso de variables de tipo simple, en el menú contextual solo se mostrarán las opciones de *ON* y *OFF*, mientras que, en el de las variables de tipo doble también aparecerán las opciones *INTERMEDIATE* y *DISTURBED*.

3.2.4. Configuración inicial del maestro.

Para realizar la configuración del maestro, se ha procedido a rellenar la caja de texto *Host name* y *Port* con la dirección *IP* y el puerto del cliente. En este caso, al ser el maestro el que inicia la comunicación se han marcado las casillas de verificación de *Originator* y *STARTDT*. Además, se han declarado en las cajas de texto *single types* y *double types* las señales de control de tipo simple y de tipo doble que se van a utilizar en el mapeado para que se muestre un menú contextual con diferentes opciones al pulsar el botón derecho del ratón sobre alguna de ellas.

La configuración del maestro se muestra en la figura 29.

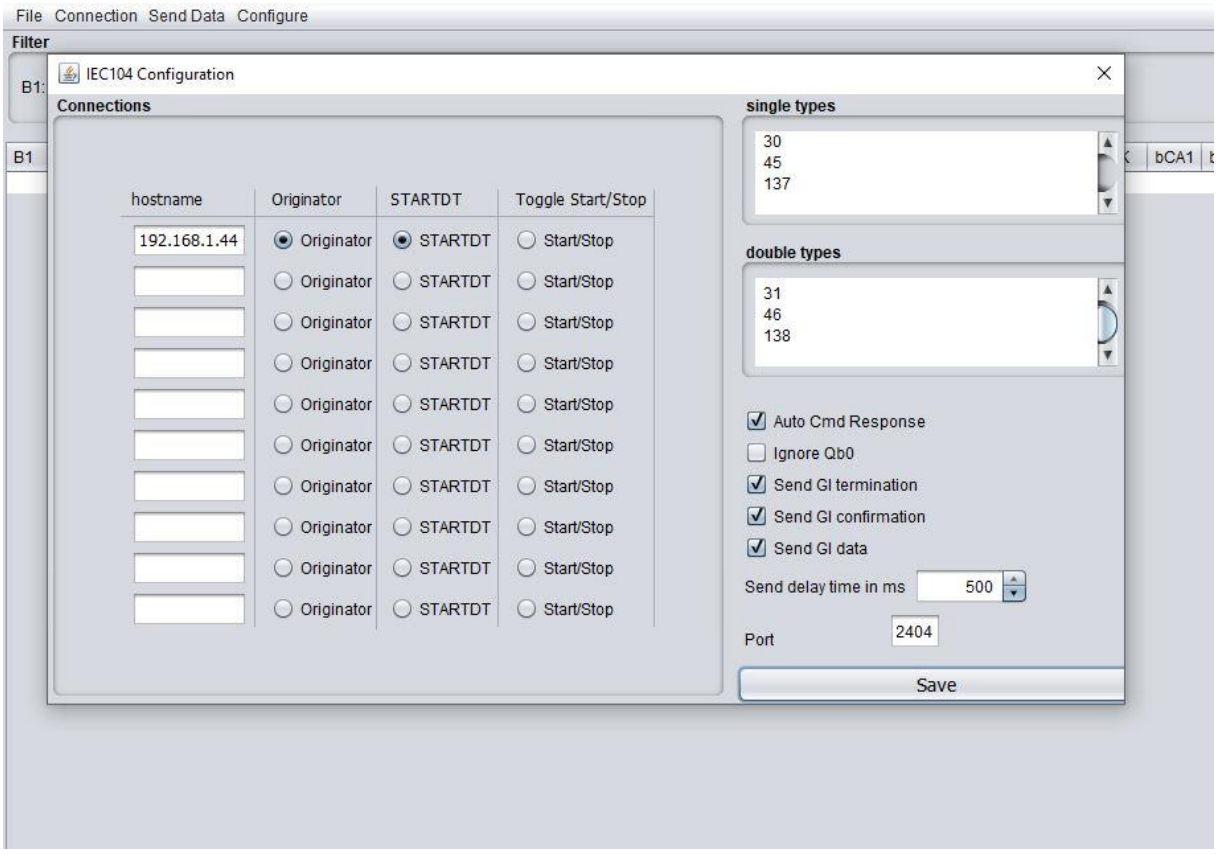


Figura 29.- Configuración del maestro en la aplicación IEC-Test.

A continuación, se indica el significado de los distintos elementos de la ventana de configuración:

- *Host name:* Se introduce la dirección IP del cliente.
- *Originator*: Indica quién inicia la comunicación. Como se va a configurar como maestro, se activa la casilla de verificación.
- *STARTDT*: Como el maestro es quien inicia la comunicación y queremos que se envíe la trama de comienzo de transmisión de datos, se activa la casilla de verificación.
- *Toggle Start/Stop*: Solo se utiliza para pruebas especiales.
- *Auto Cmd Response*: No se utiliza en modo maestro.
- *Ignore Qb0*: Envía todos los datos como ACTUAL (9) sin tener en cuenta la columna mQb0.
- *Send GI*: Envía la trama de finalización del comando de interrogación general.

- *Send GI confirmation*: Envía la trama de confirmación del comando de interrogación general.
- *Send GI data*: El cliente, después de recibir un comando de interrogación general, enviará al maestro todos los datos que tengan relleno el campo *Value*.
- *Send delay time in ms*: Retrasa el envío de los mensajes el número de milisegundos que se haya especificado.
- *Port*: Se indica el puerto a través del cual el cliente estará escuchando.
- *Single and double types*: Se declaran las variables de tipo simple y doble que se van a utilizar para que el simulador muestre el menú contextual correspondiente. En el caso de variables de tipo simple, en el menú contextual solo se mostrarán las opciones de *ON* y *OFF*, mientras que, en el de las variables de tipo doble también aparecerán las opciones *INTERMEDIATE* y *DISTURBED*.

3.3. Mapeado de *MTU* y *RTU*.

Por tamaño y simplicidad se ha elegido una estación remota de catenaria para realizar la simulación.

Se han utilizado dos mapeados diferentes, uno para el cliente en donde se incluyen los elementos de información y de control, y otro para el maestro en donde se incluyen únicamente los elementos de control.

3.3.1. Estructura de las tablas de mapeado.

Los mapeados son un conjunto de datos que se almacenan en una base de datos. En nuestro caso siguen una estructura jerárquica de bloques, en donde la máxima jerarquía la ocupan los nombres de las instalaciones (campo B1), que a su vez se dividen en el tipo de fuente de alimentación (campo B2) y en los distintos elementos u objetos de información (campo B3).

Los mapeados se componen de los siguientes datos:

- B1, B2 y B3: Los campos B1, B2 y B3 nos informan de a qué instalación o tipo de alimentación pertenece cada objeto de información.
- *Element*: Nombre para identificar el objeto de información.
- *Info*: Detalle sobre el objeto de información en cuestión.

- *mTK*: Tipo de *ASDU*. Cuando la aplicación se ejecuta en modo maestro, solo admitirá del tipo 45 al 51 y del 58 al 64 para poder ejecutar órdenes y si se ejecuta en modo cliente, solo admitirá del tipo 1 al 21 y del 30 al 40 para poder enviar informaciones.

- *mCA1 y mCA2*: Dirección común de la estación remota. Cuando la aplicación funciona en modo cliente, sería la dirección de la propia estación remota, pero si funciona en modo maestro, sería la dirección de la estación remota con la que queremos establecer comunicación. Se compone de dos *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *mCA1* el *byte* menos significativo.

- *mIA1, mIA2 y mIA3*: Dirección *IOA* del objeto de información. Si la aplicación está funcionando en modo cliente, sería la dirección del objeto que va a responder a una solicitud de interrogación general, si está funcionando en modo maestro, sería la dirección del elemento que se quiere controla y que tiene que coincidir con los campos *bIA1*, *bIA2* y *bIA3* del lado cliente. Se compone de tres *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *mIA1* el *byte* menos significativo.

- *bTK*: Tipo de orden *IEC* sobre el objeto de información. Este campo solo se rellena en el modo cliente para indicar al maestro que el elemento tiene un objeto de información y otro de control. El tipo *bTK* del cliente debe coincidir con el tipo *mTK* del maestro.

- *bCA1 y bCA2*: Dirección común de la estación remota donde se ubica el objeto de información sobre el que se pueden ejecutar órdenes. Estos campos solo se rellenan en el cliente y deben coincidir con los campos *mCA1* y *mCA2* del maestro. Se compone de dos *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *bCA1* el *byte* menos significativo.

- *bIA1, bIA2, bIA3*: Dirección *IOA* del objeto de información sobre el que se pueden ejecutar órdenes. Estos campos solo se rellenan en el cliente y deben coincidir con los campos *mIA1*, *mIA2* y *mIA3* del maestro. Se compone de tres *bytes* cuyos valores se introducen en decimal siendo *bIA1* el *byte* menos significativo.

- *Value*: Valor que se simula. En el caso de utilizar valores con decimales, el separador de decimales es el punto. Si se utilizase cualquier otro signo de puntuación o si este campo estuviese vacío, no sería posible enviar una orden y

tampoco se enviaría la información correspondiente como respuesta a una interrogación general.

- *mQb0*: Calidad de la señal.

3.3.2. Mapeado del cliente.

La tabla con el mapeado utilizado para la simulación del cliente se puede ver en el apéndice 6.

3.3.3. Mapeado del maestro.

La tabla con el mapeado utilizado para la simulación del maestro se puede ver en el apéndice 7.

3.4. Planificación de escenarios.

Se van a planificar tres escenarios de simulación para comprobar cómo se realiza la comunicación y poder analizar si se producen los mismos eventos que ocurrirían un el sistema real.

El sistema de comunicaciones que se utiliza para maniobrar a distancia los diferentes elementos que componen el sistema de energía en Adif, se compone, de forma simplificada como se muestra en la figura 30, de un sistema *SCADA* para el telecontrol de los elementos de energía, una red *WAN* de fibra óptica por donde se transmiten los datos, un *gateway* o pasarela para la conversión entre protocolos *IEC* 104 e *IEC* 101 y, por último, las estaciones remotas.

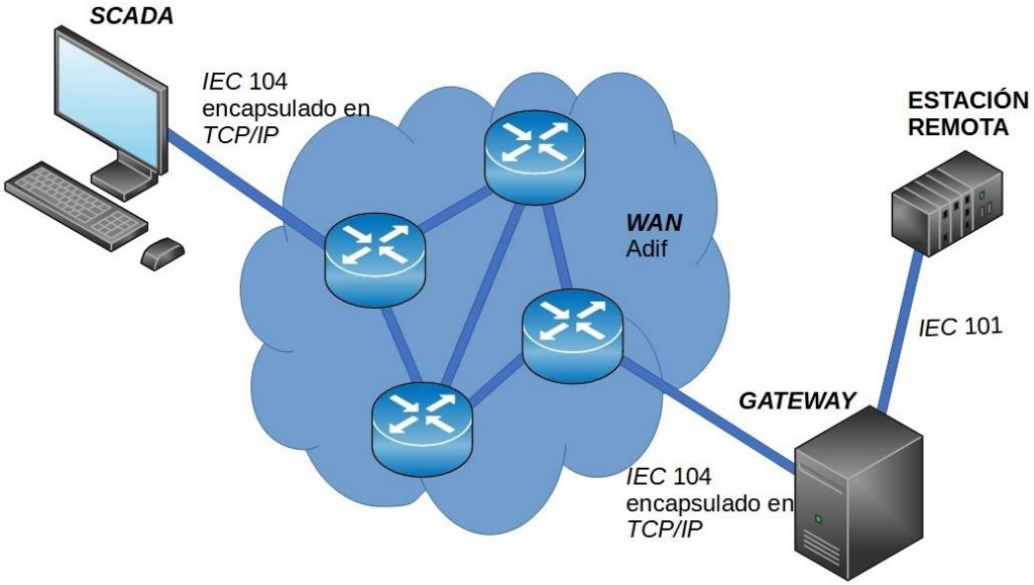


Figura 30.- Sistema de comunicaciones de Adif simplificado.

En nuestro caso, para analizar el protocolo *IEC* 104 que es el que se está estudiando en este trabajo fin de grado, se va a realizar la simulación de los distintos escenarios entre un centro de control y una estación remota únicamente utilizando el protocolo *IEC* 104, eliminando el *gateway* del sistema tal y como se muestra en la figura 31.

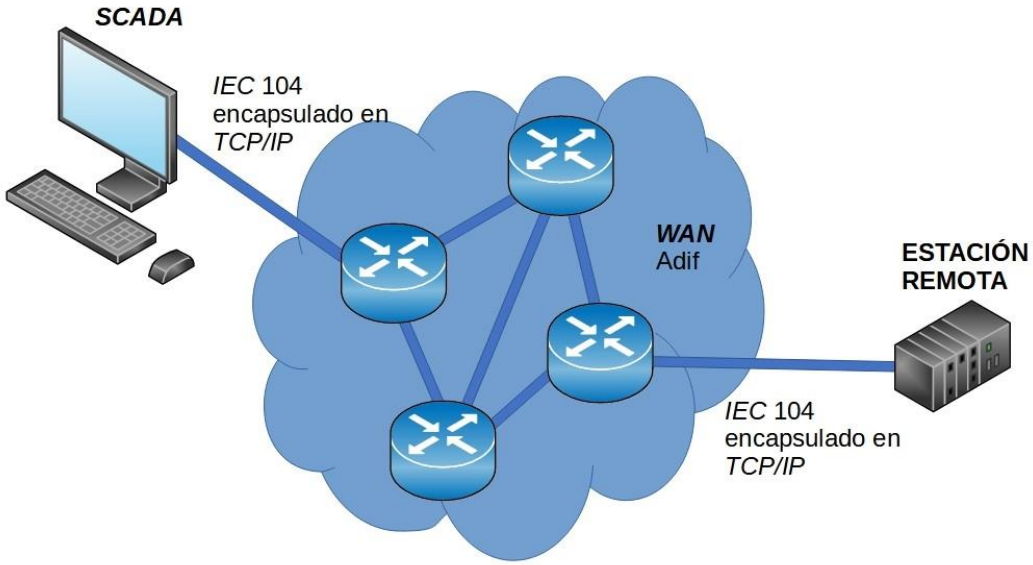


Figura 31.- Sistema simulado simplificado.

3.4.1. Primer escenario.

En el primer escenario se va a comprobar si el simulador realiza el intercambio de mensajes *STARTDT* para habilitar la transferencia de datos entre un maestro y un cliente. Mientras la transferencia de datos esté habilitada se podrá enviar y recibir órdenes o informaciones.

Para finalizar la transferencia de datos sería necesario enviar un mensaje *STOPDT*, pero esto no es posible con el simulador utilizado.

Para que el simulador realice el intercambio de mensajes *STARTDT*, al realizar la configuración del maestro, es necesario marcar la casilla de verificación *STARTDT* para que al realizar la conexión con el cliente se envíe automáticamente la trama *STARTDT Act*.

El diagrama de mensajes a intercambiar debería ser como el que se muestra en la figura 32.

