Cómo el proceso de diseño de ingeniería puede simplificar las pruebas de los sistemas de automatización y control

Eugenio Carvalheira, Andreas Klien

OMICRON electronics

eugenio.carvalheira@omicronenergy.com

***Resumen*—Durante el ciclo de vida de un Sistema de Automatización de Subestación (SAS), las pruebas de las comunicaciones, la lógica de enclavamiento y el funcionamiento adecuado de todas las señales transmitidas a los sistemas de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) requieren un esfuerzo y tiempo considerables. En una subestación que utiliza comunicaciones IEC 61850, todos los datos de ingeniería y configuración pueden guardarse en archivos de formato estándar, los llamados archivos SCL (System Configuration Language, lenguaje de configuración del sistema). Este documento presenta una nueva metodología de prueba que aumenta la eficiencia al probar la automatización y la funcionalidad de control de un SAS. Este artículo trata el modelo de datos del dispositivo electrónico inteligente (IED) y los requisitos del archivo SCL que deben tenerse en cuenta al especificar y diseñar un sistema. El artículo también trata consideraciones sobre el diseño de la red para facilitar las pruebas.**

***Palabras clave*—IEC 61850, SCL, Pruebas, Simulación, Automatización de subestaciones, Control**

I. Introducción

Las pruebas de los ajustes de los elementos de protección de los IED y los esquemas de protección son prácticas muy consolidadas a la hora de probar un sistema de protección, automatización y control (PAC)[6]. Se dispone de herramientas y métodos para las rutinas de pruebas estandarizadas y automatizadas. Pueden crearse planes de prueba para tipos y esquemas de relés específicos que se reutilizarán durante las distintas fases de un proyecto, tales como las pruebas de aceptación en fábrica (FAT), la puesta en servicio, las pruebas de aceptación en campo (SAT) y el mantenimiento.

Por otro lado, las pruebas del SAS, que agrupa las funcionalidades de automatización, control y SCADA, se realiza normalmente de forma manual. Por ejemplo, cuando se analiza el tiempo empleado durante la puesta en servicio, las pruebas del sistema de automatización y comunicación requieren más tiempo que las pruebas de las funciones de protección. Los sistemas de automatización se han vuelto cada vez más complejos y se han visto enormemente aumentados los esfuerzos para probar las comunicaciones, la lógica de enclavamiento y el funcionamiento apropiado de todas las señales transmitidas a los sistemas SCADA.

En las subestaciones con interfaces cableadas convencionales, todas las conexiones de cableado entre los IED tienen que comprobarse como parte de las FAT y SAT. Esto se realiza una a una en un proceso manual de validación de todas las interfaces de los diagramas funcionales y de cableado impresos. Para probar la lógica de los relés, es necesario forzar las entradas físicas y verificar la lógica mediante los LED de monitoreo, las salidas o la ayuda del software del equipo. Para probar la señalización SCADA, se realiza una comprobación de extremo a extremo (también conocida como punto a punto) estimulando las señales directamente a nivel de equipo en la subestación o forzándolas en los IED. Normalmente se requiere documentación adicional, como una hoja de cálculo con la lista y el mapeo de señales de la unidad de terminal remoto (RTU).

En una subestación con interfaces basadas en comunicaciones IEC 61850, el proceso de prueba de la automatización y el control puede mejorarse utilizando software para sustituir algunos de los pasos manuales descritos anteriormente. Este proceso puede ser aún más eficiente si se utilizan algunas características opcionales definidas por la norma IEC 61850 que explotan las capacidades del SCL.

II. La norma IEC 61850 y el concepto SCL

La IEC 61850, la norma internacional para las comunicaciones de las compañías eléctricas, define no sólo los protocolos de comunicación, sino también los modelos de datos para los equipos de subestaciones[3] y los servicios de comunicación abstractos. Las tres clases de servicios de comunicación definidas por la norma que se utilizarán para la protección, automatización y control de subestaciones son las de Cliente/Servidor, GOOSE y Sampled Values (SV). Además, la norma también especifica un concepto de configuración común, independiente del proveedor. En este proceso se utiliza información de configuración legible por máquina en un formato estandarizado basado en XML: el SCL [2].

A. *El proceso de ingeniería de SCL*

El concepto SCL se define en IEC 61850-6. Su objetivo principal es permitir el intercambio de datos de configuración de los sistemas de comunicación, de forma compatible, entre diferentes herramientas de configuración y pruebas.

La fig. 1 muestra el concepto general del proceso de ingeniería de un sistema de automatización de subestaciones con el uso del intercambio de datos SCL.

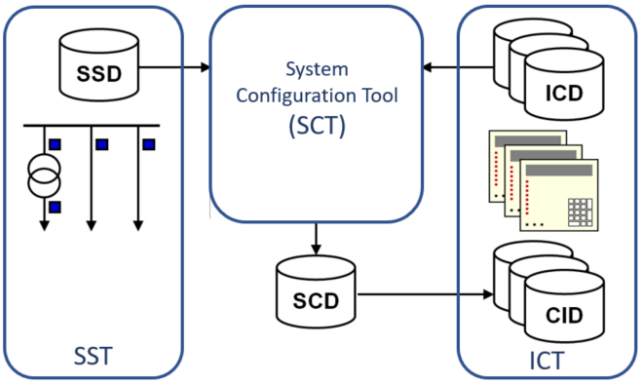

Fig. 1 Concepto SCL

Se especifican los siguientes tipos de archivos SCL, con diferentes extensiones, para el intercambio de información:

- SSD (descripción de especificaciones del sistema): describe el diagrama unifilar de la subestación, los niveles de tensión existentes, el equipo primario y los nodos lógicos necesarios para implementar las funciones de la subestación. El archivo SSD es generado por una herramienta de especificación del sistema (SST).
- ICD (descripción de capacidades de IED): describe las capacidades funcionales de un tipo de IED. Cada tipo de IED tiene su archivo ICD correspondiente. Contiene los nodos lógicos, los datos y los servicios admitidos del IED. Es generado por la herramienta de configuración de IED (ICT).
- SCD (descripción de configuración de subestación): contiene todos los IED configurados, la configuración de comunicaciones y todos los aspectos de la IEC 61850 de un sistema determinado. Es creado por la herramienta de configuración del sistema (SCT).
- CID (Descripción del IED configurado): contiene un subconjunto del archivo SCD con toda la información relacionada con un IED específico. Las extensiones privadas están permitidas.

