



## Importancia de la redundancia lógica en una arquitectura de red IEC 61850

Frankz Peter Lindstrom<sup>(1)</sup>, Mario López Acosta<sup>(2)</sup>, Tamatiá Colmán<sup>(3)</sup>,

Centro de Innovación en Automatización y Control

Fundación Parque Tecnológico Itaipu

Paraguay

### RESUMEN

Con la implementación de la norma IEC 61850 en la automatización de Subestaciones, el diseño de la red de comunicación basado en una red Ethernet pasó a tener una gran importancia para la confiabilidad del sistema. En este sentido un aspecto a ser llevado en cuenta es la redundancia del sistema debido a que los mensajes *trip* y de bloqueo son considerados altamente críticos y además para la correcta especificación del *backbone* y enlaces de la red.

La norma IEC 61850 define en una red Ethernet mensajes GOOSE y Sample Values, que son mensajes de tiempo crítico. Para atender los requerimientos de tiempo, la comunicación de estos tipos de mensajes publicados por los IEDs son hechos a nivel de capa 1 del modelo TCP/IP (Capa 2 del modelo OSI), por lo que los protocolos de redundancia como el Spanning Tree Protocol (STP) adquieren una gran importancia para evitar la saturación de estos mensajes en la red que pueden provocar la caída de los enlaces.

En este trabajo se analizan los conceptos y la importancia de los protocolos de redundancia, también se muestran ensayos que permiten visualizar la influencia de dichos protocolos en el comportamiento de los mensajes GOOSE en la arquitectura de las redes de comunicación basadas en la Norma IEC 61850.

### PALABRAS CLAVES

Norma IEC 61850, switch, MAC Address, GOOSE, loops, Spanning Tree Protocol, Rapid Spanning Tree Protocol.

## 1. INTRODUCCIÓN

Al realizar el diseño de la red de comunicación los ingenieros buscan minimizar las fallas de comunicación aplicando a la red Ethernet redundancia en la topología física con la instalación de switches. Los switches son dispositivos intermediarios que trabajan a nivel de capa 2 del modelo OSI, es decir son dispositivos que encaminan las tramas Ethernet utilizando una lógica basada en las direcciones MAC que se encuentran dentro de la trama; el switch recibe la trama y en caso de desconocer en qué puerto se encuentra el receptor del mensaje, envía a todos sus puertos (*broadcast*), de manera que cada dispositivo conectado al switch reciba ese mensaje.

La norma IEC 61850 define en una red Ethernet mensajes GOOSE y Sample Values, que son mensajes de tiempo crítico, donde la comunicación de estos tipos de mensajes publicados por los IEDs se basan en una lógica de direcciones MAC. El hecho de tener una red redundante físicamente trae consigo algunos problemas como:

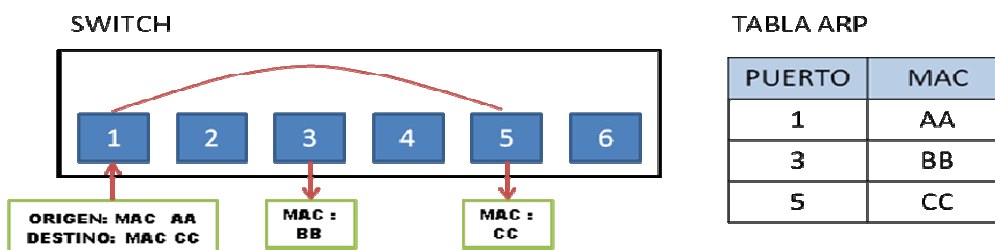
- La circulación de múltiples copias de tramas debido a que cada dispositivo puede recibir el mensaje por varios enlaces.
- La generación de tormentas *broadcast*, que son tramas sin destino específico que circulan de forma repetitiva en la red.

La consecuencia a todo esto sería la saturación de la red debido al gran flujo de mensajes que estará circulando y en un caso extremo podría producir la pérdida de un enlace, de ahí la gran importancia de los protocolos de redundancia cuyo objetivo principal es la de evitar la generación de *loops* (ciclos o bucles).

En este trabajo se analizan los conceptos y la importancia de los protocolos de redundancia, además de ensayos que permitan visualizar su influencia con relación al comportamiento de los mensajes GOOSE en la arquitectura de las redes de comunicación basado en la Norma IEC 61850.