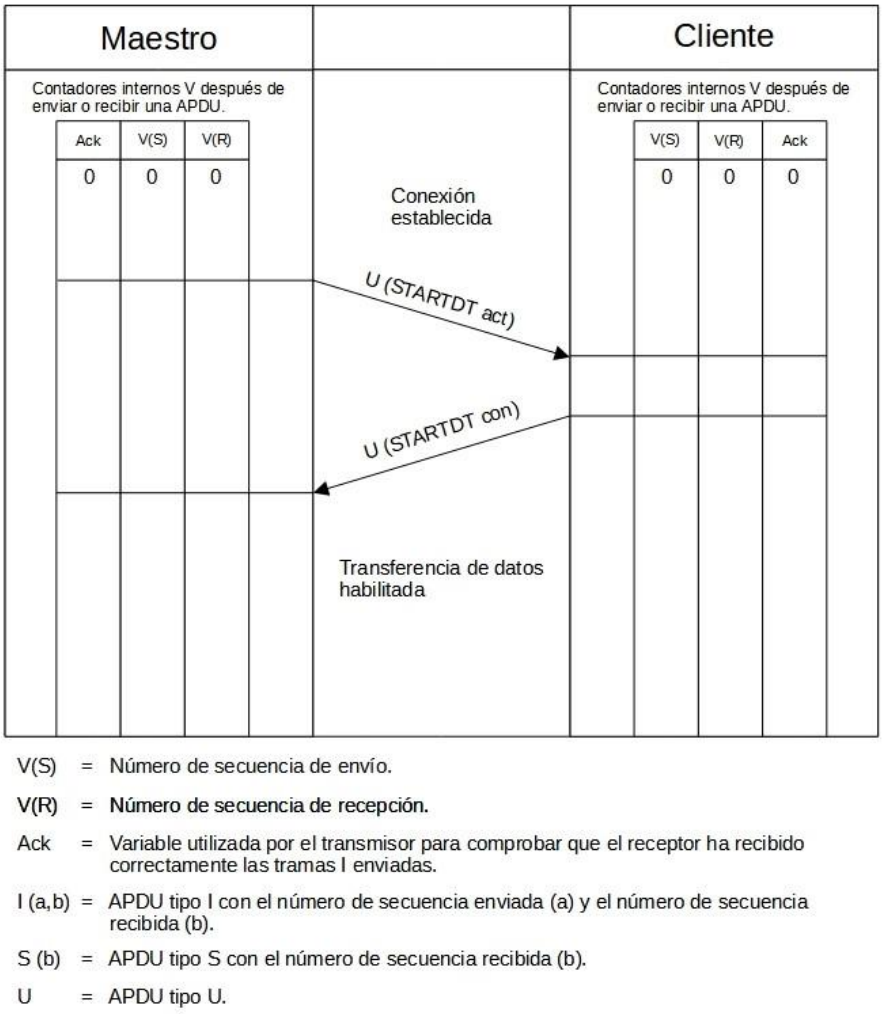


Figura 32.- Secuencia de mensajes STARTDT.

3.4.2. Segundo escenario.

En el segundo escenario se va a enviar una solicitud de interrogación general desde el maestro para que el cliente informe de los estados o valores actuales de los distintos elementos que controla.

Para poder realizar la solicitud interrogación general es necesario conocer la dirección común de la estación remota que estamos simulando y hay que indicar la causa de transmisión. En nuestro caso, la *CASDU* de la estación remota es la 2 y la *COT* va a ser una solicitud de activación que se corresponde con el valor 6.

Desde el menú «*Send Data - Special*» y en la sección TK100, completamos la *CASDU* y la *COT* con los valores indicados anteriormente y pulsamos el botón *Send*.

En función del número de elementos que controle el cliente, se deberá recibir una secuencia de mensajes similar a los mostrados en la figura 33.

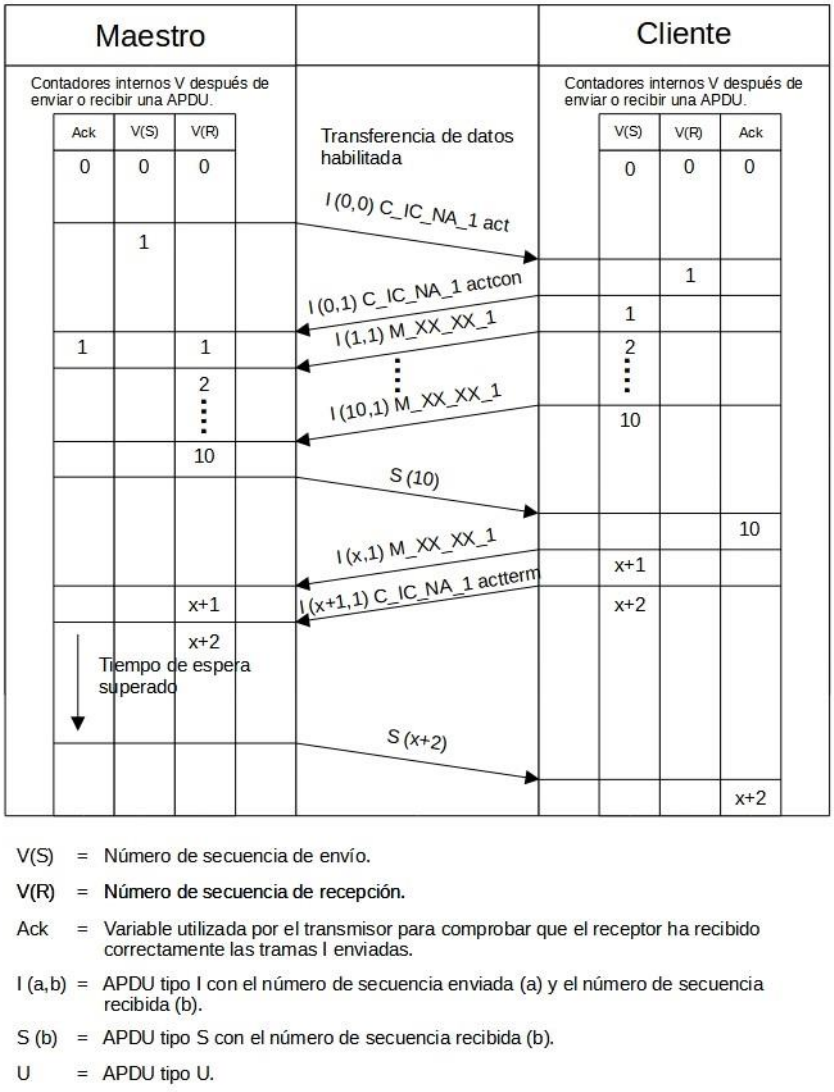


Figura 33.- Secuencia de mensajes en una solicitud de interrogación general.

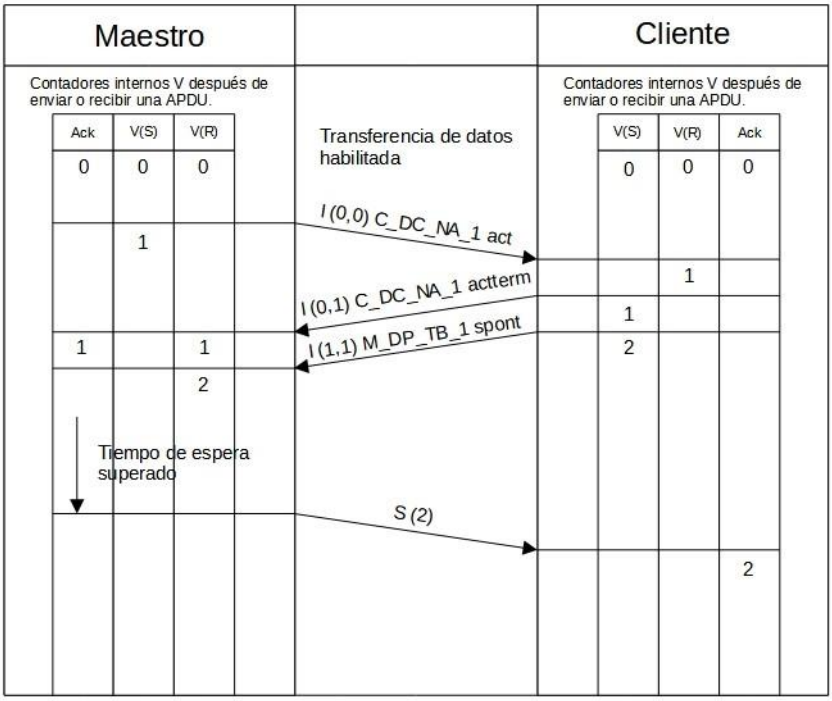
3.4.3. Tercer escenario.

En el tercer escenario se va a enviar una orden de apertura de un seccionador desde el maestro en donde el cliente confirmará la orden y, una vez se ha realizado el movimiento del elemento, indicará la posición final.

Las órdenes para la apertura y cierre de los seccionadores son de tipo 46 (orden de tipo doble) porque podemos tener cuatro estados distintos: abierto, cerrado, indefinido e inválido, en función del valor de los sensores de final de carrera.

Para enviar la orden desde el maestro es necesario que se seleccione la opción adecuada desde el menú contextual que se muestra al pulsar el botón derecho sobre el elemento que se quiera maniobrar.

En la figura 34 se muestra la secuencia de mensajes intercambiados que se deberá ejecutar.



V(S) = Número de secuencia de envío.

V(R) = Número de secuencia de recepción.

Ack = Variable utilizada por el transmisor para comprobar que el receptor ha recibido correctamente las tramas I enviadas.

I (a,b) = APDU tipo I con el número de secuencia enviada (a) y el número de secuencia recibida (b).

S (b) = APDU tipo S con el número de secuencia recibida (b).

U = APDU tipo U.

Figura 34.- Secuencia de mensajes en una orden de tipo 46.

4. RESULTADOS

La simulación del protocolo *IEC* 104 es un instrumento necesario que nos permite ejecutar y probar diferentes escenarios y soluciones sin riesgo y con un coste mínimo.

En concreto, el programa de simulación *IEC-Test*, nos permite realizar pruebas con dispositivos y aplicaciones reales, de forma que se puede simular el perfil de un maestro o de un cliente para que se comuniquen con equipos reales.

Además, el uso de un simulador va a ser útil para analizar posibles problemas con diferentes señales y para explorar diferentes alternativas con las que resolver los fallos de forma que se consigue una mayor calidad y fiabilidad, así como también se evitan costes y desplazamientos innecesarios del personal de campo.

También va a ser útil para comprobar en campo si las estaciones remotas están correctamente configuradas al poder interactuar con el simulador, facilitando la revisión, modificación y optimización de estas.

A continuación, se van a analizar los resultados obtenidos de la simulación realizada entre un maestro y un cliente ubicados en la misma red local. La simulación ha consistido en observar el intercambio de mensajes entre el maestro y el cliente ante el envío de los mensajes de habilitación de la transferencia de datos, de solicitud de una interrogación general y de orden de apertura de un seccionador.

Para realizar la captura de las tramas intercambiadas entre el maestro y el cliente se ha utilizado el analizador de red *Wireshark*, en donde mediante la aplicación del filtro «*IEC*60870_104», se van a poder filtrar todas las tramas correspondientes al protocolo *IEC* 104 para explicarlas detalladamente.

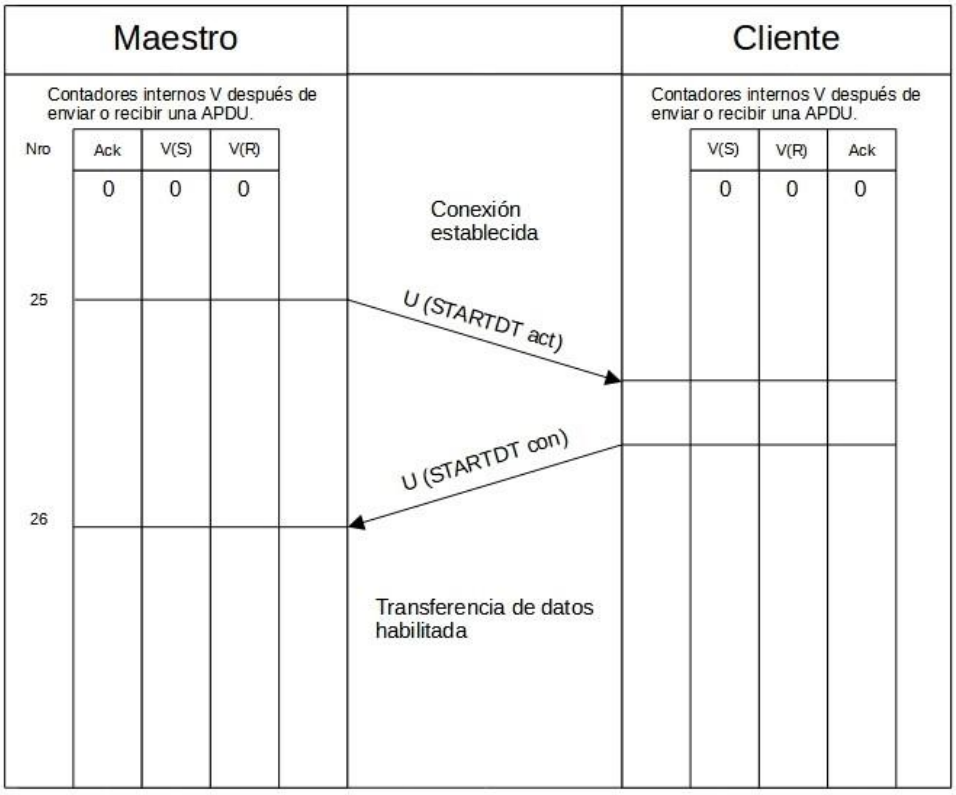
4.1. Envío de mensaje *STARTDT*.

Lo primero que se va a realizar es el establecimiento de la conexión entre el maestro y el cliente para habilitar la transferencia de datos. Por lo tanto, una vez configurados ambos, se pulsa el botón «*Start IEC Connections*» del cliente para que inicie la escucha en el puerto 2404 y, después, se realiza el mismo procedimiento en el maestro para que se establezca la comunicación. Como en la configuración del maestro estaba seleccionada la casilla de verificación «*STARTDT*», una vez establecida la comunicación se van a intercambiar los mensajes para habilitar el intercambio de datos.

En funcionamiento normal, la trama *STARTDT* se enviará una sola vez después de que se haya establecido la conexión *TCP* inicial. Una vez se reciba la confirmación de la estación remota, la transferencia de datos se mantendrá activa, y tanto el maestro como el cliente podrán enviar mensajes en cualquier momento, hasta que el maestro desactive la transferencia de datos mediante el comando *STOPDT*.

4.1.1. Diagrama de intercambio de mensajes *STARTDT*.

En la figura 35 se muestra el diagrama de intercambio de mensajes que se realiza entre el maestro y el cliente para activar la transferencia de datos una vez se ha establecido la comunicación.



V(S) = Número de secuencia de envío.

V(R) = Número de secuencia de recepción.

Ack = Variable utilizada por el transmisor para comprobar que el receptor ha recibido correctamente las tramas I enviadas.

I (a,b) = APDU tipo I con el número de secuencia enviada (a) y el número de secuencia recibida (b).

S (b) = APDU tipo S con el número de secuencia recibida (b).

U = APDU tipo U.

Nro = Número de trama capturada con *Wireshark*.

Figura 35.- Secuencia de mensajes STARDT capturados con Wireshark.

4.1.2. Envío de mensaje de control *STARTDT*.

La activación de la transferencia de datos entre el maestro y el cliente comienza con dos tramas de tipo U.