La edición 2 de la norma define otros dos tipos de archivos. El archivo IID (descripción del IED instanciado) describe un único IED preconfigurado para un proyecto específico y el archivo SED (descripción de intercambio del sistema) que se utilizará para el intercambio de datos entre dos proyectos diferentes.

Existen tres tipos de herramientas de ingeniería en este proceso: Herramienta de especificación del sistema (SST), Herramienta de configuración del sistema (SCT) y Herramienta de configuración de IED (ICT).

La SCT permite a los ingenieros diseñar y configurar el flujo de datos de comunicación IEC 61850 para todo el sistema. Los archivos ICD de todos los IED y el archivo SSD se importan en la SCT. La herramienta debe permitir la configuración de las características IEC 61850 de los IED, la configuración de los enlaces de comunicación horizontales (GOOSE y Sampled Values) y la configuración de los enlaces de comunicación verticales (informes cliente/servidor). Utilizando los datos del archivo SSD, el ingeniero también puede asociar funciones de los IED (nodos lógicos) a los equipos y funciones del esquema unifilar. Al final del proceso, la SCT genera el archivo SCD, que documenta el sistema completo.

La ICT es una herramienta específica del fabricante, utilizada para generar los archivos ICD y para cargar los archivos CID configurados en el equipo.

B. *Alcance del SCL*

El lenguaje SCL en todo su alcance permite describir un modelo que consta de tres partes básicas:

- Subestación: describe el diagrama unifilar de una subestación y los equipos primarios y las funciones que se utilizan; los equipos y las funciones de la subestación están relacionados con los nodos lógicos contenidos en el IED;
- IED: describe todos los dispositivos físicos (IED) utilizados en el sistema de automatización de la subestación. En esta parte se describe el modelo de datos implementado en el equipo, incluyendo sus dispositivos lógicos y nodos lógicos. Los IED se conectan al sistema de comunicación a través de sus puntos de acceso;
- Comunicación: describe las posibles conexiones lógicas entre los equipos en subredes mediante puntos de acceso (puertos de comunicación).

El contenido de un archivo SCD completo se compone de estas tres partes más una sección con plantillas de tipo de datos que describen los datos y atributos que utilizan los IED.

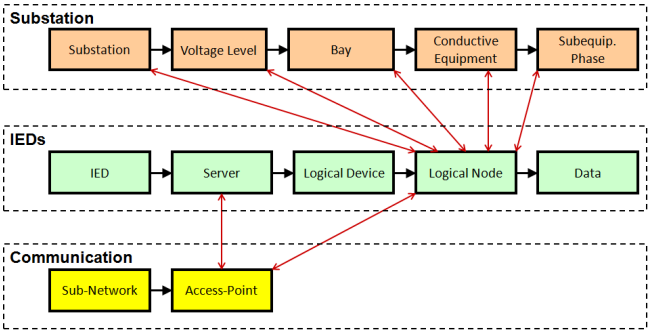

Fig. 2 Contenido simplificado del SCL

C. *Estructura de la Subestación y Nomenclatura Funcional*

La estructura de la subestación representa la arquitectura del sistema primario y describe qué funciones del equipo primario se utilizan y cómo se conecta el equipo. Los objetos de esta sesión se estructuran jerárquicamente y se designan según la IEC 81346. La fig. 3 muestra un ejemplo de diagrama unifilar de una subestación siguiendo las convenciones de nomenclatura de la IEC 81346 para la estructura de la subestación y para equipos tales como interruptores de desconexión y de potencia.

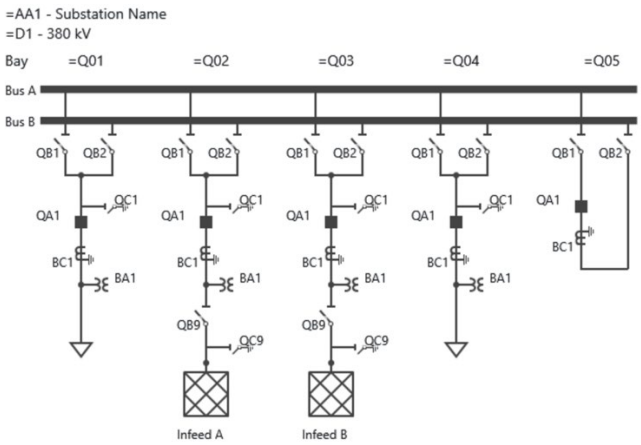

Fig. 3 Ejemplo de topología de subestación

El objetivo principal de este apartado es derivar una designación funcional de los nodos lógicos de los IED a partir de la estructura de la subestación. A la hora de dar nombre a

las señales, las aplicaciones pueden hacer uso de la denominación relacionada con el IED o de la denominación relacionada con la función.