## 2. SPANNING TREE PROTOCOL – STP

El switch examina cada trama Ethernet y crea una tabla de direccionamiento llamado ARP (Address Resolution Protocol), que identifica la dirección MAC del equipo conectado a cierto puerto del switch, así cuando llega una trama para una determinada dirección MAC, el switch sabe en qué puerto de salida se encuentra para enviarlo, como se ejemplifica en la figura 1.





**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**19, 20 y 21 de Setiembre de 2012**

---

Si llega una trama y su dirección MAC de destino es desconocido por el switch, esta trama es enviada a todos los puertos creándose tormentas *broadcast* en la red, esta situación se agrava cuando la red posee un topología física redundante debido a que estas tramas comienzan a circular de forma indefinida por toda la red produciendo *loops*, lo que puede llegar a saturar la red o en caso extremo producir la pérdida del enlace.

Al parecer el principal problema de la generación de *loops* es la topología física redundante de la red, sin embargo, si la red no es redundante y ocurre una falla de enlace, se puede perder conectividad.

El STP es un protocolo de redundancia de la capa de enlace del modelo OSI cuya función es la de evitar la formación de *loops* en una red redundante. Cuando se envía una información por una red redundante se tiene varios caminos por donde circula la información hasta llegar a destino, entonces el STP activa un solo camino, si se pierde este destino, se activa otro camino evitando así la formación de *loops*. La idea del STP es podar enlaces con el fin de reducir la topología de la red a la de un árbol extendido donde se conecta todos los switches y eliminando de esa forma la formación de *loops*.

## 2.1 Funcionamiento del STP

El STP es un algoritmo el cual diseña una topología lógica en forma de árbol extendido para evitar la formación de *loops*. Para eso sigue una secuencia de procesos que consideran ciertos parámetros físicos y características predeterminadas como se menciona a continuación:

- Elección del switch raíz: los switches se comunican entre ellos mediante el envío de datos específicos denominados BPDU (Bridge Protocol Data Unit) a través de todos sus puertos. La dirección del receptor del paquete BPDU es una dirección de grupo multicast, lo que permite que el BPDU puede atravesar dispositivos de capa 1 del modelo OSI (Hub). El paquete BPDU contiene información de la dirección MAC y la prioridad definida por el usuario al switch. Cada switch recibe el BPDU lo compara con el propio y dependiendo del resultado decide seguir o no intentando ser un switch raíz. La elección del switch raíz es el switch con valor de prioridad más bajo, caso más de un switch tenga prioridad igual, el switch de menor dirección MAC será el switch raíz. Solamente un switch de todos los que forman parte de la red es designado como switch raíz los demás permanecen en estado Bridge. El switch raíz es solamente el punto de inicio de la topología a ser construida.
- Selección del puerto raíz: Una vez definido el switch raíz, el STP designara un puerto raíz en los demás switches como puerto más cercano al switch raíz a través del coste de la ruta raíz donde el puerto de menor coste será el puerto raíz.
- Elección del puerto de designación por segmento: varios switches en estado bridge pueden estar conectados al mismo segmento Ethernet donde el puerto del bridge de menor costo en dirección al switch raíz es colocado en estado forwarding y los demás puertos quedan en estado blocking. Las tramas solo se envían entre los puertos raíz y los puertos designados para los segmentos correspondientes.

Después de estos procesos, la red entra en la fase estable. En este estado posee las siguientes características:

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**19, 20 y 21 de Setiembre de 2012**

---

- Solo hay un switch anunciando ser la raíz. Este dispositivo informa enviando periódicamente BPDU a través de todos sus puertos. Este intervalo de envío es conocido como “*Hello Time*”. Si en el periodo de tiempo definido por el parámetro *Max Age Time* no llega ningún BPDU *Hello*, los switches inician la reconfiguración de la topología lógica de la red.
- En cada segmento ethernet existe un puerto designado. Comparado con otros puertos es el que tiene el coste de ruta más bajo, pero si existen puertos con valores de costo iguales entonces el puerto con el BPDU más bajo es el asignado.

Definiendo estos parámetros es posible regular como de rápido los switches pueden encontrar los cambios de topología y habilitar los enlaces de reserva.