Como se muestra en la figura 36, el maestro es el encargado de realizar la activación de la transferencia de datos con la trama de activación número 25 (*STARDT Act*).

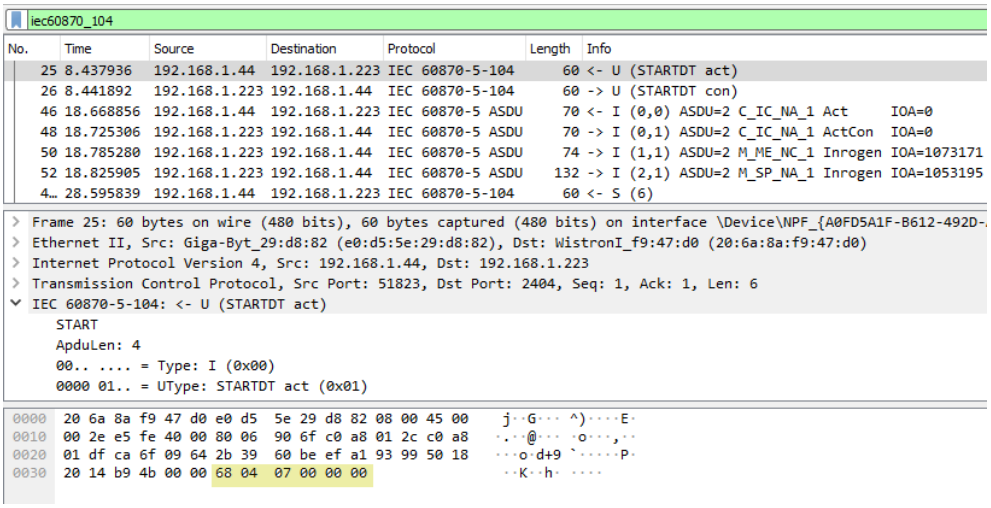


Figura 36.- Captura Wireshark - Mensaje «STARTDT Act».

Los valores hexadecimales de la *APDU* de la trama *STARTDT Act* nos indican lo siguiente:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 04 → Nos indica que la longitud de la trama son cuatro *bytes* y se corresponde con los cuatro campos de control.
- 07 → Primer campo de control en donde nos indica que es una trama de tipo U (dos *bits* menos significativos a 1) y que se está usando la función *STARTDT Activation* (tercer *bit* menos significativo a 1).
- 00 → Segundo campo de control (no utilizado en trama tipo U).
- 00 → Tercer campo de control (no utilizado en trama tipo U).
- 00 → Cuarto campo de control (no utilizado en trama tipo U).

4.1.3. Respuesta al mensaje de control *STARTDT*.

Como se muestra en la figura 37, nuestra estación remota contesta con la trama de confirmación número 26 (*STARTDT Con*).

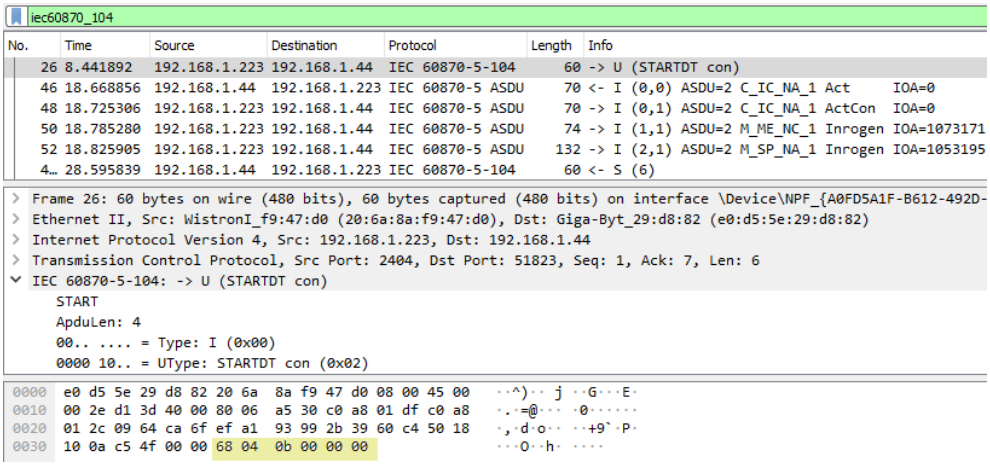


Figura 37.- Captura Wireshark - Mensaje «STARTDT Con».

Los valores hexadecimales de la *APDU* de la trama *STARTDT Con* nos indican lo siguiente:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 04 → Nos indica que la longitud de la trama son cuatro *bytes* y se corresponde con los cuatro campos de control.
- 0B → Primer campo de control en donde nos indica que es una trama de tipo U (dos *bits* menos significativos a 1) y que se está usando la función *STARTDT Confirm* (cuarto *bit* menos significativo a 1).
- 00 → Segundo campo de control (no utilizado en trama tipo U).
- 00 → Tercer campo de control (no utilizado en trama tipo U).
- 00 → Cuarto campo de control (no utilizado en trama tipo U).

4.2. Envío de una señal de interrogación general.

Una vez establecida la comunicación y habilitada la transferencia de datos se va a realizar la simulación de una solicitud de interrogación general a la única estación remota que se está simulando.

Para poder realizar una interrogación general tenemos que conocer la dirección común de la estación remota que estamos simulando y la causa de transmisión. En nuestro caso, la dirección común de la estación remota es la número 2 y la causa de transmisión va a ser una solicitud de activación que se corresponde con el valor 6.

Una vez conocemos los datos necesarios, tenemos que ir al menú «*Send Data - Special*» y en la sección TK100, completamos la *CASDU* con el valor 2 y la *COT* con el valor 6.

A continuación, mientras tenemos activa la captura de datos con *Wireshark*, pulsamos el botón *Send*.

Mientras se mantiene activa la transferencia de datos, se podrán enviar órdenes en sentido control e informaciones en sentido monitor como se puede observar en la figura 38, en donde se muestra la orden de interrogación general (trama 46), la confirmación por parte del cliente (trama 48), las respuestas junto con la finalización de la interrogación general por parte del cliente (tramas 50 y 52) y la confirmación de recepción de tramas por parte del maestro (trama 459).

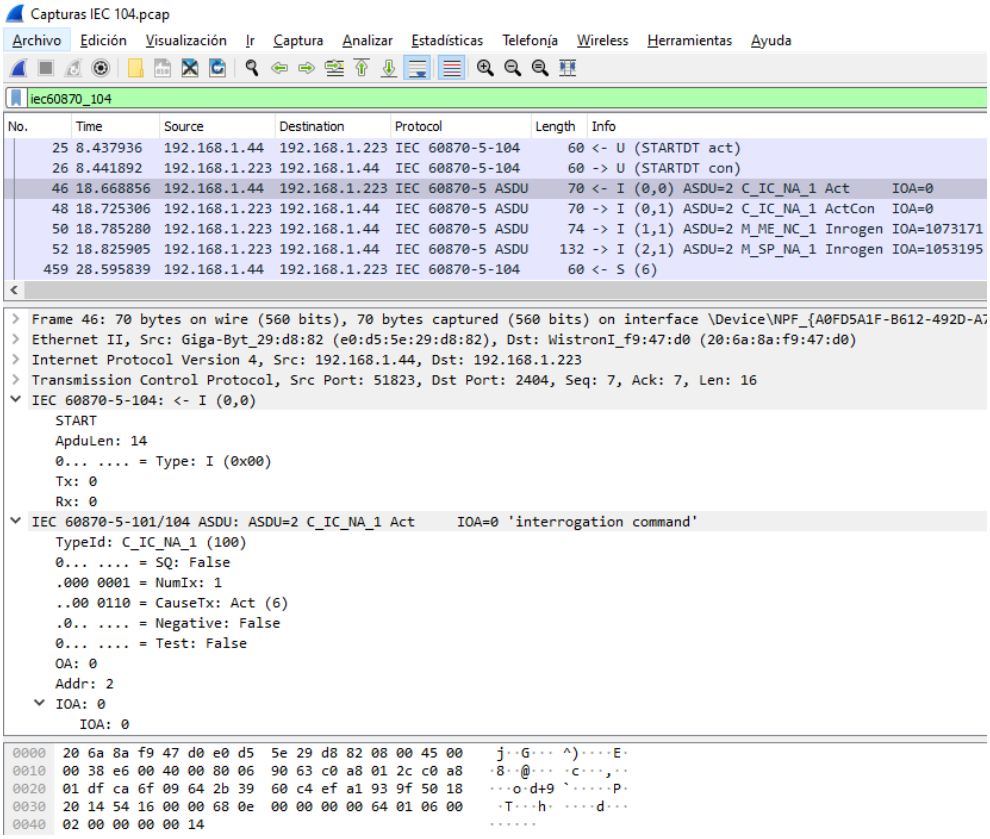
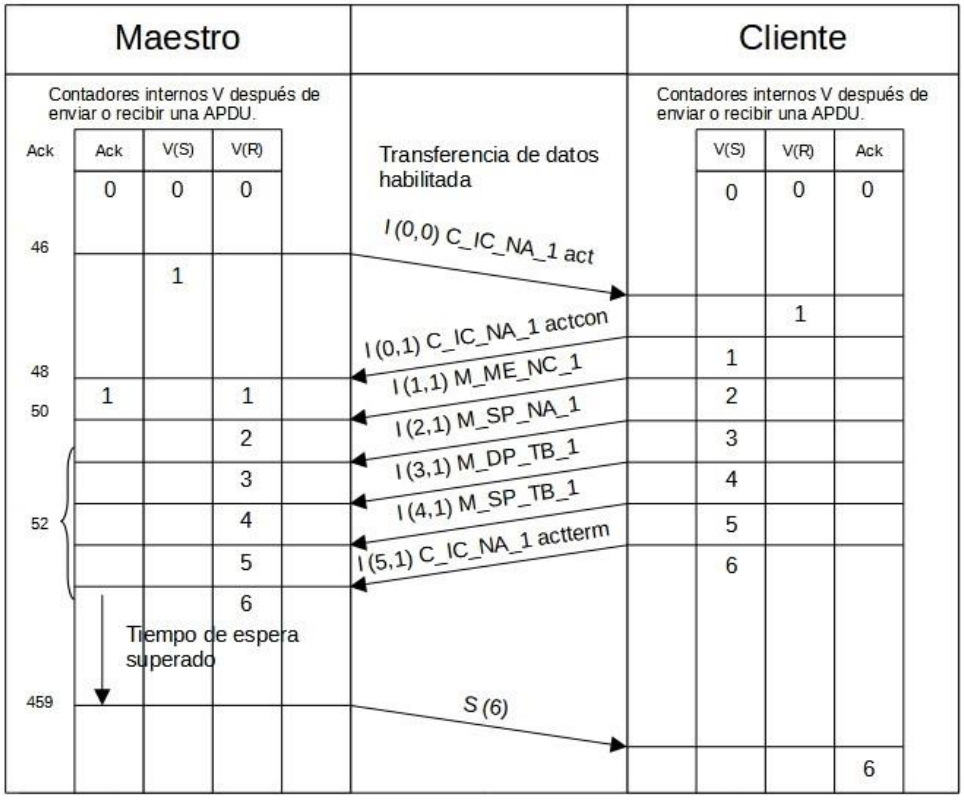


Figura 38.- Captura Wireshark - Mensajes interrogación general.

A continuación, se van a analizar 8 tramas; la trama de la orden de interrogación general C_IC_NA_1 *Act*, la trama de confirmación C_IC_NA_1 *ActCon*, varias tramas de información *Inrogen*: M_ME_NC_1, M_SP_NA_1, M_DP_TB_1 y M_SP_TB_1, una trama de finalización de interrogación general C_IC_NA_1 *ActTerm* y una trama tipo S de confirmación de tramas recibidas.

4.2.1. Diagrama de intercambio de mensajes al solicitar una interrogación general.

En la figura 39 se muestra el diagrama de intercambio de mensajes entre el maestro y la estación remota cuando se realiza la solicitud de interrogación general. Se muestran los mensajes enviados y recibidos con sus correspondientes contadores.



V(S) = Número de secuencia de envío.

V(R) = Número de secuencia de recepción.

Ack = Variable utilizada por el transmisor para comprobar que el receptor ha recibido correctamente las tramas I enviadas.

I (a,b) = APDU tipo I con el número de secuencia enviada (a) y el número de secuencia recibida (b).

S (b) = APDU tipo S con el número de secuencia recibida (b).

U = APDU tipo U.

Nro = Número de trama capturada con *Wireshark*.

Figura 39.- Secuencia de mensajes de una solicitud de interrogación general *capturados con Wireshark.*

4.2.2. Orden de interrogación general.

En la figura 40 se muestra la trama de la orden de interrogación general que envía el maestro al cliente.

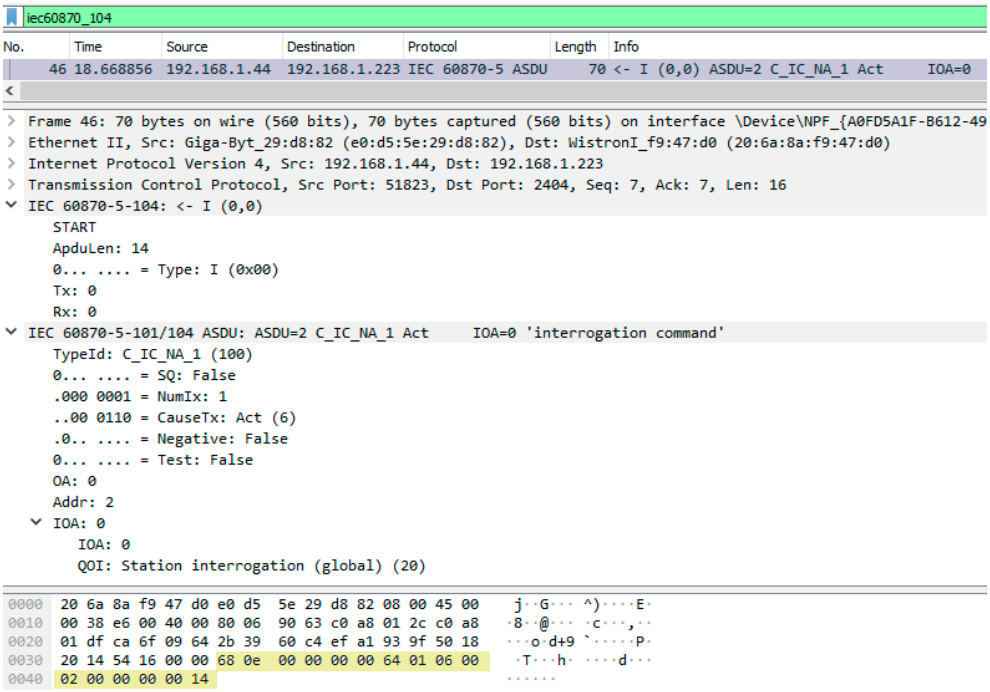


Figura 40.- Captura Wireshark - Mensaje de solicitud de interrogación general.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* de la orden de interrogación general cuyo valor en hexadecimal es 68 0E 00 00 00 00 64 01 06 00 02 00 00 00 00 14:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 00 → *Byte* Menos Significativo (*LSB*) del número de secuencia de envío. Como el *bit* 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *Byte* Más Significativo (*MSB*) del número de secuencia de envío.
- 00 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 64 → *ASDU* de tipo 100 (C_CI_NA_1). Orden de interrogación general.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 06 → Causa de la transmisión 6 (Activación).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.