La nomenclatura funcional es una identificación de las señales basada en los nombres de la estructura de la subestación hasta la clase LN, seguida de los nombres completamente estandarizados semánticamente para los objetos y atributos de datos. La posición del interruptor QB1 en la posición Q01 de la fig. 3 podría identificarse con el nombre de ruta AA1D1Q01QB1/CSWI.pos.stVal y asociarse a un nodo lógico CSWI de un equipo situado en la posición AA1D1Q01, donde:

- AA1 - Nombre de la subestación
- D1 - Nombre del nivel de tensión
- Q01 - Nombre de la bahía
- QB1 - Nombre del equipo (seccionador)

D. Contenido y uso de los archivos SCD

Como se ha explicado anteriormente, el archivo SCD es el archivo definitivo resultante de un diseño del sistema IEC 61850 completo. El archivo SCD no sólo es utilizado por herramientas de ingeniería y para fines de documentación, sino también por herramientas de prueba. Las herramientas de prueba pueden facilitar pruebas más eficientes aprovechando la información del archivo SCD sobre la subestación en prueba.

Sin embargo, aunque la norma define un concepto claro para el proceso de ingeniería, no define un requisito de contenido mínimo para el archivo SCD. La información de topología en la sección de la subestación, por ejemplo, es opcional. La información de la sección referente a IED depende de las capacidades de los IED específicos utilizados en el proyecto. Está claro entonces que el grado de eficiencia de las herramientas de prueba depende de las capacidades de los IED seleccionados y de la información general disponible en el archivo SCD.

III. CONSIDERACIONES PARA LA INGENIERÍA DE SISTEMAS IEC 61850

Los requisitos de prueba deben constituir una parte integral del proceso de ingeniería. Para aumentar la eficiencia de las pruebas, la manera de probar el sistema SAS a lo largo de su ciclo de vida debe definirse claramente durante las fases de especificación y diseño inicial.

El apartado anterior aludía al hecho de que la información contenida en el archivo SCD es de extrema importancia para lo que las herramientas de prueba pueden ofrecer. Por lo tanto, es importante entender algunos de los requisitos clave de los IED y los archivos SCD para una prueba óptima. Este apartado tratará algunos de estos requisitos, lo que hay que considerar y cómo plantear la ingeniería del sistema.

A. Requisitos de los IED

1. Modo de Prueba e Indicador de Simulación

Para probar las subestaciones ya energizadas o durante las actividades de mantenimiento, se deben tomar precauciones para aislar los IED que se están probando. Esto evitará cualquier disparo accidental del interruptor de potencia o un intercambio no deseado de señales entre los IED sometidos a prueba. La edición 2 de la norma IEC 61850 indica dos características mejoradas que deberán utilizarse para el aislamiento de la prueba [5].

Una de las características es la posibilidad de poner una función o equipo en modo de prueba utilizando el objeto de datos Modo (Mod). En función del valor de Mod en cada nodo lógico de un dispositivo lógico, el atributo comportamiento (Behavior - Beh) determina el estado del modo de prueba resultante. Los fabricantes de IED suelen optar por una implementación sencilla con un objeto de datos Mod utilizado para poner todo el IED en modo de prueba. Los valores posibles para los objetos de datos Mod son: activado; bloqueado; prueba; prueba/bloqueado y desactivado.

La otra característica es el indicador de simulación en GOOSE y Sampled Values. Los suscriptores deben soportar el uso del indicador de simulación. El objeto de datos LPHD.Sim sirve para alternar entre los mensajes procedentes de los IED reales del sistema y los mensajes simulados procedentes de los equipos o herramientas de prueba.

2. LGOS y LSVS

La verificación de un mensaje de GOOSE o Sampled Values que se está publicando no es una tarea complicada. Como estos mensajes utilizan un mecanismo de multidifusión, pueden detectarse fácilmente en la red. Sin embargo, la verificación de la suscripción de estos mensajes por parte de otros IED no sería una tarea fácil sin la introducción de nodos lógicos de supervisión en el modelo de datos de dichos IED.

La norma IEC 61850-7-4 ed.2[3] define el LGOS (nodo lógico para suscripción GOOSE) que se utilizará para supervisar el estado de las suscripciones GOOSE. Del mismo modo, el LSVS (nodo lógico para suscripción Sampled Values) se utiliza para monitorear el estado de las suscripciones de SV.

Debe haber instancias de nodos lógicos LGOS y LSVS disponibles para cada suscripción configurada, con el fin de permitir que las herramientas de prueba verifiquen automáticamente, mediante una conexión Cliente/Servidor, la recepción de mensajes. La herramienta de prueba puede identificar problemas, ya sea cuando no se recibe el GOOSE/SV o cuando hay un desajuste de configuración entre el publicador y el suscriptor.

3. Propietarios de informes y Datasets Estáticos

El Informe (Report) es un servicio Cliente/Servidor definido por la norma y utilizado en sistemas SCADA para transmitir una lista de eventos desde un servidor (IED) a un cliente (RTU, puerto de enlace o interfaz hombre-máquina - HMI). Utiliza el protocolo MMS y establece una conexión uno a uno entre clientes y servidores.

Los bloques de control de informes en el modelo de datos del equipo contienen los parámetros de configuración de los informes. La norma define un atributo opcional "propietario" que puede utilizarse para identificar qué cliente está utilizando el informe. Al sondear el valor del atributo “propietario” del bloque de control de informes, una herramienta de

prueba puede comprobar si las conexiones Cliente/Servidor preconfiguradas están activas.