## 2.2. RAPID SPANNING TREE PROTOCOL – RSTP

El STP sufre de algunos inconvenientes que limitan la capacidad de su uso como el tiempo de convergencia ante cualquier modificación sufrida en la arquitectura que es de al menos 30 segundos, es decir, el tiempo en que tarda para generar su nueva topología lógica y el *Hello time* es de 2 segundos. Estos tiempos son muy altos para los requerimientos de los mensajes GOOSE.

El RSTP es un protocolo STP mejorado donde el tiempo de convergencia ante una falla de enlace y el tiempo de recuperación es menor a 2 segundos además el *Hello time* es menor a 1 segundo.

## 3. EFECTOS DE LOS PROTOCOLOS DE REDUNDANCIA LOGICA EN LA ARQUITECTURA DE LA RED

En la figura 2 se muestra una arquitectura de red de comunicación de una subestación típica basado en la IEC61850 donde se utiliza una topología de anillo simple entre switches y en forma de estrella simple entre IED's y switch. La metodología del ensayo consistió en lo siguiente:

- Cada IED se encuentran en casetas diferentes y publican mensajes GOOSE en diferentes VLAN, donde todo el sistema está siendo monitoreado en una central que se encuentra distante a las casetas.
- El protocolo de redundancia utilizado fue el RSTP debido a su tiempo de convergencia.
- Se definió que el switch 3 seria el switch raíz donde fue definido con una prioridad de 28672 y es el switch de menor dirección MAC, los demás switch fueron definidos con una prioridad de 32768.

Como se observa en la figura 3, el switch 3 quedo definido como switch raíz esto debido a que la prioridad definida para este switch era menor con relación a los demás switches. Cuando el IED 3 publica mensajes GOOSE a los demás IED's tendra que realizar 3 saltos, es decir las latencias son iguales.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