- 00 00 00 → Dirección *IOA* (3 bytes). En *ASDU* de tipo 100 no se utiliza y, por lo tanto, se configura su valor a 0.
- 14 → Valor del campo información del elemento. Clasificación de la interrogación 20 (interrogación global de la estación remota).

4.2.3. Mensaje de confirmación de interrogación general.

En la figura 41 se muestra el mensaje de confirmación de interrogación general que envía el cliente al maestro.

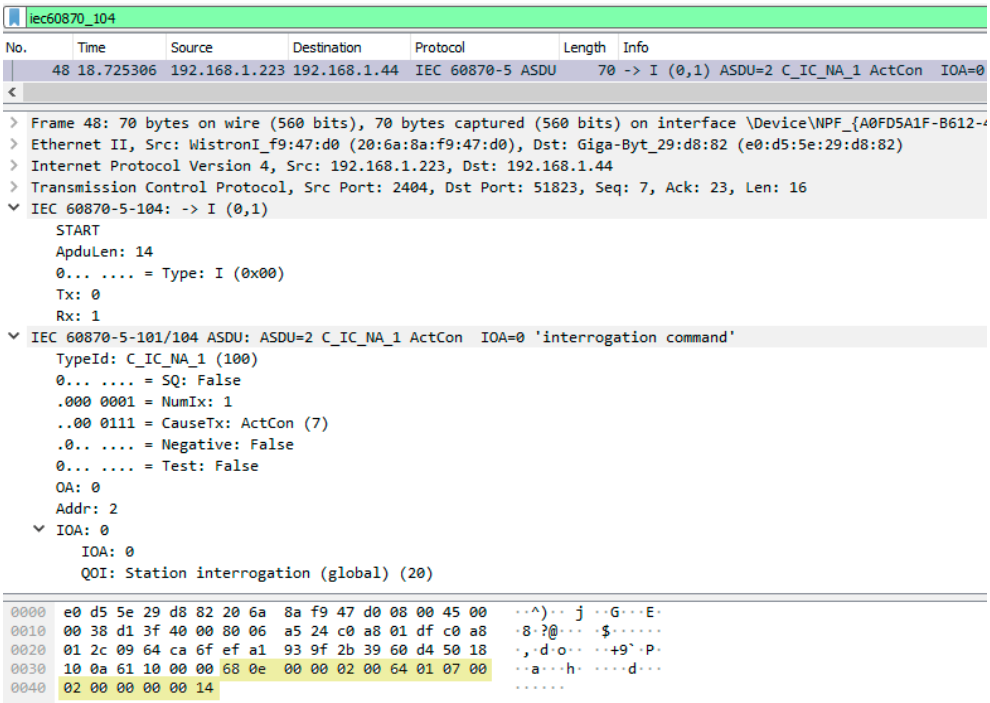


Figura 41.- Captura Wireshark - Mensaje de confirmación de interrogación general.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* del mensaje de confirmación, con la que responde el cliente, a la orden de interrogación general y cuyo valor en hexadecimal es 68 0E 00 00 02 00 64 01 07 00 02 00 00 00 00 14:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 00 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.

- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 64 → *ASDU* de tipo 100 (C_CI_NA_1). Orden de interrogación general.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 07 → Causa de la transmisión 7 (confirmación de activación).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 00 00 00 → Dirección *IOA* (3 bytes). En *ASDU* de tipo 100 no se utiliza y, por lo tanto, se configura su valor a 0.
- 14 → Valor del campo información del elemento. Clasificación de la interrogación 20 (interrogación global de la estación remota).

4.2.4. Mensaje de información con valor de medida en coma flotante.

En la figura 42 se muestra el mensaje de información M_ME_NC_1 en respuesta a la orden de interrogación general que envía el cliente al maestro.

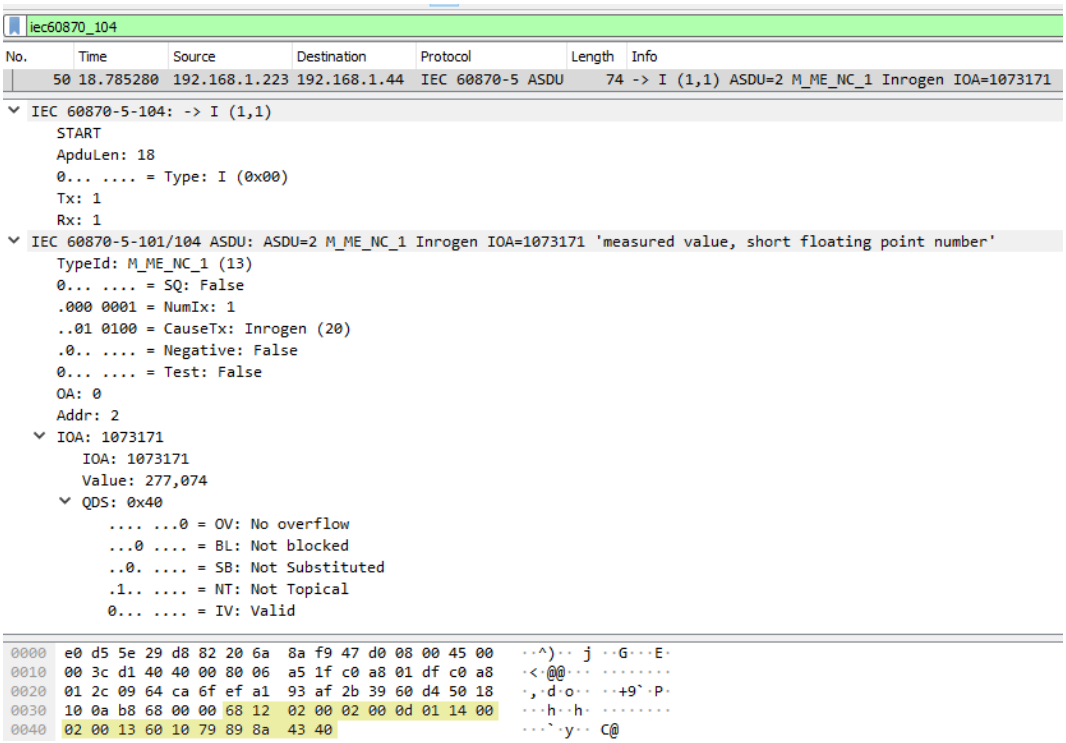


Figura 42.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_ME_NC_1.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* y cuyo valor en hexadecimal es 68 12 02 00 02 00 0D 01 14 00 02 00 13 60 10 79 89 8A 43 40:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 12 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 18 *bytes*.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 0D → *ASDU* de tipo 13 (M_ME_NC_1). Información de medida en coma flotante.
- 01 → Se envía un objeto de información.
- 14 → Causa de la transmisión 20 (interrogado por interrogación general).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 13 60 10 → Dirección *IOA* (1073171).
- 79 89 8A 43 → Valor del campo elemento de información. En este caso el valor es 277,074.
- 40 → Los 4 *bits* de mayor peso nos dan información de calidad y el *bit* de menor peso nos indica si hay desbordamiento. En este caso, el dato es válido (*bit* 7 a 0), no está actualizado (*bit* 6 a 1), no está sustituido (*bit* 5 a 0), no está bloqueado (*bit* 4 a 0) y no hay desbordamiento (*bit* 0 a 0).

4.2.5. Mensaje de información de tipo simple.

En la figura 43 se muestra el mensaje de información M_SP_NA_1 en respuesta a la orden de interrogación general que envía el cliente al maestro.

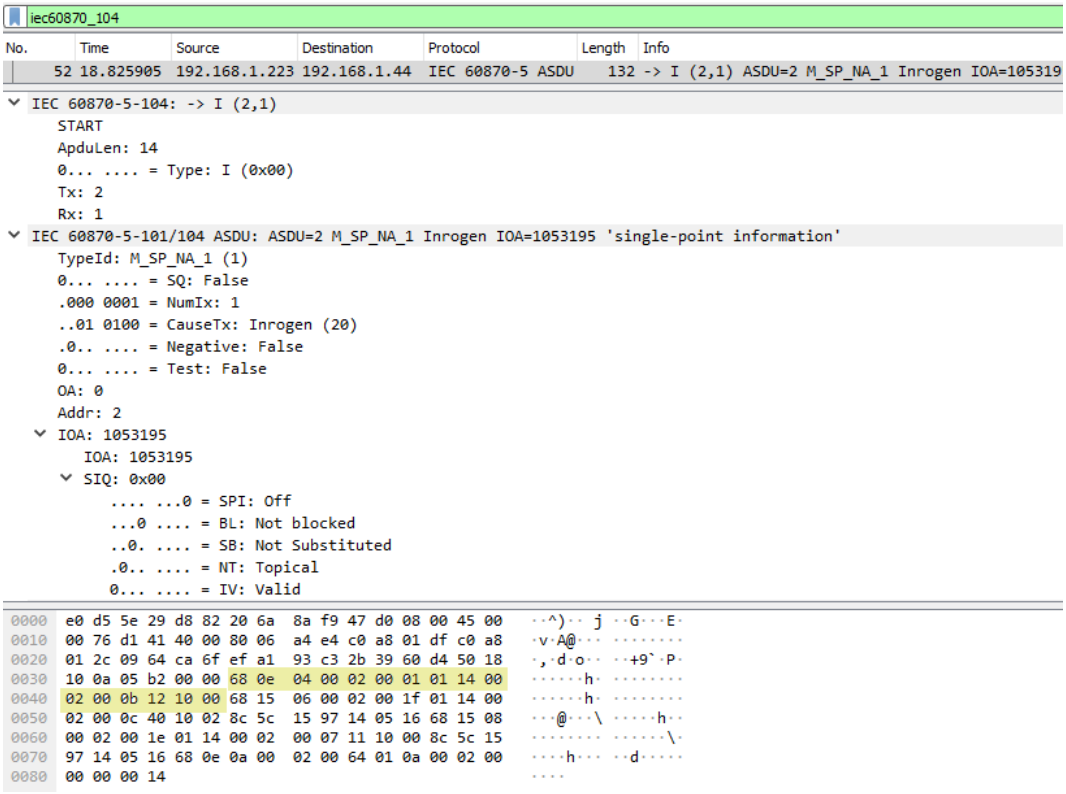


Figura 43.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_SP_NA_1.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* y cuyo valor en hexadecimal es 68 0E 04 00 02 00 01 01 14 00 02 00 0B 12 10 00:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 04 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 01 → *ASDU* de tipo 1 (M_SP_NA_1). Información de tipo simple.
- 01 → Se envía un objeto de información.
- 14 → Causa de la transmisión 20 (interrogado por interrogación general).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.

- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 0B 12 10 → Dirección del primer objeto (1053195).
- 00 → Valor del campo elemento de información. Los 4 bits de mayor peso nos indican la información de calidad, en donde al estar todos los *bits* a 0 significa que el dato es válido (*bit* 7), está actualizado (*bit* 6), no está sustituido (*bit* 5) y no está bloqueado (*bit* 4). El *bit* 0 nos da información del estado del objeto, el cual está a *OFF*.

4.2.6. Mensaje de información de tipo doble con marca de tiempo *CP56Time2a*.

En la figura 44 se muestra el mensaje de información M_DP_TB_1 en respuesta a la orden de interrogación general que envía el cliente al maestro.

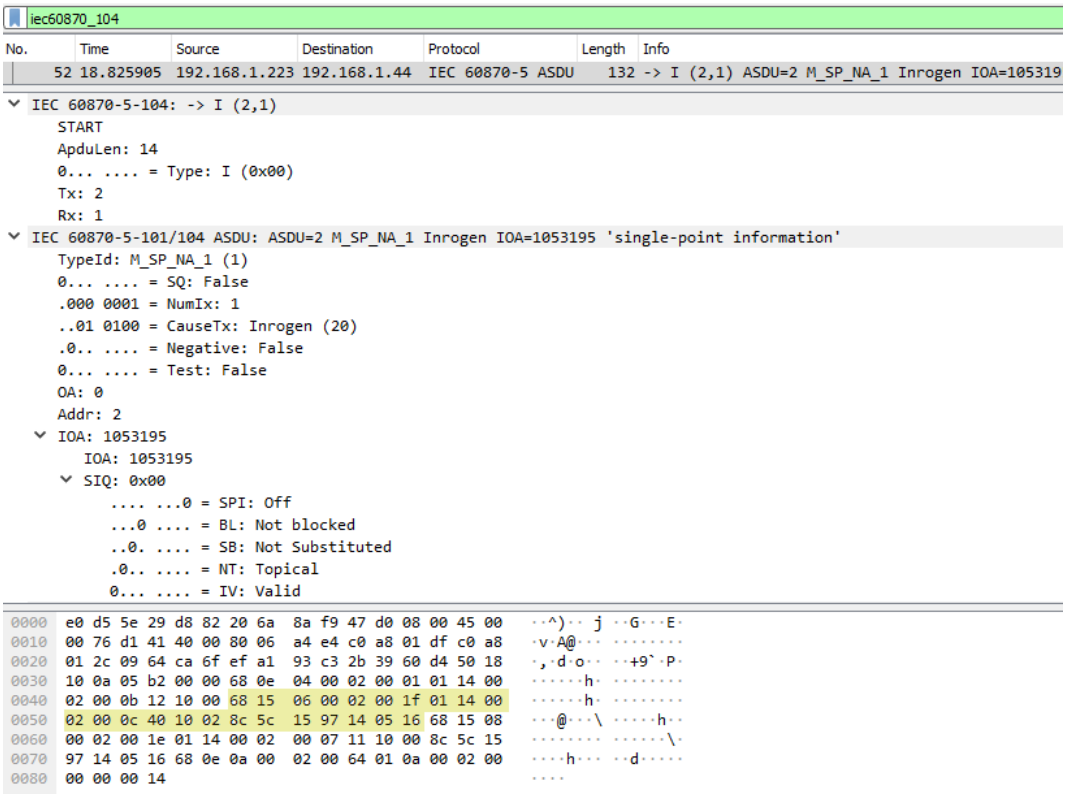


Figura 44.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_DP_TB_1.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* y cuyo valor en hexadecimal es 68 15 06 00 02 00 1F 01 14 00 02 00 0C 40 10 02 8C 5C 15 97 14 05 16:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 15 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 21 *bytes*.

- 06 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 1F → *ASDU* de tipo 31 (M_DP_TB_1). Información de tipo doble con marca de tiempo *CP56Time2a*.
- 01 → Se envía un objeto de información.
- 14 → Causa de la transmisión 20 (interrogado por interrogación general).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 0C 40 10 → Dirección del primer objeto (1064972).
- 02 → Valor del campo elemento de información. Los 4 bits de mayor peso nos indican la información de calidad, en donde al estar todos los *bits* a 0 significa que el dato es válido (*bit* 7), está actualizado (*bit* 6), no está sustituido (*bit* 5) y no está bloqueado (*bit* 4). Los dos *bits* de menor peso nos indican el estado del elemento, que en este caso está a ON (seccionador cerrado).
- 8C 5C 15 97 14 05 16 → Se utilizan 7 *bytes* para enviar la marca de tiempo. Los dos *bytes* más significativos nos indican los milisegundos, el *byte* 4 nos indica los minutos (*bits* del 0 al 5), si está sustituido (*bit* 6) y si el dato es válido (*bit* 7), el *byte* 3 nos indica las horas (*bits* del 0 al 4) y si es horario de verano o invierno (*bit* 7), el *byte* 2 nos sindica el día del mes (*bits* del 0 al 4) y el día de la semana (*bits* del 5 al 7), el *byte* 1 nos indica el mes (*bits* del 0 al 3) y el *byte* 0 el año (*bits* del 0 al 6).