Los informes utilizan los Datasets para determinar qué atributos (señales) del modelo de datos se incluirán en el informe. Los Datasets se pueden crear de forma estática o dinámica. El cliente crea un Dataset dinámico después de establecer la conexión con el servidor, es decir, el cliente define el contenido del informe. El contenido de los Datasets dinámicos no se describe en el archivo SCD y normalmente se documenta por separado en una "tabla de señales SCADA" que a menudo es incompleta o inconsistente. Por otro lado, un Dataset estático se define en la herramienta de configuración del sistema SCT mientras se configura el equipo y no puede ser modificado por un cliente. La utilización de Datasets estáticos tiene la ventaja de que los datos del informe se describen en el archivo SCD y están disponibles con fines de documentación y verificación. En cualquier caso, el Dataset debe incluir sólo aquellos objetos de datos (señales) que de hecho son procesados por el cliente correspondiente. Sobrecargar el Dataset con todas las señales disponibles en el modelo de datos del equipo sólo creará cargas innecesarias en la red, dificultará las pruebas de las señales y producirá archivos SCD muy grandes.

B. Requisitos del archivo SCD

En esta sección se tratan algunos requisitos para el contenido de los archivos SCD. A efectos ilustrativos, se mostrará un ejemplo de extractos de archivos SCD para demostrar cómo se debe incluir la información y las ventajas consecuentes para las herramientas de prueba. Es importante mencionar que los usuarios que configuran el sistema no deben editar manualmente estos archivos SCD. La herramienta de configuración del sistema debe ofrecer una interfaz gráfica sencilla para la creación y configuración del archivo SCD.

1. Topología de las subestaciones y asociación entre la aparamenta y los nodos lógicos

Como se mencionó en la sección anterior, la parte referente a la subestación del archivo SCD es opcional. Si las herramientas de ingeniería soportan la configuración y esta sección se estructura correctamente, las herramientas de prueba podrán mostrar los IED y equipos en la ubicación correcta de forma estructurada.

La fig. 4 muestra parte de la sección del SCL referente a la subestación de nuestro ejemplo de subestación de la fig. 3. La estructura jerárquica <Subestación>, <Nivel de tensión>, <Bahía> y <Equipo> está presente y configurada.

```
<Substation desc="Munich" name="AA1" sxy:x="1" sxy:y="5">
  <PowerTransformer name="TA1" sxy:y="9" type="PTR">
  <PowerTransformer name="TA2" sxy:x="15" sxy:y="9" type="PTR">
  <VoltageLevel name="D1">
    <Voltage multiplier="k" unit="V">380</Voltage>
    <Bay desc="TF1" name="Q01" sxy:x="1" sxy:y="2">
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q01F1" lnClass="PDIS" lnI
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q01F1" lnClass="PTOC" lnI
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q2" ldInst="T3S1S1" lnClass="ATCC" lnIn
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q2" ldInst="T3T1P1" lnClass="YLTC" lnIn
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q2" ldInst="T3T1P1" lnClass="YPTR" lnIn
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q01F1" lnClass="PTRC" lnI
      <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q01F1" lnClass="RBRF" lnI
      <LNode lnClass="MMXU" lnInst="1"/>
      <ConductingEquipment name="BC1" sxy:y="4" type="CTR">
      <ConductingEquipment name="QA1" sxy:y="5" type="CBR">
        <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q02QA1" lnClass="CILO"
        <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q02QA1" lnClass="XCBR"
        <LNode iedName="AA1D1Q01Q1" ldInst="C1Q02QA1" lnClass="CSWI"
        <Terminal bayName="Q01" cNodeName="L11" name="L11" substation
        <Terminal bayName="Q01" cNodeName="L12" name="L12" substation
      </ConductingEquipment>
```

Fig. 4 Ejemplo de la sección referente a la subestación del SCL

La fig. 5 muestra un ejemplo de una herramienta de prueba después de importar el archivo SCD de la subestación de ejemplo de la fig. 3. Las 5 bahías (sólo se representan 3 en la figura) de la subestación de 380 kV están agrupadas de acuerdo con los respectivos interruptores de desconexión y de potencia asignados a cada bahía. Los IED también se asignan en las bahías correspondientes. Aunque la información del diagrama unifilar no está totalmente presente en este caso, la información es suficiente para que la herramienta de pruebas muestre el equipo y los IED de una manera descriptiva y comprensible.

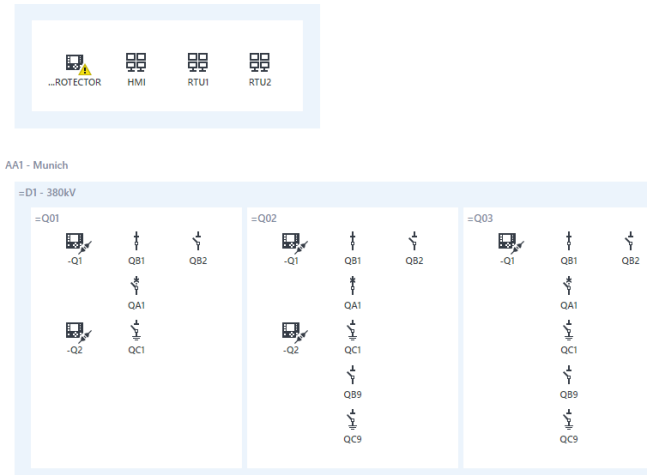

Fig. 5 Ejemplo de subestación mostrada en la herramienta de pruebas

La aparamenta (por ejemplo, interruptores de potencia y seccionadores) deben estar asociados a los nodos lógicos del IED. La herramienta de ingeniería debe permitir una configuración gráfica de esta asociación y su definición en la sección referente a la subestación del SCL utilizando las referencias <LNode>. La fig. 4 muestra el ejemplo de SCL del interruptor de potencia QA1 en la bahía Q01 que está asociado a los nodos lógicos "XCBR", "XSWI" y "CSWI" del IED denominado AA1D1Q01Q1. La fig. 6 muestra estas señales asociadas al interruptor de potencia QA1 al seleccionarlo en el diagrama de la herramienta de prueba. Al estar asociadas a nodos lógicos del equipo Q1, la herramienta puede indicar si estas señales están siendo transmitidas por el equipo a través de GOOSE o de Reports. En la fig. 6 las señales GOOSE están representadas por las líneas púrpura, y los informes están representados por las líneas verdeazuladas.