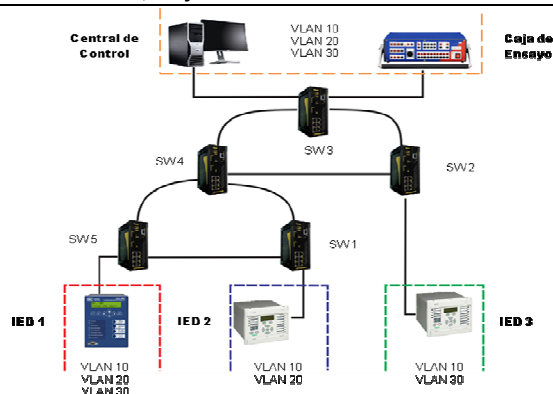


Figura 2: Arquitectura de red del ensayo

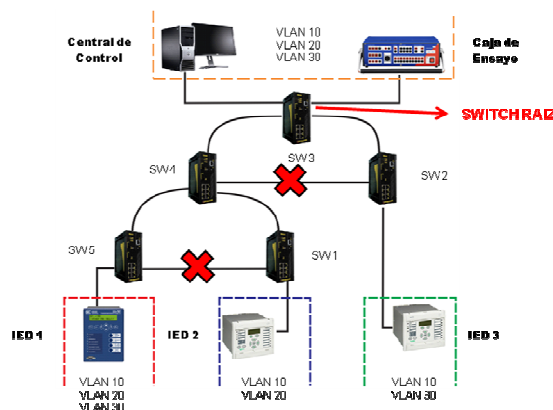


Figura 3: Topología aplicando el protocolo RSTP

De forma a comparar, en la figura 4 y en la figura 5 se muestran capturas de los datos del RSTP de los switch 3 y switch 4 respectivamente. En el switch 3 el estado del switch (Bridge Status) es switch raíz, esto también se verifica en el identificador del switch raíz (Root ID) donde la prioridad y la dirección MAC es igual a la del switch 3 (Bridge ID). Otro dato importante es que el switch no posee un puerto raíz, esto es debido a que el switch es la raíz de la topología de la red. Sin embargo en el switch 4 su estatus es de ser un switch bridge, y se verifica en la prioridad y la dirección MAC del switch raíz, en este caso los valores pertenecen al switch 3. Además se observa que el puerto raíz es el puerto 1 del switch y que su costo es de valor 19, es decir que el puerto 1 es el puerto de menor coste al switch raíz por el cual los datos que se desea enviar a la central van a pasar por este puerto permaneciendo el resto de los puertos de enlace entre switches en estado bloqueado.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

```

Bridge Status                               Root Bridge
Bridge ID                                   28672/00-0A-DC-04-2B-00
Root ID                                    28672/00-0A-DC-04-2B-00
Root Port
Root Path Cost                             0
Configured Hello Time                     2
Learned Hello Time                        0
Configured Forward Delay                  15
Learned Forward Delay                     0
Configured Max Age                        20
Learned Max Age                           0
Total Topology Changes                    16
Time since Last TC                        0 days, 00:04:18
    
```

Figura 4: Estadística RSTP del switch 3

```

Bridge Status                               Designated Bridge
Bridge ID                                   32768/00-0A-DC-22-75-E0
Root ID                                    28672/00-0A-DC-04-2B-00
Root Port                                  1
Root Path Cost                             19
Configured Hello Time                     2
Learned Hello Time                        2
Configured Forward Delay                  15
Learned Forward Delay                     15
Configured Max Age                        20
Learned Max Age                           20
Total Topology Changes                    18
Time since Last TC                        0 days, 00:12:40
    
```

Figura 5: Estadística RSTP del switch 4

3.1 Modificación de la arquitectura de la red

Para una ampliación futura se necesitara modificar la arquitectura de la red donde será introducido switches para cubrir esa necesidad. En la figura 7 se muestra como quedaría el diseño con la introducción de un switch. Este switch es introducido a la red sin ninguna modificación realizada al mismo, donde la prioridad del switch es de cero como se observa en la figura 8. Este switch tendrá efecto directo en la topología lógica de la red.

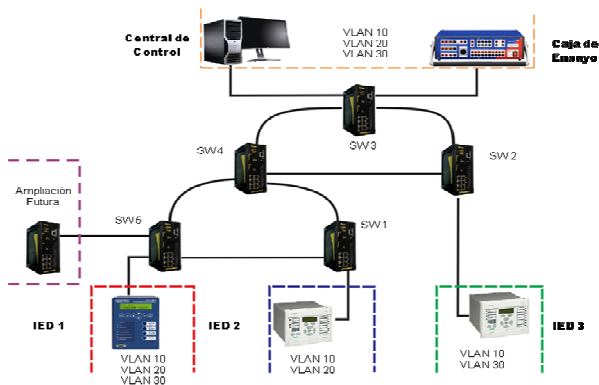


Figura 6: Modificación de la arquitectura de la red

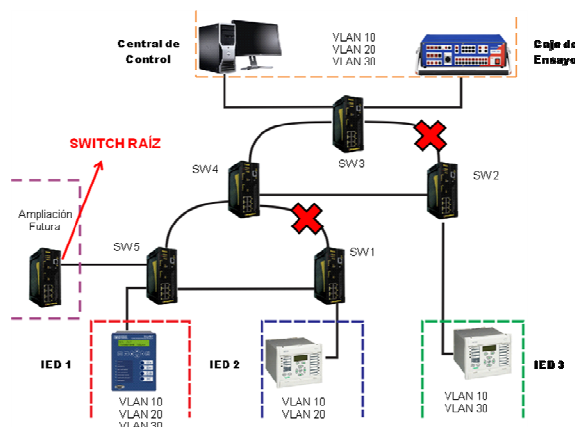
```

Bridge Status                               Root Bridge
Bridge ID                                   0/00-0A-DC-0A-DB-40
Root ID                                    0/00-0A-DC-0A-DB-40
Root Port
Root Path Cost                             0
Configured Hello Time                     2
Learned Hello Time                        0
Configured Forward Delay                  15
Learned Forward Delay                     0
Configured Max Age                        20
Learned Max Age                           0
Total Topology Changes                    10
Time since Last TC                        0 days, 00:00:10
    
```

Figura 7: Estadística RSTP del switch nuevo introducido a la red

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**19, 20 y 21 de Setiembre de 2012**

Como se había mencionado anteriormente la selección del switch raíz depende directamente del valor de la prioridad. Como el switch introducido es el de menor prioridad en toda la red pasa a ser el switch raíz modificando el diseño de la red como se muestra en la figura 9.