4.2.7. Mensaje de información de tipo simple con marca de tiempo *CP56Time2a*.

En la figura 45 se muestra el mensaje de información M_SP_TB_1 en respuesta a la orden de interrogación general que envía el cliente al maestro.

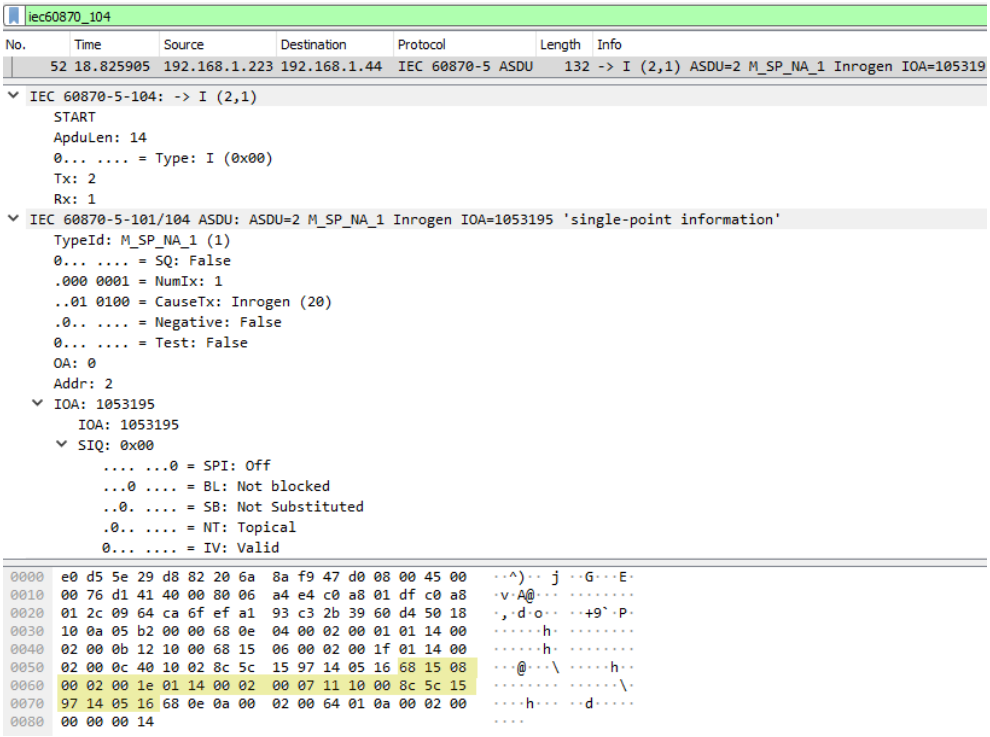


Figura 45.- Captura Wireshark - Mensaje de información M_SP_TB_1.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* y cuyo valor en hexadecimal es 68 15 08 00 02 00 1E 01 14 00 02 00 07 11 10 00 8C 5C 15 97 14 05 16:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 15 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 21 *bytes*.
- 08 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 1E → *ASDU* de tipo 30 (M_SP_TB_1). Información de tipo simple con marca de tiempo *CP56Time2a*.
- 01 → Se envía un objeto de información.
- 14 → Causa de la transmisión 20 (interrogado por interrogación general).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.

- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 07 11 10 → Dirección del primer objeto (1052935).
- 00 → Valor del campo elemento de información. Los 4 bits de mayor peso nos indican la información de calidad, en donde al estar todos los *bits* a 0 significa que el dato es válido (*bit* 7), está actualizado (*bit* 6), no está sustituido (*bit* 5) y no está bloqueado (*bit* 4). El *bit* de menor peso nos indica el estado del elemento, que en este caso está a OFF (seccionador no bloqueado mecánicamente).
- 8C 5C 15 97 14 05 16 → Se utilizan 7 *bytes* para enviar la marca de tiempo. Los dos *bytes* más significativos nos indican los milisegundos, el *byte* 4 nos indica los minutos (*bits* del 0 al 5), si está sustituido (*bit* 6) y si el dato es válido (*bit* 7), el *byte* 3 nos indica las horas (*bits* del 0 al 4) y si es horario de verano o invierno (*bit* 7), el *byte* 2 nos sindica el día del mes (*bits* del 0 al 4) y el día de la semana (*bits* del 5 al 7), el *byte* 1 nos indica el mes (*bits* del 0 al 3) y el *byte* 0 el año (*bits* del 0 al 6).

4.2.8. Mensaje de finalización de interrogación general.

En la figura 46 se muestra el mensaje de finalización de la interrogación general que envía el cliente una vez a terminado de enviar todos los mensajes de información.

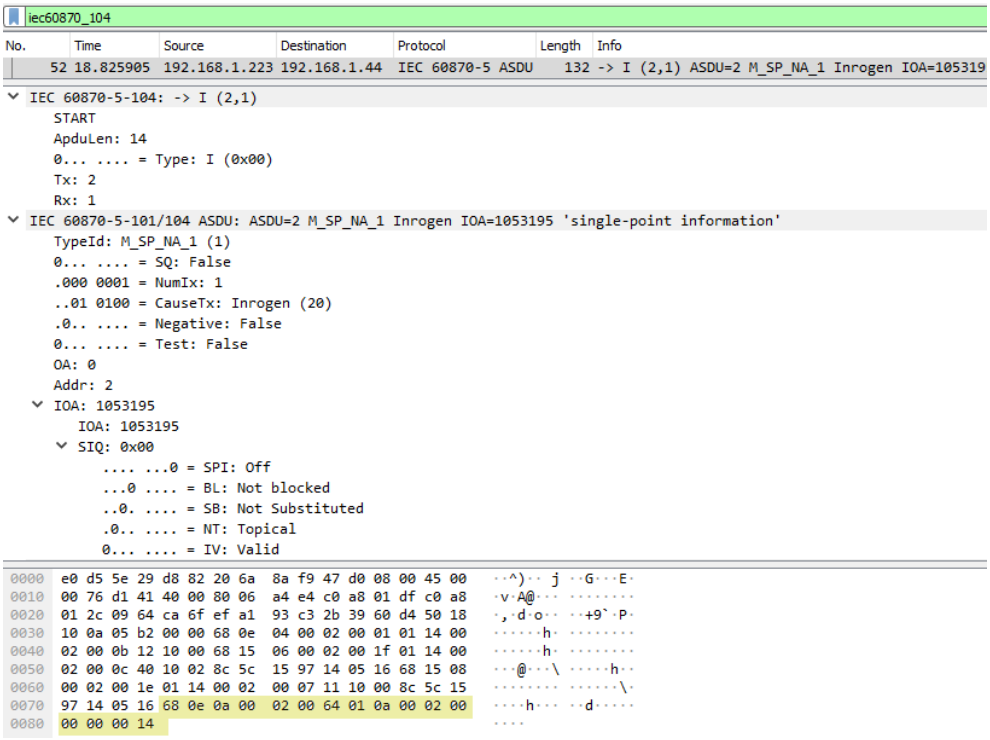


Figura 46.- Captura Wireshark - Mensaje de finalización de interrogación general.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* del mensaje de finalización de la interrogación general que envía el cliente al terminar de enviar todos los mensajes de información.

El valor en hexadecimal es 68 0E 0A 00 02 00 64 01 0A 00 02 00 00 00 00 14:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 0A → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 64 → *ASDU* de tipo 100 (C_CI_NA_1). Orden de interrogación general.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 0A → Causa de la transmisión 10 (activación finalizada).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 00 00 00 → Dirección *IOA* (3 bytes). En *ASDU* de tipo 100 no se utiliza y, por lo tanto, se configura su valor a 0.
- 14 → Valor del campo información del elemento. Clasificación de la interrogación 20 (interrogación global de la estación remota).

4.2.9. Mensaje de reconocimiento con trama S.

En la figura 47 se muestra un mensaje de reconocimiento para confirmar la recepción de los mensajes anteriores por parte del maestro.

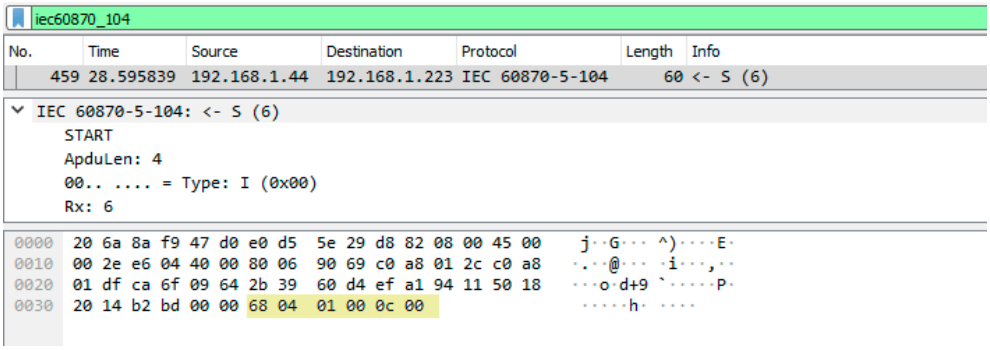


Figura 47.- Captura Wireshark - Mensaje de reconocimiento de tramas recibidas en una interrogación general.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* de un mensaje de reconocimiento que envía el maestro para confirmar la recepción de los mensajes de información enviados por el cliente. El valor en hexadecimal es 68 04 01 00 0C 00.

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 04 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 4 *bytes*.
- 01 → En las tramas de tipo S únicamente se utilizan los dos *bits* menos significativos, en donde el valor 1 nos indica que es una trama de tipo S.
- 00 → No se utiliza en las tramas de tipo S.
- 0C → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.

4.3. Envío de órdenes a un seccionador.

Para poder enviar una orden desde el maestro, es necesario que se seleccione la opción adecuada desde el menú contextual que se muestra al pulsar el botón derecho sobre el elemento en cuestión. El menú contextual se muestra en la figura 48.

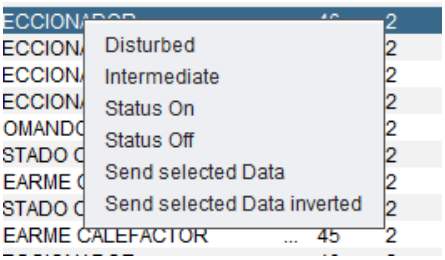


Figura 48.- Menú contextual de orden tipo doble.

En este apartado, se van a analizar los resultados obtenidos después del envío de una orden de apertura de un seccionador.

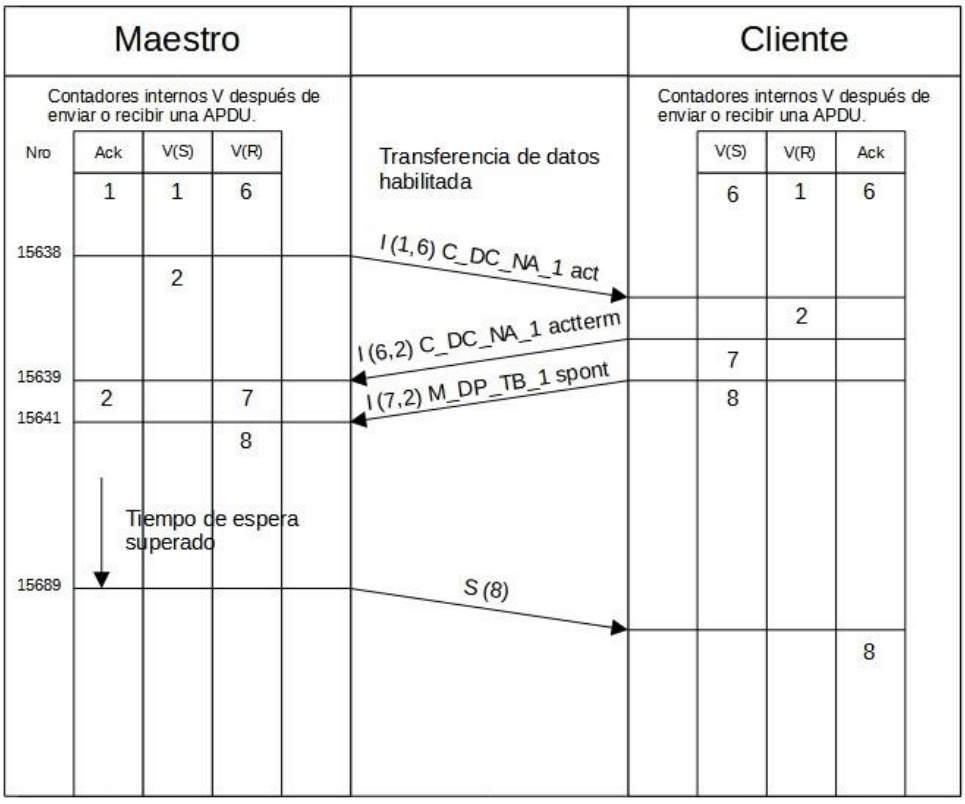
Las órdenes que se utilizan para la apertura y cierre de los seccionadores son de tipo 46 (orden de tipo doble), puesto que podemos tener cuatro estados distintos: abierto, cerrado, indefinido e inválido.

Tras el envío de la orden, el cliente ejecutará la acción cambiando el valor del campo *Value* y responderá indicando que la orden se ha ejecutado, y finalmente, enviará un mensaje indicando el valor actual.

Por último, el maestro enviará la confirmación de la recepción de los mensajes.

4.3.1. Diagrama de intercambio de mensajes de una orden de tipo doble.

En la figura 49 se muestra el diagrama de intercambio de mensajes entre el maestro y la estación remota cuando el maestro envía la orden de apertura de un seccionador.



V(S) = Número de secuencia de envío.

V(R) = Número de secuencia de recepción.

Ack = Variable utilizada por el transmisor para comprobar que el receptor ha recibido correctamente las tramas I enviadas.

I (a,b) = APDU tipo I con el número de secuencia enviada (a) y el número de secuencia recibida (b).

S (b) = APDU tipo S con el número de secuencia recibida (b).

U = APDU tipo U.

Nro = Número de trama capturada con *Wireshark*.

Figura 49.- Secuencia de mensajes en la orden de apertura capturados con Wireshark.

4.3.2. Orden de apertura de seccionador.

En la figura 50 se muestra la captura con *Wireshark* de la orden de apertura que envía el maestro.