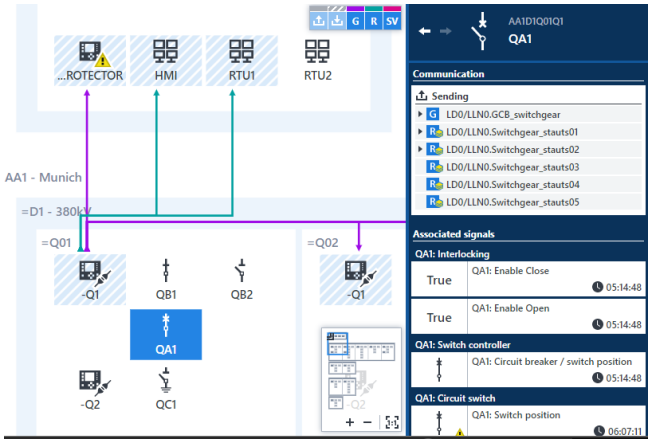

Fig. 6 Señales asociadas al interruptor de potencia QA1

Al igual que el interruptor de potencia, los TC y los TT también pueden tener referencias <LNode> a los nodos lógicos "TCTR" y "TVTR" de los IED.

2. *Atributos descriptivos de SCL*

Si los objetos de datos están equipados con atributos de descripción "desc" de SCL, la herramienta de pruebas puede mostrar este texto como nombre de la señal. Las herramientas de ingeniería a menudo permiten al usuario introducir nombres personalizados para los objetos de datos. En lugar de visualizar los nombres IEC 61850de los nodos lógicos, objetos de datos y atributos, el usuario puede ver las señales de acuerdo con sus propios criterios de nomenclatura. La complejidad de la norma IEC 61850 se puede ocultar, mostrándola sólo si se solicita. La fig. 7 muestra una descripción clara de la posición del interruptor de potencia en la ventana principal, mientras que el nombre del nodo lógico XCBR sólo se muestra en la vista detallada.

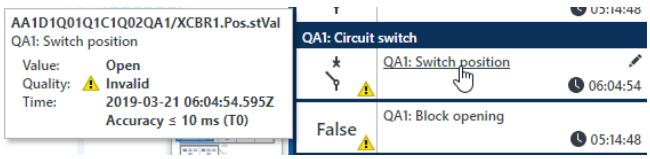

Fig. 7 Visualización de la descripción de señales

3. *Configuración GOOSE*

El nodo lógico LGOS descrito en la sección de requisitos de IED define qué mensajes GOOSE se están suscribiendo y permite supervisar el estado de suscripción. El lenguaje SCL ofrece también otras formas de describir las suscripciones. Pueden describirse en la sección de IED del archivo SCL utilizando el elemento <IEDName> bajo el bloque de control GOOSE (<GSEControl>) o utilizando elementos <Inputs><ExtRef type="GOOSE">. La fig. 8 muestra la configuración GOOSE del IED AA1D1Q01Q1 en el archivo SCD de nuestra subestación de ejemplo y describe que otros cinco IED están suscritos a él.

```
<GSEControl name="GCB_switchgear" type="GOOSE" datSet="
  <IEDName>BB_PROTECTOR</IEDName>
  <IEDName>AA1D1Q02Q1</IEDName>
  <IEDName>AA1D1Q03Q1</IEDName>
  <IEDName>AA1D1Q04Q1</IEDName>
  <IEDName>AA1D1Q05Q1</IEDName>
</GSEControl>
```

Fig. 8 Suscripciones GOOSE definidas en el SCD

Las herramientas de prueba pueden entonces representar los vínculos y la relación entre el publicador y los suscriptores, tal como se representa en la fig. 9.

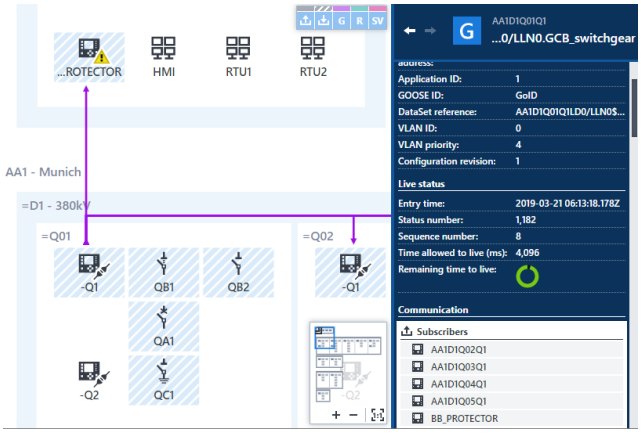

Fig. 9 Representación de las conexiones GOOSE

Otra información valiosa sobre la configuración GOOSE, que debe incluirse en el archivo SCD, son los atributos "minTime" y "maxTime". Estos atributos son opcionales y describen los tiempos mínimos y máximos de retransmisión utilizados por el IED que publica el GOOSE.