**Figura 8: Topología aplicando el protocolo RSTP cuando se introduce un switch con la prioridad más baja en la red**

Antes de la introducción de un switch nuevo a la red la cantidad de saltos que debía de realizar IED 3 para enviar un dato a la central era de un salto. Con la modificación de la red lógica la latencia aumento por que debe de realizar dos saltos. Pero coincidentemente disminuyo la latencia cuando se envía un mensaje GOOSE desde el IED 3 al IED 1 y se mantuvo la misma latencia entre el IED 3 y el IED 2. En la figura 10 y en la figura 11 se observa el estado del RSTP en el switch 3 y en el switch 4 respectivamente. El Bridge Status del switch 3 paso de switch raíz a bridge y el puerto raíz es el 1. El costo del puerto es de valor 57 por que debe realizar tres saltos para llegar al switch raíz.

```
Bridge Status          Designated Bridge
Bridge ID              28672/00-0A-DC-04-2B-00
Root ID                0/00-0A-DC-0A-DB-40
Root Port              1
Root Path Cost         57
Configured Hello Time  2
Learned Hello Time     2
Configured Forward Delay 15
Learned Forward Delay  15
Configured Max Age    20
Learned Max Age       20
Total Topology Changes 27
Time since Last TC    0 days, 00:06:05
```

**Figura 9: Estadística RSTP del switch 3 después de modificarse la arquitectura de red**

Sin embargo el switch 4 no cambio su estado, pero el puerto raíz pasó a ser el puerto numero 3 y el costo pasó a tener un valor igual a 38.

```
Bridge Status          Designated Bridge
Bridge ID              32768/00-0A-DC-22-75-E0
Root ID                0/00-0A-DC-0A-DB-40
Root Port              3
Root Path Cost         38
Configured Hello Time  2
Learned Hello Time     2
Configured Forward Delay 15
Learned Forward Delay  15
Configured Max Age    20
Learned Max Age       20
Total Topology Changes 28
Time since Last TC    0 days, 00:08:23
```

**Figura 10 Estadística RSTP del switch 4 después de modificarse la arquitectura de red**



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---

## 5. CONCLUSIÓN

Al diseñar la red IEC 61850 se debe de tener en cuenta la disposición física de los dispositivos que van a comunicarse entre sí. Para ello se debe de conocer bien que dispositivos se van a comunicar, el tipo de mensaje y los requerimientos de tiempo de estos mensajes donde la Norma IEC 61850 define que el envío de mensajes trip en la red a través de mensajes GOOSE es de 3ms.

Cuando se le aplica redundancia física a la red utilizando switches se logra una seguridad en cuanto a conectividad pero se puede generar a la vez una saturación de la red debido a la gran cantidad de enlaces por donde va circular el mensaje hasta llegar a destino. Este aumento de flujo de mensaje produce *loops* que pueden en un caso extremo producir la pérdida de enlaces de ahí la gran importancia de un buen diseño de la topología lógica y de los protocolos de redundancia a utilizar en donde se debe de tener bien claro los parámetros que afectan al mismo.

Definiendo estos parámetros es posible prever el comportamiento de la red ante cambios que puedan ocurrir en la topología. Se recomienda que los dispositivos que comunican mensajes críticos tengan un costo menor en el enlace entre ellos. También en caso de ampliación o modificación de la arquitectura de la red se debe de tener muy en cuenta la configuración del dato BPDU que enviara ese switch al ser introducido en la red de manera a evitar mudanzas repentinas y no planificadas en la arquitectura de la red.

El RSTP es el protocolo de redundancia recomendado debido a rápida convergencia. En la actualidad los fabricantes están desarrollando soluciones propietarias específicamente para redes IEC 61850 como el eRSTP de la Ruggedcom donde los tiempos de convergencia están a nivel de microsegundos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

[1] Michel Galea, "Rapid Spanning Tree in Industrial Networks". Ruggedcom Inc. Ontario. Canada.

[2] Clemens Hoga, "Network redundancy in substation applications". Siemens AG. Germany.

[3] IEC 61850 Standard Series, "Communication Network and Systems in Substations. Part 5: Communication requirements for functions and device models". 2002.