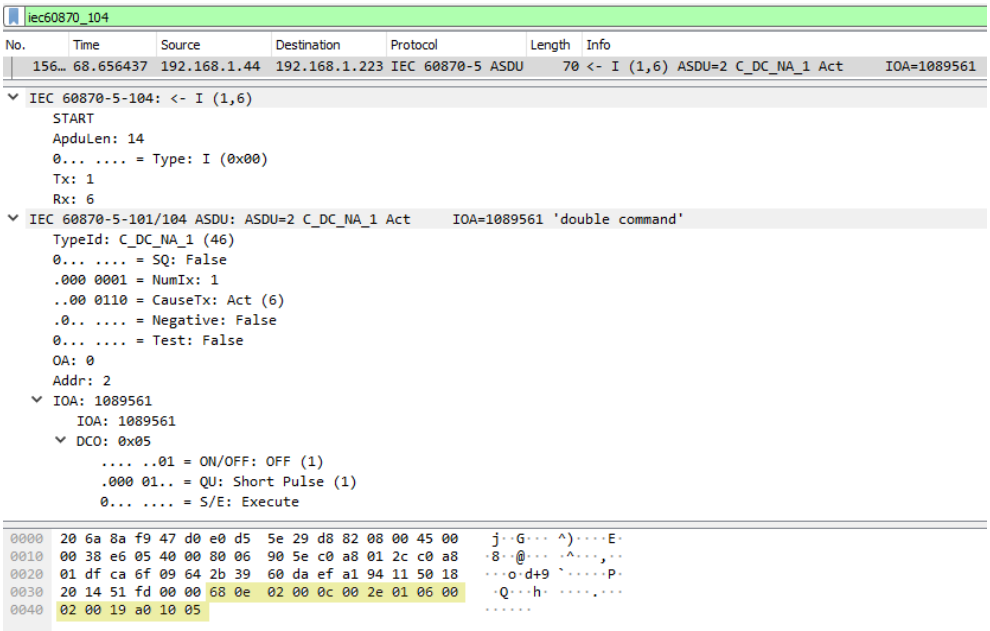


Figura 50.- Captura Wireshark - Mensaje de orden de apertura.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* de una orden de apertura de tipo C_DC_NA_1. El valor en hexadecimal es 68 0E 02 00 0C 00 2E 01 06 00 02 00 19 A0 10 05:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 02 → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 0C → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 2E → *ASDU* de tipo 46 (C_DC_NA_1). Orden de tipo doble.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 06 → Causa de la transmisión 6 (activación).

- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 19 A0 10 → Dirección del primer objeto (1089561).
- 05 → Valor del campo elemento de información. En este caso, se envía una orden de ejecución (*bit* 7 a 0), mediante pulso corto (*bit* 2 a 1) y la orden enviada es la de apertura del seccionador o cambio de estado a OFF (*bit* 0 a 1).

4.3.3. Mensaje de confirmación de orden de apertura.

En la figura 51 se muestra el mensaje de confirmación que envía el cliente al maestro para informar de que se ha ejecutado la orden de apertura correctamente.

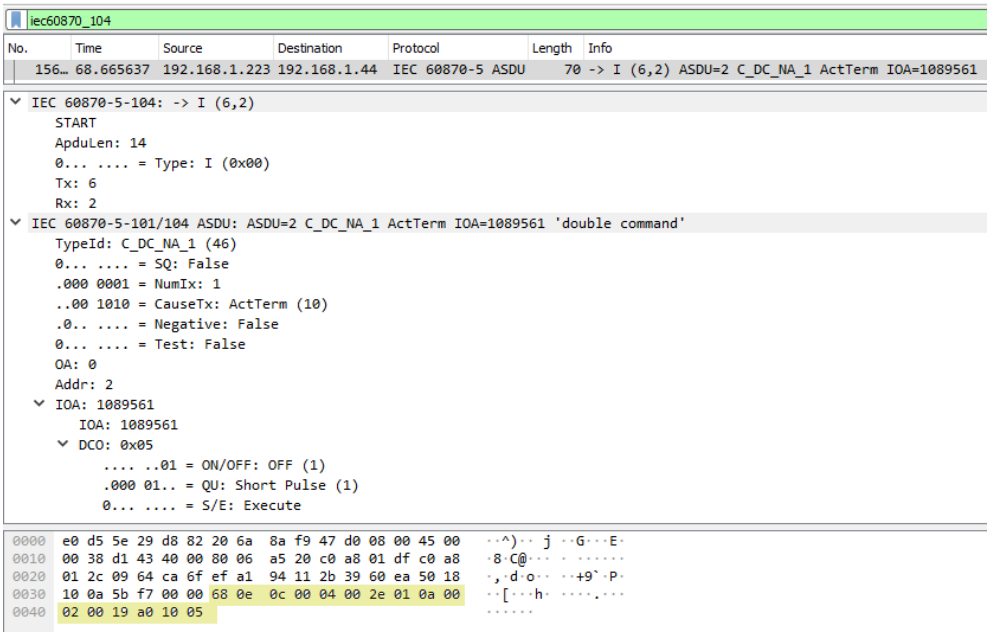


Figura 51.- Captura Wireshark - Mensaje de información de orden ejecutada.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* del mensaje de información de orden ejecutada que envía el cliente, después de haber recibido una orden de apertura de tipo C_DC_NA_1. El valor en hexadecimal es 68 0E 0C 00 04 00 2E 01 0A 00 02 00 19 A0 10 05:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 0E → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 14 *bytes*.
- 0C → *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.

- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 04 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 2E → *ASDU* de tipo 46 (C_DC_NA_1). Orden de tipo doble.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 0A → Causa de la transmisión 10 (activación finalizada).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 19 A0 10 → Dirección del primer objeto (1089561).
- 05 → Valor del campo elemento de información. En este caso, se envía una orden de ejecución (*bit* 7 a 0), mediante pulso corto (*bit* 2 a 1) y la orden enviada es la de apertura del seccionador o cambio de estado a OFF (*bit* 0 a 1).

4.3.4. Mensaje de información de posición final del seccionador.

En la figura 52 se muestra el mensaje de información que envía el cliente al maestro, pasado un determinado tiempo, para informar de la posición final del seccionador.

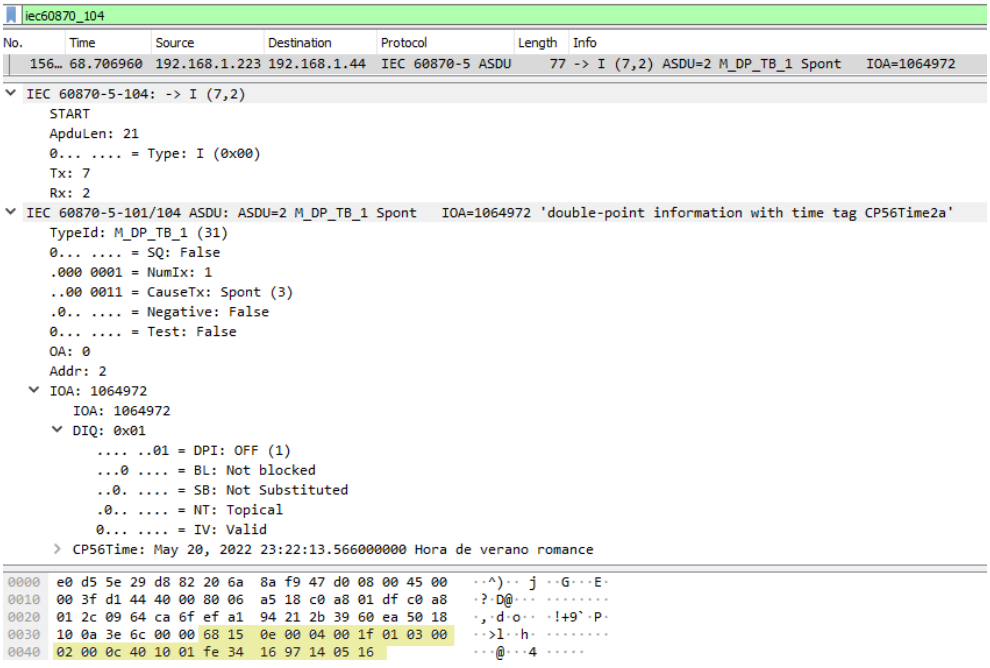


Figura 52.- Captura Wireshark - Mensaje de información de la posición final del seccionador.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* del mensaje de información de posición final del seccionador M_DP_TB_1. El valor en hexadecimal es 68 15 0E 00 04 00 1F 01 03 00 02 00 0C 40 10 01 FE 34 16 97 14 05 16:

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 15 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 21 *bytes*.
- 0E→ *LSB* del número de secuencia de envío. Como el bit 0 tiene un valor de 0, nos indica que es una trama de tipo I.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de envío.
- 04 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.
- 1F → *ASDU* de tipo 31 (M_DP_TB_1). Información de tipo doble con marca de tiempo CP56Time2a.
- 01 → Se envía un solo objeto.
- 03 → Causa de la transmisión 3 (espontáneo).
- 00 → Dirección para identificar al maestro. Cuando solo hay un centro de control no se utiliza y su valor es 0.
- 02 00 → Dirección para identificar la estación remota (2 *bytes)*.
- 0C 40 10 → Dirección del primer objeto (1064972).
- 01 → Valor del campo elemento de información. Los 4 bits de mayor peso nos indican la información de calidad, en donde al estar todos los *bits* a 0 significa que el dato es válido (*bit* 7), está actualizado (*bit* 6), no está sustituido (*bit* 5) y no está bloqueado (*bit* 4). Los *bits* de menor peso nos indican el estado del elemento, que en este caso está a OFF (seccionador abierto).
- FE 34 16 97 14 05 16 → Se utilizan 7 *bytes* para enviar la marca de tiempo. Los dos *bytes* más significativos nos indican los milisegundos, el *byte* 4 nos indica los minutos (*bits* del 0 al 5), si está sustituido (*bit* 6) y si el dato es válido (*bit* 7), el *byte* 3 nos indica las horas (*bits* del 0 al 4) y si es horario de verano o invierno (*bit* 7), el *byte* 2 nos sindica el día del mes (*bits* del 0 al 4) y el día de la semana (*bits*

del 5 al 7), el *byte* 1 nos indica el mes (*bits* del 0 al 3) y el *byte* 0 el año (*bits* del 0 al 6).

4.3.5. Mensaje de reconocimiento con trama S.

En la figura 53 se muestra un mensaje de reconocimiento para confirmar la recepción de los mensajes anteriores por parte del maestro.

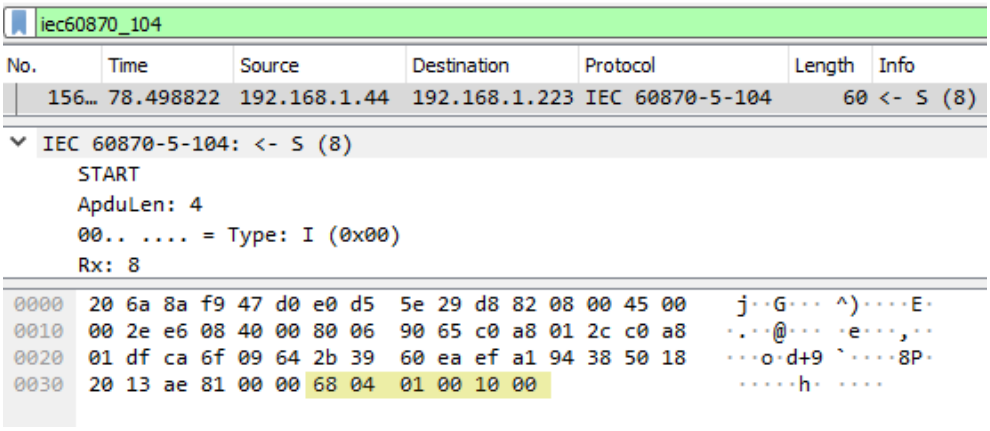


Figura 53.- Captura Wireshark - Mensaje de reconocimiento de tramas recibidas DC.

A continuación, se explican los datos de la *APDU* del mensaje de reconocimiento que envía el maestro para confirmar la recepción de los mensajes de información enviados por el cliente. El valor en hexadecimal es 68 04 01 00 10 00.

- 68 → Nos indica el comienzo de la *APDU*.
- 04 → Nos indica el tamaño de la *APDU*, que en este caso es de 4 *bytes*.
- 01 → En las tramas de tipo S únicamente se utilizan los dos *bits* menos significativos, en donde el valor 1 nos indica que es una trama de tipo S.
- 00 → No se utiliza en las tramas de tipo S.
- 10 → *LSB* del número de secuencia de recepción.
- 00 → *MSB* del número de secuencia de recepción.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las dificultades encontradas a la hora de buscar información sobre la arquitectura del protocolo de comunicaciones *IEC* 60870-5-104 y al no tener acceso directo a la norma, considero que el objetivo principal que era el estudio del funcionamiento del protocolo *IEC* 60870-5-104 que se utiliza para la comunicación entre los telemandos de energía y las subestaciones ferroviarias de las líneas de trenes AVE gestionadas por Adif, se ha desarrollado adecuadamente.

Además, para completar el estudio de la norma, me he apoyado en el desarrollo de las diferentes tareas propuestas al inicio de este trabajo, estudiando los elementos que forman parte del sistema eléctrico de las líneas de trenes de alta velocidad, el equipamiento eléctrico de las subestaciones y centros de autotransformación, la configuración de las redes de comunicaciones a nivel local y a nivel de un área específica, así como el funcionamiento del *SCADA*, dando una visión global de todo el sistema.

Otra parte importante del trabajo y que ha servido para comprender mejor el funcionamiento del protocolo, ha sido la simulación realizada con el programa *IEC-Test*, ya que mediante la captura de los mensajes que se han intercambiado la *MTU* con la *RTU* se ha podido comprobar la estructura de los distintos tipos de tramas.

Por otro lado, para la elección del simulador se han analizado varios programas de simulación, pero se ha elegido el programa *IEC-Test* porque, al ser el programa utilizado por el personal técnico de Siemens, está adaptado para poder utilizar la estructura de datos de los mapeados utilizados en Adif y, además, es un programa sencillo de configurar y usar que cubría las necesidades de este trabajo fin de grado. Los otros programas analizados se han descartado porque presentaban las siguientes limitaciones:

- *AxonTest*. Programa privativo con 15 días de prueba en donde no es posible guardar el mapeado creado, lo que obliga a tener que realizar un nuevo mapeado cada vez que se ejecuta el programa.
- *FreyrScada*. Este programa también tiene un periodo de prueba, pero en este caso es de 15 minutos cada vez que se ejecuta y, aunque el programa es bastante completo, el principal inconveniente es que no se puede generar un mapeado similar al utilizado actualmente en Adif.

Por último, me gustaría comentar que son varios los protocolos de comunicaciones utilizados para el control y monitorización de subestaciones eléctricas desde un centro de control. Uno de los más utilizados es el protocolo *IEC* 60870-5-104 que es una extensión del *IEC* 60870-5-101 *y* que incluye cambios en los servicios de la capa de transporte, de red, de enlace y de la capa física para poder realizar conexiones mediante *TCP/IP*.

Además, en las subestaciones de tracción de Adif, generalmente se utiliza el protocolo *IEC* 60870-5-104 para los centros de control y el *IEC* 60870-5-101 para las estaciones remotas en campo, aunque últimamente se están realizando cambios en algunas subestaciones para tener una uniformidad, utilizando únicamente el protocolo *IEC* 60870-5-104 tanto en centros de control como en las estaciones remotas, evitando el uso de las pasarelas. Estos cambios aumentan la fiabilidad del sistema al reducir posibles fuentes de fallo, pero quizá sería más interesante migrar todo el sistema al protocolo *IEC* 61850, el cual ha ido ganando aceptación entre las empresas del sector eléctrico porque presenta una serie de mejoras con respecto al protocolo *IEC* 60870-5-104 que se detallan a continuación*:*

- Evita el uso de protocolos propietarios al unificar las comunicaciones.
- Proporciona interoperabilidad entre los sistemas de los diferentes fabricantes sin ninguna limitación.
- Se reducen los costes en procesos de ingeniería al poder exportar el mapeado de *IED* entre los diferentes fabricantes. También, al no utilizar direcciones fijas para la identificación de la información, es posible utilizar el mismo mapeado para la puesta en servicio de nuevas subestaciones.
- La norma está pensada para que sea capaz de adaptarse a futuras necesidades y requerimientos del mercado.