4. *Configuración del informe*

Al igual que el GOOSE descrito anteriormente, las conexiones de Report para el sistema SCADA también se pueden describir en el archivo SCD. Las HMI, RTU o puertas de enlace pueden tener bloques de control de informes reservadas en dicho archivo. Esto debe declararse usando <ClientLN> en el elemento <ReportControl> como se ilustra en las fig. 10 y fig. 11.

```
<ReportControl name="Measurments" buffered="true" bufTime="100" dat
    <TrgOps dchg="true" qchg="true" dupd="true" period="true" gi
    <OptFields seqNum="true" timeStamp="true" dataSet="true" rea
    <RptEnabled max="5">
<ClientLN iedName="HMI" ldInst="none" lnInst="1" lnClass="IHMI"/>
<ClientLN iedName="RTU1" ldInst="none" lnInst="1" lnClass="ITCI"/>
  </RptEnabled>
    </ReportControl>
```

Fig. 10 Bloque de control de informes con clientes reservados

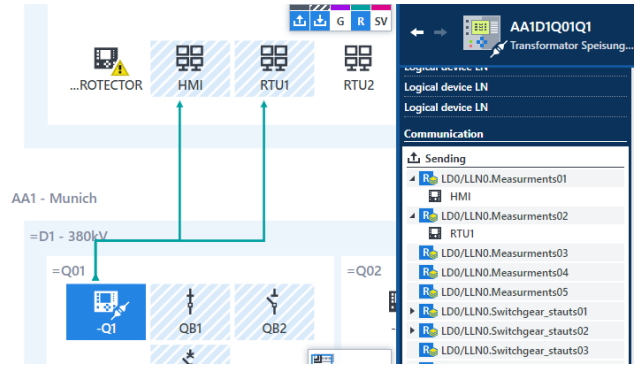

Fig. 11 Herramienta de pruebas que muestra las conexiones de los informes

C. *Diseño de la red*

Al diseñar la red de comunicaciones [4], los ingenieros deben tener en cuenta las pruebas a realizar. Mientras que las pruebas durante una FAT pueden disponer de flexibilidad en términos de conectar y desconectar dispositivos de la red,

debe haber fuertes limitaciones tan pronto como la subestación esté energizada. Durante la fase de especificación de SAS debe especificarse un procedimiento de prueba claro, y casos de prueba para diferentes escenarios. La red debe permitir la realización de pruebas sin exponer el sistema a posibles problemas de mal funcionamiento o de ciberseguridad.

1. Topología de la red

Al diseñar la topología de la red, los puntos de acceso físico para pruebas deben estar claramente definidos y representados en la documentación de SAS. También hay que tener en cuenta la ubicación física de los puntos de acceso. El personal de pruebas debe estar bien informado acerca de dónde conectar los equipos y las computadoras de prueba en un evento de prueba específico. Para el monitoreo del sistema de comunicaciones, debe estar disponible el acceso a todos los segmentos de la red, al bus de proceso y al bus de estación, dando visibilidad a todo el sistema. En el caso de redes redundantes HSR (redundancia sin fisuras de alta disponibilidad) y PRP (protocolo de redundancia paralela), se debe considerar el uso de RedBox (caja redundante) para la conexión de los equipos de prueba.

2. Control del tráfico

Para prevenir o minimizar las sobrecargas, se puede limitar el tráfico innecesario en la red. El filtrado multidifusión o VLAN son dos mecanismos que pueden utilizarse para controlar el tráfico en una red. VLAN, por ejemplo, permite una separación lógica de una red. Durante el diseño de ingeniería, cada GOOSE y Sampled Values puede asignarse a dominios VLAN mientras que cada puerto de los conmutadores está configurado a la VLAN a la que pertenece. La capacidad de probar el sistema SAS debe tenerse en cuenta al diseñar los controles de tráfico para evitar la necesidad de cualquier cambio de configuración posterior sólo con fines de prueba. Un ejemplo, en el caso del filtrado VLAN, es predefinir qué puertos se utilizarán para conectar los equipos de prueba y configurar los dominios VLAN de estos puertos en consonancia.

IV. Pruebas del sistema de automatización de subestación

A. *Metodología de prueba*

Como se mencionó anteriormente en este documento, las pruebas de la funcionalidad de automatización y control se realizan normalmente de forma manual. Se dispone de herramientas que ofrecen capacidades de prueba para cada IED, lo que permite probar y simular los IED de forma individual.

El método presentado aquí extiende la prueba desde la prueba y simulación de un solo IED hasta la prueba de todo el sistema de automatización de la subestación. La prueba se basa completamente en el archivo de configuración SCD del sistema. Al importar el archivo SCD, se puede visualizar todo el sistema y utilizar toda la información disponible en el archivo. La información de la sección de la subestación se utiliza para situar los IED y la aparamenta dentro de sus niveles de tensión y bahías. Como se puede ver en la fig. 5, el operador de pruebas puede visualizar el sistema de una manera muy similar al diagrama unifilar o a la interfaz hombre-máquina de la subestación local, con la que ya está familiarizado.

El método propuesto es adecuado para probar el SAS durante todo el ciclo de vida del proyecto, cuyas fases se describen en la norma IEC 61850-4 y se ilustran en la fig. 12. La herramienta que utilice este método deberá soportar tanto el monitoreo como la simulación del sistema. Al probar el sistema, el equipo de prueba debe tener acceso al tráfico de red y una conexión MMS a los IED.

Fig. 12 Ciclo de vida del proyecto SAS

Durante la especificación, el archivo SCD puede validarse y utilizarse para la configuración de los dispositivos. El desarrollo y las pruebas de las RTU y HMI del SCADA pueden comenzar por simular el comportamiento de comunicación de todos los IED del sistema. Durante la FAT, se pueden simular los IED que aún no están presentes para probar los ya instalados y disponibles. A medida que el proyecto entra en la fase de puesta en servicio, se realiza una mayor supervisión y pruebas de los IED reales en lugar de una simulación.

Uno de los factores clave para un planteamiento eficiente es la opción de crear planes de prueba. Un procedimiento de prueba puede documentarse y reutilizarse a lo largo de todo el ciclo de vida del SAS. Las secuencias de prueba se pueden realizar y evaluar automáticamente.

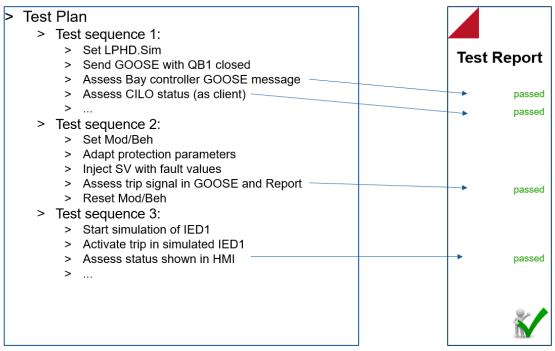

Fig. 13 Ejemplo de plan de prueba

En las siguientes secciones del documento se examinan algunos casos de prueba relacionados con el sistema SAS.

B. *Verificación de los enlaces de comunicación*

Al cargar el archivo SCD y tener acceso al tráfico de red y a la conexión MMS con los IED, la herramienta de prueba puede validar automáticamente todos los enlaces de comunicación GOOSE, Sampled Values y Report.

El equipo de prueba puede solicitar los atributos de los IED y validarlos con el modelo. Puede comprobar, por ejemplo, si los bloques de control de informes están activados y si los propietarios de los informes son los clientes declarados en el archivo SCD.

Los enlaces de comunicación de GOOSE pueden verificarse en busca de:

- Discordancia de GOOSE en el lado del remitente: verificando la configuración del bloque de control;
- Errores de publicación de GOOSE: buscando en la red y cotejando con el SCD;
- Errores de suscripción GOOSE: verificando el estado del LGOS en cada IED suscrito. También se comprueban las discordancias.

La fig. 14 ilustra un ejemplo en el que el GOOSE publicado por un IED se detecta correctamente en la red, pero se identifica un problema en uno de los suscriptores debido a una discordancia en la revisión de la configuración. El enlace de conexión se resalta en amarillo y se muestran señales de advertencia para indicar el problema.

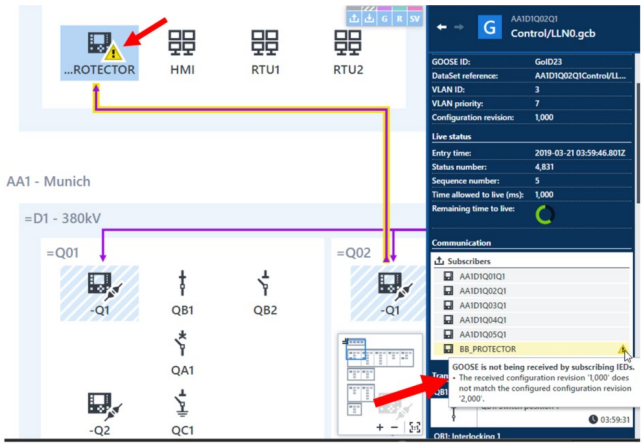

Fig. 14 Comprobación de los enlaces publicador-suscriptor de GOOSE

C. *Comprobación de las lógicas de enclavamiento*

Los IED implementan funciones lógicas para ejecutar múltiples funciones de automatización. Con este método se pueden probar automáticamente, simulando las entradas de la lógica (ya sea mediante simulación del IED o mediante el estado real de la aparamenta) y se puede evaluar el resultado de la lógica. Un ejemplo de aplicación es el uso de la lógica para esquemas de enclavamiento, a fin de asegurar la secuencia de operación apropiada de los seccionadores de desconexión y de puesta a tierra. Para representar el resultado de las condiciones lógicas de enclavamiento, IEC 61850 representa el estado de la liberación en el nodo lógico CILO. Para la comprobación se pueden comprobar todas las combinaciones de entradas y evaluar la salida lógica mediante la lectura automática de los valores de estado CILO.

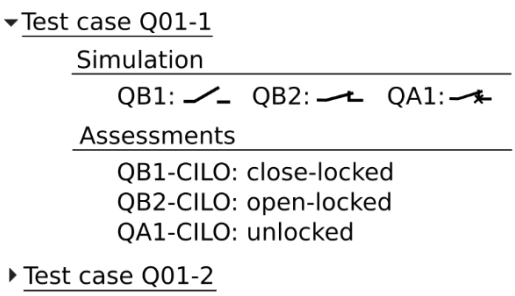

Fig. 15 Prueba de esquemas de enclavamiento

D. *Resolución de problemas mediante el rastreo de señales*

Dentro de un sistema SAS se realizan múltiples transferencias de mensajes y señales. Una señal pasa por varias etapas hasta llegar al centro de control. Si hay un error en esta comunicación, el ingeniero de puesta en servicio debe seguir la señal en su camino por el SAS. Encontrar tales errores de señal en el caso de las subestaciones convencionales con cable es muy lento. Utilizando el método de prueba indicado en este documento, dentro de una subestación IEC 61850, es posible trazar la propagación de las señales por el SAS.

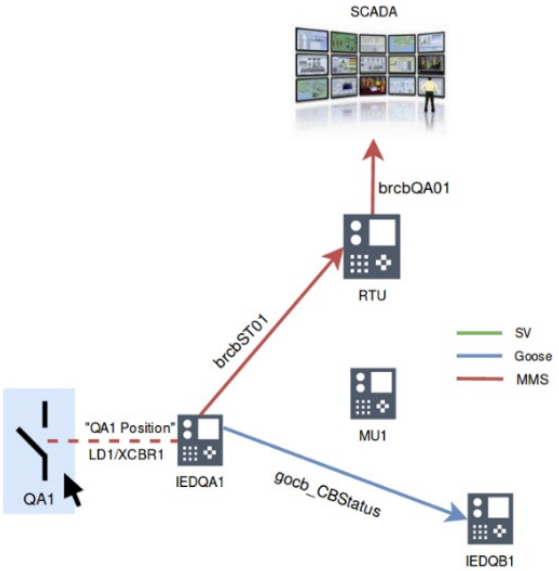

Fig. 16 Posición del interruptor de potencia transmitida por el SAS

E. *Prueba de la RTU/puerta de enlace y configuración local de la HMI*

Las puertas de enlace (gateway), RTU y HMI locales suelen comunicarse con casi todos los IED del sistema, principalmente a través de Reports, pero también con GOOSE. Típicamente, tienen que probarse varios miles de señales. Durante la puesta en servicio, al menos las señales más críticas se prueban punto a punto estimulando la señal en la subestación. Todas las demás señales pueden simularse con una herramienta de prueba. Se puede construir un plan de pruebas que simule todos los IED y las señales de la subestación para una verificación más rápida.

Las puertas de enlace/RTU, HMI y otros IED en general suelen necesitar actualizaciones de firmware y parches de seguridad durante su vida útil. Los dispositivos se pueden volver a probar (control de cordura – sanity check) fácilmente después de la actualización, ejecutando el plan de pruebas ya preparado para ese dispositivo antes de volver a ponerlo en funcionamiento. Estas pruebas pueden realizarse en la subestación con todos los demás IED simulados por una moderna herramienta de prueba, sin afectar a los dispositivos en funcionamiento.

V. Conclusión

El SCL definido en la norma IEC 61850-6 constituye una de sus mayores ventajas. Permite la interoperabilidad entre las herramientas de ingeniería. Todos los aspectos del sistema de comunicación pueden guardarse en un archivo SCD que constituye la documentación definitiva del sistema. Esto es particularmente importante ya que cada vez más el cableado de señales entre bahías es reemplazado por el uso extensivo de los servicios GOOSE y de esa manera, el archivo SCD se vuelve tan relevante como antes lo habían sido los planos y diagramas de cableado. Sin embargo, la falta de herramientas que aprovecharan al máximo las capacidades del lenguaje SCL fue uno de los retos a los que se enfrentaron los primeros usuarios. Esta situación está cambiando con la mejora de las herramientas. Algunas de las características clave definidas en la edición 2 de la norma también se están implementando finalmente en los IED.

Los ingenieros de puesta en servicio y mantenimiento que utilizan herramientas de prueba modernas también pueden beneficiarse de toda la información disponible en los archivos SCD. Para maximizar las capacidades de las herramientas, deben cumplirse los requisitos clave de los IED y del SCL, por lo que éstos deben solicitarse en las especificaciones técnicas de las licitaciones y los contratos de compra. Estos requisitos se tratan en este documento para asistir a los ingenieros en la especificación y diseño del sistema SAS.

Se presentó un enfoque de prueba innovador para probar la parte de Comunicación, Automatización, Control y SCADA del sistema SAS, que se basa en la información del archivo SCD. Ahora se pueden crear planes de prueba para documentar y automatizar los procedimientos de prueba que hasta ahora exigían mucho tiempo. Los planes de prueba automatizados también permiten una rápida repetición de la prueba después de aplicar los parches de seguridad y las actualizaciones de firmware, que hoy en día se realizan con bastante frecuencia. Las pruebas se están convirtiendo en una parte integral del sistema y evolucionan rápidamente hacia una función de supervisión y monitoreo.

VI. Referencias

[1] IEC 61850-4 Ed.2: 2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 4: System and project management.

[2] IEC 61850-6 Ed. 2: 2009: Communication networks and systems for power utility automation - Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs.

[3] IEC 61850-7-4 Ed. 2: 2010: Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-4: Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes.

[4] IEC TR 61850-90-4: 2013: Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-4: Network Engineering Guidelines.

[5] C. Brunner, F. Steinhauser, “Testing and IEC 61850 Edition 2 – what does it mean for the Protection Engineer”, International Protection Testing Symposium, 2010.

[6] E. Carvalheira, J. Coronel, “A Testing Approach for Commissioning the entire Protection System in Sampled Values Based Substations”, SIPSEP – Simposio sobre Protecciones de Sistemas Electricos, México, 2013.

[7] A. Klien, T. Schossig, “New Methods for Testing Automation and Control”, PACWorld Americas Conference, Raleigh, NC, 2018.

VII. Biografías

Eugenio Carvalheira recibió su licenciatura en Ingeniería Eléctrica en Brasil y su maestría en Ingeniería Computacional en Alemania. Cuenta con más de 17 años de experiencia en el diseño y puesta en servicio de sistemas de protección, automatización y control de sistemas eléctricos. Se incorporó a OMICRON en 2008 como ingeniero de aplicaciones y actualmente es director de ingeniería para Norteamérica con sede en Houston, TX. También es miembro activo de IEEE-PES-PSRC.

Andreas Klien obtuvo el grado de maestría de ingeniero informático en la Universidad Politécnica de Viena. Se incorporó a OMICRON en 2005, trabajando con IEC 61850 desde entonces. Desde 2018, Andreas ha sido responsable del negocio de comunicaciones de compañías eléctricas de OMICRON. Sus campos de experiencia son la comunicación en subestaciones, SCADA y la seguridad cibernética de sistemas de energía. Como miembro del WG10 en TC57 de IEC, participa en el desarrollo de la serie de normas IEC 61850.