Por ello, opino que un trabajo futuro podría ser la migración del sistema de comunicaciones actual por un sistema que utilice el protocolo de comunicaciones *IEC* 61850, mediante el cual se simplifica enormemente la puesta en servicio de nuevas instalaciones, así como la ampliación de las antiguas que ya utilizan dicho protocolo.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Adif, «Plan de lucha contra el cambio climático 2018-2030,» [En línea]. Available: https://www.adif.es/documents/20124/1809001/PLCCC_publicacion.pdf/972137a7-0407-2f05-4164-3934fe12c0a0?t=1620648275372. [Último acceso: 03 septiembre 2021].

[2] J. Cabello, «Renovación por obsolescencia del hardware del sistema de gestión y control de las subestaciones y centros de autotransformación 2x25 kV c.a. Líneas Madrid-Barcelona-Zaragoza-Huesca, Madrid-Valladolid, Córdoba-Málaga.,» Adif, pliego de prescripciones técnicas, 2018.

[3] Adif, «Protocolo de comunicaciones entre Centro de Control y Remotas en Telemandos de Energía de líneas de Alta Velocidad, perfil de interoperatividad Adif IEC 60870-5-104.,» Especificación Técnica 03.359.501.8, Madrid, 2008.

[4] Wikipedia, «Historia del ferrocarril en España,» 21 octubre 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_ferrocarril_en_España. [Último acceso: 08 septiembre 2021].

[5] Wikipedia, «Compañia de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante,» 23 octubre 2020. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Compañia_de_los_Ferrocarriles_de_Madrid_a_Zaragoza_y_Alicante. [Último acceso: 12 septiembre 2021].

[6] D. Cuéllar *et al*., «Catenaria. La electrificación ferroviaria en perspectiva histórica.,» Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, 2012.

[7] G. Clarke, D. Reynders y E. Wright, Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems, Elsevier, 2004.

[8] ENSOTEST S.L., «Introducción a la norma IEC 60870-5-104.,» 2021. [En línea]. Available: https://www.ensotest.com/es/iec-60870-5-104/introduccion-a-la-norma-iec-60870-5-104/. [Último acceso: 20 noviembre 2021].

[9] Siemens, «IEC-Test Simulator,» Programa de simulación para protocolo IEC 60870-5-104.

[10] M. Kerkers, «Assessing the Security of IEC 60870-5-104 Implementations using Automata Learning,» University of Twente, 2017.

[11] J. Feria, J. Camargo y E. Muskus, «Diseño e implementación de un algoritmo para translación de protocolo entre las normas IEC 60870-5-104 y MODBUS TCP/IP,» *Ingenium,* vol. 16, nº 32, pp. 118-125, junio 2015.

[12] G. Combs *et al.,* «Wireshark ver. 3.4.11,» 2022. [En línea]. Available: https://www.wireshark.org/. [Último acceso: 25 enero 2022].

[13] P. Matoušek, «Description and analysis of IEC 104 Protocol,» Brno University of Technology, 2017.

[14] Adif Formación, «Curso de subestaciones de tracción,» Madrid, 2019.

[15] L. S. Barrantes Pineda, «Diseño del sistema de protección y control de subestaciones eléctricas.,» Leganés, 2011.

[16] Ministerio de Obras Públicas, «Plan General de Electrificación de los Ferrocarriles Españoles,» Madrid, 1946.

[17] Adif, «Declaración sobre la Red 2021,» 15 Enero 2021. [En línea]. Available: http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/DR_Adif_2021_V0_15_enero_2021.pdf. [Último acceso: 23 septiembre 2021].

[18] D. Gómez Berzosa, «Electrificación ferroviaria de alta velocidad en España,» abril 2014. [En línea]. Available: https://www.tecnicaindustrial.es/electrificacion-ferroviaria-de-alta-velocidad/. [Último acceso: 25 septiembre 2021].

[19] Wikipedia, «Modelo TCP/IP,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_TCP/IP. [Último acceso: 19 diciembre 2021].

APÉNDICE 1. PRESUPUESTO

A continuación, en la tabla 2 se muestra el presupuesto detallado:

TABLA 2.- PRESUPUESTO.

Descripción	Precio unitario	Unidades	Coste
Horas de ingeniería	40 €/h	116 hr.	4.640 €
Ordenador completo	689 €	2 ud.	1.378 €
Router	50,90 €	1 ud.	50,90 €
Cable Ethernet Cat.6	5,59 €	2 ud.	11,18 €
		TOTAL	6.080,08 €

Hay que tener en cuenta que no se ha incluido en el presupuesto el coste del programa de simulación al no estar disponible públicamente.

APÉNDICE 2. PLANIFICACIÓN TEMPORAL

En la tabla 3 se muestra la duración de cada una de las tareas que se han desarrollado.

TABLA 3.- PLAN DE TRABAJO.

TAREA	DURACIÓN
Estudio de los sistemas de electrificación de las líneas AVE.	20 horas
Estudio de los diferentes elementos que forman parte de las subestaciones de las líneas AVE de Adif.	25 horas
Estudio de las distintas redes de comunicaciones dentro del sistema.	20 horas
Estudio del sistema *SCADA*.	15 horas
Estudio teórico de la norma *IEC* 60870-5-104 que se utiliza para la comunicación entre los telemandos y las subestaciones de líneas AVE de Adif.	45 horas
Estudio de las herramientas de simulación y de captura de paquetes disponibles.	45 horas
Simulación del protocolo *IEC* 60870-5-104 entre un maestro y un cliente.	20 horas
Estudio de futuras mejoras.	15 horas
Redacción del Trabajo de Fin de Grado (TFG).	140 horas

Y a continuación, en la figura 54 se muestra el diagrama de Gantt.

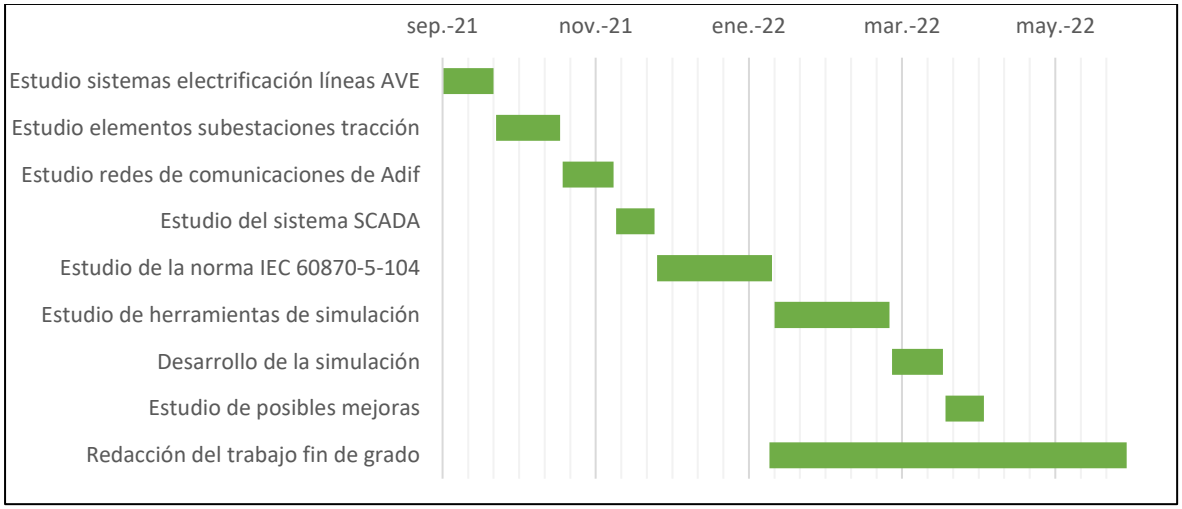


Figura 54.- Diagrama de Gantt.

APÉNDICE 3. TIPOS DE ASDU

TABLA 4.- TIPOS DE *ASDU*.

Type	*Description*	*Reference*	*Format*	*Valid COT*
Process information in monitor direction				
1	*Single point information*	M_SP_NA_1	SIQ	2,3,5,11,20,20+G
2	*Single point information with time tag*	M_SP_TA_1	SIQ + CP24Time2a	3,5,11,12
3	*Double point information*	M_DP_NA_1	DIQ	2,3,5,11,12,20,20+G
4	*Double point information with time tag*	M_DP_TA_1	DIQ + CP24Time2a	3,5,11,12
5	*Step position information*	M_ST_NA_1	VTI + QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
6	*Step position information with time tag*	M_ST_TA_1	VTI + QDS + CP24Time2a	2,3,5,11,12
7	*Bit string of 32 bit*	M_BO_NA_1	BSI + QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
8	*Bit string of 32 bit with time tag*	M_BO_TA_1	BSI + QDS + CP24Time2a	3,5
9	*Measured value, normalized value*	M_ME_NA_1	NVA + QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
10	*Measured value, normalized value with time tag*	M_ME_TA_1	NVA + QDS + CP24Time2a	3,5
11	*Measured value, scaled value*	M_ME_NB_1	SVA + QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
12	*Measured value, scaled value with time tag*	M_ME_TB_1	SVA + QDS + CP24Time2a	3,5
13	*Measured value, short floating point value*	M_ME_NC_1	IEEE STD 754 + QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
14	*Measured value, short floating point value with time tag*	M_ME_TC_1	IEEE STD 754 + QDS + CP24Time2a	2,3,5,11,12,20,20+G
15	*Integrated totals*	M_IT_NA_1	BCR	2,37,37+G
16	*Integrated totals with time tag*	M_IT_TA_1	BCR + CP24Time2a	3,37,37+G
17	*Event of protection equipment with time tag*	MEP TA 1	CP16Time2a + CP24Time2a	3
18	*Packed start events of protection equipment with time tag*	M_EP_TB_1	SEP + QDP + CP16Time2a + CP24Time2a	3
19	*Packed output circuit information of protection equipment with time tag*	M_EP_TC_1	OCI + QDP + CP16Time2a + CP24Time2a	3
20	*Packed single-point information with status change detection*	M_PS_NA_	SCD+QDS	2,3,5,11,12,20,20+G
21	*Measured value, normalized value without quality descriptor*	M_ME_ND_1	NVA	1,2,3,5,11,12,20,20+G

Type	*Description*	*Reference*	*Format*	*Valid COT*
Process telegrams with long time tag (7 octets)				
30	*Single point information with time tag CP56Time2a*	M_SP_TB_1	SIQ + CP56Time2a	3,5,11,12
31	*Double point information with time tag CP56Time2a*	M_DP_TB_1	DIQ + CP56Time2a	3,5,11,12
32	*Step position information with time tag CP56Time2a*	M_ST_TB_1	VTI + QDS + CP56Time2a	2,3,5,11,12
33	*Bit string of 32 bit with time tag CP56Time2a*	M_BO_TB_1	BSI + QDS + CP56Time2a	3,5
34	*Measured value, normalized value with time tag CP56Time2a*	M_ME_TD_1	NVA + QDS + CP56Tirne2a	3,5
35	*Measured value, scaled value with time tag CP56Time2a*	M_ME_TE_1	SVA + QDS + CP56Time2a	3 5
36	*Measured value, short floating point value with time tag CP56Time2a*	M_ME_TF_1	IEEE STD 754 + QDS + CP56Time2a	2,3,5,11,12,20,20+G
37	*Integrated totals with time tag CP56Time2a*	M_IT_TB_1	BCR + CP56Time2a	3,37,37+C
38	*Event of protection equipment with time tag CP56Time2a*	M_EP_TD_1	CP16Time2a + CP56Time2a	3
39	*Packed start events of protection equipment with time tag CP56time2a*	M_EP_TE_1	SEP + QDP + CP16Time2a + CP56Time2a	3
40	*Packed output circuit information of protection equipment with time tag CP56Time2a*	M_EP_TF_1	OCI + QDP + CP16Time2a + CP56Time2a	3
Process information in control direction				
45	*Single command*	C_SC_NA_1	SCO	6,7,8,9,10,44,45,46,47
46	*Double command*	C_DC_NA_1	DCO	6,7,8,9,10,44,45,46,47
47	*Regulating step command*	C_RC_NA_1	RCO	6,7,8,9,10,44,45,46,47
48	*Setpoint command, normalized value*	C_SE_NA_1	NVA + QOS	6,7,8,9,10,44,45,46,47
49	*Setpoint command, scaled value*	C_SE_NB_1	SVA + QOS	6,7,8,9,10,44,45,46,47
50	*Setpoint command, short floating point value*	C_SE_NC_1	IEEE STD 754 + QOS	6,7,8,9,10,44,45,46,47
51	*Bit string 32 bit*	C_BO_NA_1	BSI	6,7,8,9,10,44,45,46,47
Command telegrams with long time tag (7 octets)				
58	*Single command with time tag CP56Time2a*	C_SC_TA_1		
59	*Double command with time tag CP56Time2a*	C_DC_TA_1		
60	*Regulating step command with time tag CP56Time2a*	C_RC_TA_1		

Type	*Description*	*Reference*	*Format*	*Valid COT*
61	*Setpoint command, normalized value with time tag CP56Time2a*	C_SE_TA_1		
62	*Setpoint command, scaled value with time tag CP56Time2a*	C_SE_TB_1		
63	*Setpoint command, short floating point value with time tag CP56Time2a*	C_SE_TC_1		
64	*Bit string 32 bit with time tag CP56Time2a*	C_BO_TA_1		
System information in monitor direction				
70	*End of initialization*	M_El_NA_1	COI	4
System information in control direction				
100	*(General) Interrogation command*	C_IC_NA_1	QOI	6,7,8,9,10,44,45,46,47
101	*Counter interrogation command*	C_Cl_NA_1	QCC	6,7,8,9,10,44,45,46,47
102	*Read command*	C_RD_NA_I	null	5
103	*Clock synchronization command*	C_CS_NA_1	CP56Time2a	3,6,7,44,45,46,47
104	*(IEC 101) Test command*	C_TS_NB_1	FBP	6,7,44,45,46,47
105	*Reset process command*	C_RP_NC_1	QRP	6,7,44,45,46,47
106	*(IEC 101) Delay acquisition command*	C_CD_NA_1	CP16Time2a	6,7,44,45,46,47
107	*Test command with time tag CP56Time2a*	C_TS_TA_1		
Parameter in control direction				
110	*Parameter of measured value, normalized value*	P_ME_NA_1	NVA + QPM	6,7,9,10,20,20+G,44, 45,46,47
111	*Parameter of measured value, scaled value*	P_ME_NB_1	SVA + QPM	6,7,20,20+G,44,45,46, 47
112	*Parameter of measured value, short floating point value*	P_ME_NC_1	IEEE STD 754 + QPM	6,7,20,20+G,44,45,46, 47
113	*Parameter activation*	P_AC_NA_1	QPA	6,7,8,9,44,45,46,47
File transfer				
120	*File ready*	F_FR_NA_1	NOF + LOF + FRQ	13
121	*Section ready*	F_SR_NA_1	NOF + NOS + LOF + SRQ	13
122	*Call directory, select file, call file, call section*	F_SC_NA_1	NOF + NOS + SCQ	5,13
123	*Last section, last segment*	F_LS_NA_1	NOF + NOS + LSQ + CHS	13
124	*Ack file, Ack section*	F_AF_NA_1	NOF + NOS + AFQ	13
125	*Segment*	F_SG_NA_1	NOF + NOS + LOS + segment	13

Type	*Description*	*Reference*	*Format*	*Valid COT*
126	*Directory*	F_DR_TA_1	NOF + LOF + SOF + CP56Time2a	3,5
127	*Query Log - Request archive file*	F_SC_NB_1		
Fuente*:* Brno University of Technology. [13]				

Nota: La columna *valid COT* contiene la lista de códigos válidos de causa de transmisión asociado al tipo correspondiente.

APÉNDICE 4. CAUSA DE TRANSMISIÓN

TABLA 5.- CÓDIGOS DE CAUSA DE TRANSMISIÓN (*COT*).

Code	*Cause of Transmission*	*Abbreviation*
1	*periodic, cyclic*	*per/cyc*
2	*background interrogation*	*back*
3	*spontaneous*	*spont*
4	*initialized*	*init*
5	*interrogation or interrogated*	*req*
6	*activation*	*act*
7	*confirmation activation*	*actcon*
8	*deactivation*	*deact*
9	*confirmation deactivation*	*deactcon*
10	*termination activation*	*actterm*
11	*feedback, caused by distant command*	*retrem*
12	*feedback, caused by local command*	*retloc*
13	*data transmission*	*file*
14-19	*reserved for further compatible definitions*	
20	*interrogated by general interrogation*	*inrogen*
21	*interrogated by interrogation group 1*	*inro1*
22	*interrogated by interrogation group 2*	*Inro2*
23	*interrogated by interrogation group 3*	*Inro3*
24	*interrogated by interrogation group 4*	*Inro4*
25	*interrogated by interrogation group 5*	*Inro5*
26	*interrogated by interrogation group 6*	*Inro6*
27	*interrogated by interrogation group 7*	*Inro7*
28	*interrogated by interrogation group 8*	*Inro8*
29	*interrogated by interrogation group 9*	*Inro9*
30	*interrogated by interrogation group 10*	*inro10*
31	*interrogated by interrogation group 11*	*inro11*
32	*interrogated by interrogation group 12*	*inro12*
33	*interrogated by interrogation group 13*	*inro13*
34	*interrogated by interrogation group 14*	*inro14*
35	*interrogated by interrogation group 15*	*inro15*
36	*interrogated by interrogation group 16*	*inro16*

Code	*Cause of Transmission*	*Abbreviation*
37	*interrogated by counter general interrogation*	*reqcogen*
38	*interrogated by interrogation counter group 1*	*reqco1*
39	*interrogated by interrogation counter group 2*	*reqco2*
40	*interrogated by interrogation counter group 3*	*reqco3*
41	*interrogated by interrogation counter group 4*	*reqco4*
42-43	*reserved for further compatible definitions*	
44	*type-Identification unknown*	*uknown_type*
45	*cause unknown*	*uknown_cause*
46	*ASDU address unknown*	*unknown_asdu_address*
47	*Information object address unknown*	*unknown_object_address*
Fuente: *Brno University of Technology.* [13]		

APÉNDICE 5. ELEMENTOS DE INFORMACIÓN

TABLA 6.- ELEMENTOS DE INFORMACIÓN.

Element Type	*Description*	*Length (Bytes)*	*Used with the following Information Object Types*
Process information in monitor direction			
SIQ	*Single-point information with quality descriptor*	1	1, 2, 30
DIQ	*Double-point information with quality descriptor*	1	3
BSI	*Binary state information*	4	7, 8, 33, 51
SCD	*Status and change detection*	4	20
QDS	*Quality descriptor*	1	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 20, 32, 33, 34, 36
VTI	*Value with transient state indication*	1	5, 6, 32
NVA	*Normalized value*	2	9, 10, 21, 34, 48, 110
SVA	*Scaled value*	2	11, 12, 49, 111
IEEE STD 754	*Short floating point number*	4	13, 14, 36, 50, 112
BCR	*Binary counter reading*	5	15, 16, 37
Protection			
SEP	*Single event of protection equipment*	1	17, 38
SPE	*Start events of protection equipment*	1	18, 39
OCI	*Output circuit information of protection equipment*	1	19, 40
QDP	*Quality descriptor for events of protection equipment*	1	18, 19, 39, 40
Commands			
SCO	*Single command*	1	45
DCO	*Double command*	1	46
RCO	*Regulating step command*	1	47
Time			
CP56Time2a	*Seven octet binary time*	7	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 103, 126
CP24Time2a	*Three octet binary time*	3	4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40
CP16Time2a	*Two octet binary time*	2	17, 18, 19, 38, 39, 40, 106
Qualifiers			
QOI	*Qualifier of interrogation*	1	100
QCC	*Qualifier of counter interrogation command*	1	101
QPM	*Qualifier of parameter of measured values*	1	110, 112
QPA	*Qualifier of parameter activation*	1	111, 113

Element Type	*Description*	*Length (Bytes)*	*Used with the following Information Object Types*
QRP	*Qualifier of reset process command*	1	105
QOC	*Qualifier of command*	1	45, 46, 47, 48, 49, 50
QOS	*Qualifier of set-point command*	1	48, 49, 50
File Transfer			
FRQ	*File ready qualifier*	1	120
SRQ	*Section ready qualifier*	1	121
SCQ	*Select and call qualifier*	1	122
LSQ	*Last section or segment qualifier*	1	123
AFQ	*Acknowledge file or section qualifier*	1	124
NOF	*Name of file*	2	120, 121, 122, 123, 124, 125, 126
NOS	*Name of section*	2	121, 122, 123, 124, 125
LOF	*Length of file or section*	3	120, 121
LOS	*Length of segment*	1	125
CHS	*Checksum*	1	123
SOF	*Status of file*	1	126
Miscellaneous			
COI	*Cause of initialization*	1	70
FBP	*Fixed test bit pattern, two octets*	2	104

Fuente: *Brno University of Technology.* [13]

APÉNDICE 6. MAPEADO DEL CLIENTE

TABLA 7.- MAPEADO DEL CLIENTE.

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CA	25kV_C	S01	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	231	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	232	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	226	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	216	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	N01x	DETECTOR CATENARIA	1	2	0	236	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	N02x	DETECTOR FEEDER	1	2	0	237	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	227	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	228	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	229	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	9	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	217	16	16	45	2	0	22	160	16	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	10	64	16	45	2	0	21	160	16	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	215	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	VF1	MED. TENS. CAT	13	2	0	19	96	16	0	2	0	0	0	0	277.074	11
43ET01CA	25kV_F	S01	VF2	MED. TENS. FEEDER	13	2	0	20	96	16	0	2	0	0	0	0	25.88	9
43ET01CA	25kV_C	S03	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	21	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	22	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	16	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	6	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	17	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	18	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	19	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CA	25kV_C	S03	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	11	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	SEC	SECCIONADOR	31	2	0	12	64	16	46	2	0	25	160	16	2	9
43ET01CA	25kV_C	S03	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	7	17	16	45	2	0	26	160	16	0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	5	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	182	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	183	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	177	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	167	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	N01x	DETECTOR CATENARIA	1	2	0	187	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	178	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	179	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	180	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	18	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	168	17	16	45	2	0	40	160	16	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	SEC	SECCIONADOR	31	2	0	19	64	16	46	2	0	39	160	16	2	9
43ET01CA	25kV_C	S35	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	166	17	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	VF1	MED. TENS. CAT	13	2	0	37	96	16	0	2	0	0	0	0	292.987	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	B80P	BUFFER DE INFORMACIONES AL 80%	1	2	0	245	255	255	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	BFULL	BUFFER DE INFORMACIONES LLENO	1	2	0	255	255	255	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	CC_ID	IDENTIF. DE CC	7	2	0	0	0	17	0	2	0	0	0	0	1000000	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	COMPA	COMUNICACION PUERTO A PLC	1	2	0	18	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	COMPB	COMUNICACION PUERTO B PLC	1	2	0	19	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	EGEN	ESTADO GENERAL	1	2	0	5	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	EPLC	ESTADO CPU PLC	1	2	0	13	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	MAGA	MAGNETOTERMICO (AGRUPADA)	1	2	0	22	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	MAND1	INSTAL EN MANDO LOCAL/TELEM	1	2	0	1	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	MPLC	MODO DE OPERACION PLC	1	2	0	12	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	14	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	15	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	16	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS400	ESTADO BATERIA CPU	1	2	0	20	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS401	ESTADO MEMORIA CPU	1	2	0	21	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS417	ALIMENTACION LADO A	1	2	0	2	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	CENx	CONSUMO ENERGIA	13	2	0	6	96	16	0	2	0	0	0	0	18.099	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	CLF	ESTADO CALEF AGUJAS	30	2	0	54	16	16	45	2	0	7	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	DHN	DETECTOR HIELO-NIEVE	1	2	0	61	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	FCO	FALLO COMUNICACION	1	2	0	58	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	FCT	FALLO CONTACTORES	1	2	0	57	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	FL1	FUGA CORRIENTE LINEAS NIV-1	1	2	0	62	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	FL2	FUGA CORRIENTE LINEAS NIV-2	1	2	0	63	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	OS330	MODO OPERACION LOCAL	1	2	0	55	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	OS334	DISPARO PROTECCIONES	1	2	0	56	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	PL1	MED. POTENCIA LP1	13	2	0	3	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	PL2	MED. POTENCIA LP2	13	2	0	4	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	PLC	FALLO PLC	1	2	0	59	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	PTCx	MED.POT. LP1+LP2	13	2	0	5	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	REAR	REARME CALEFACTOR	30	2	0	0	0	0	45	2	0	3	144	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	RTF	FALLO RECTIFICADOR	1	2	0	60	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	TE1	FALLO TENSION LP1	1	2	0	64	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	TE2	FALLO TENSION LP2	1	2	0	65	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	TEN	FALLO TENSION LP1+LP2	1	2	0	66	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	CENx	CONSUMO ENERGIA	13	2	0	14	96	16	0	2	0	0	0	0	45.749	9

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	CLF	ESTADO CALEF AGUJAS	30	2	0	120	16	16	45	2	0	13	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	DHN	DETECTOR HIELO-NIEVE	1	2	0	127	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	FCO	FALLO COMUNICACION	1	2	0	124	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	FCT	FALLO CONTACTORES	1	2	0	123	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	FL1	FUGA CORRIENTE LINEAS NIV-1	1	2	0	128	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	FL2	FUGA CORRIENTE LINEAS NIV-2	1	2	0	129	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	OS330	MODO OPERACION LOCAL	1	2	0	121	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	OS334	DISPARO PROTECCIONES	1	2	0	122	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	PL1	MED. POTENCIA LP1	13	2	0	11	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	PL2	MED. POTENCIA LP2	13	2	0	12	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	PLC	FALLO PLC	1	2	0	125	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	PTCx	MED.POT. LP1+LP2	13	2	0	13	96	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	REAR	REARME CALEFACTOR	30	2	0	0	0	0	45	2	0	5	144	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	RTF	FALLO RECTIFICADOR	1	2	0	126	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	TE1	FALLO TENSION LP1	1	2	0	130	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	TE2	FALLO TENSION LP2	1	2	0	131	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	TEN	FALLO TENSION LP1+LP2	1	2	0	132	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	192	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	193	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	187	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	177	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	188	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	189	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	190	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	7	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	SEC	SECCIONADOR	31	2	0	8	64	16	46	2	0	17	160	16	2	9

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CO	25kV_F	ET1	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	178	16	16	45	2	0	18	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	176	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	37	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	OS369	BLOQUEO MANUAL	1	2	0	0	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	OS421	DISPARO INTERRUPTOR Q52	1	2	0	1	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	SECBT	INTERRUPTOR BAJA TENSION	30	2	0	38	16	16	45	2	0	4	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	SECBT	INTERRUPTOR BAJA TENSION	31	2	0	3	64	16	46	2	0	3	160	16	2	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	36	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	73	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	74	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	68	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	45	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	69	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	70	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	71	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	3	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	SEC	SECCIONADOR	31	2	0	4	64	16	46	2	0	5	160	16	2	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	46	16	16	45	2	0	6	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	44	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	CHAPI	COMUNICACION PUERTO A PI	1	2	0	139	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	CHBPI	COMUNICACION PUERTO B PI	1	2	0	140	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	ESPI	ESTADO PI	1	2	0	134	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	MNOV	MOVIMIENTO NO VOLUNTARIO	1	2	0	111	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	OS363	PLC ESTADO ENTRAD DIGITALES	1	2	0	135	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	OS364	PLC ESTADO SALID. DIGITALES	1	2	0	136	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	OS370	PLC ESTADO ENTRAD ANALOGICAS	1	2	0	137	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	OS419	ESTADO SECCIONADOR	1	2	0	5	18	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	SEC	SECCIONADOR	31	2	0	6	64	16	46	2	0	11	160	16	2	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	SEC	SECCIONADOR	30	2	0	112	16	16	45	2	0	12	160	16	0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	TMSE	TIEMPO MANIOBRA SECCIONADOR	1	2	0	110	16	16	0	2	0	0	0	0	0	9
43ET01CO	25kV_F	SIST-TE	PSC	MED. POT. SUM. CAT	13	2	0	1	96	16	0	2	0	0	0	0	18.75	9
43ET01CO	25kV_F	SIST-TE	VSC	MED. B.T. CATENARIA	13	2	0	2	96	16	0	2	0	0	0	0	238.3	9

APÉNDICE 7. MAPEADO DEL MAESTRO

TABLA 8.- MAPEADO DEL MAESTRO.

B1	B2	B3	Element	Info	mTK	mCA1	mCA2	mIA1	mIA2	mIA3	bTK	bCA1	bCA2	bIA1	bIA2	bIA3	Value	mQb0
43ET01CA	25kV_C	S01	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	22	160	16							0	9
43ET01CA	25kV_C	S01	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	21	160	16							0	9
43ET01CA	25kV_C	S03	SEC	SECCIONADOR	46	2	0	25	160	16							2	9
43ET01CA	25kV_C	S03	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	26	160	16							0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	40	160	16							0	9
43ET01CA	25kV_C	S35	SEC	SECCIONADOR	46	2	0	39	160	16							2	9
43ET01CA	25kV_C	SIST-TE	OS331	COMANDO TOMA DE MANDO	51	2	0	0	0	18							0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	CLF	ESTADO CALEF AGUJAS	45	2	0	7	160	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF1	REAR	REARME CALEFACTOR	45	2	0	3	144	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	CLF	ESTADO CALEF AGUJAS	45	2	0	13	160	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	CALEF3	REAR	REARME CALEFACTOR	45	2	0	5	144	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	SEC	SECCIONADOR	46	2	0	17	160	16							2	9
43ET01CO	25kV_F	ET1	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	18	160	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	SECBT	INTERRUPTOR BAJA TENSION	45	2	0	4	160	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	INTBT	SECBT	INTERRUPTOR BAJA TENSION	46	2	0	3	160	16							2	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	SEC	SECCIONADOR	46	2	0	5	160	16							2	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL1	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	6	160	16							0	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	SEC	SECCIONADOR	46	2	0	11	160	16							2	9
43ET01CO	25kV_F	SEC-CAL3	SEC	SECCIONADOR	45	2	0	12	160	16							0	9

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR