

Aproximación a la Topología de la Red de Telecomunicaciones Terrestres de la I3D del Ministerio de Defensa

Autor: Bargueño Díaz-Villarejo, Félix

Director/es: Fernández Gavilanes, Milagros.

Contacto: fbardia@et.mde.es

Resumen: Con este trabajo se pretende realizar una primera aproximación a la Topología de la Red de Telecomunicaciones Terrestres de la Infraestructura Integral de Información para la Defensa (I3D), partiendo de la infraestructura existente en la actualidad. Los datos con los que se ha realizado este trabajo no son los reales, por razones de seguridad, dado que no se pretende definir exactamente la red, sino la posibilidad de utilización del algoritmo propuesto y sus bondades.

Los requisitos que se le van a pedir a la red, se centran en los siguientes parámetros:

- Capacidad de salida desde cada nodo.
- Redundancia de enlaces.
- Preferencia estricta de unos tipos de enlaces sobre otros.

El problema consiste en definir los enlaces necesarios entre nodos y las capacidades de los mismos que satisfagan los requisitos.

Estudiados diversos enfoques desde la teoría de grafos, dadas las preferencias estrictas de unos enlaces sobre otros, se opta por aplicar el algoritmo de Prim adaptado al problema, calculando posteriormente las capacidades necesarias de cada enlace para esa solución.

Para asegurar la supervivencia de los servicios en caso de caída de un enlace, se simula la caída uno a uno, volviendo a aplicar el algoritmo completo para hallar una nueva solución.

Finalmente se ha comprobado que el algoritmo propuesto es válido para ser utilizado con datos reales, identificando posibles cuellos de botella en la red, definiendo los enlaces necesarios y las capacidades de los mismos, para poder cumplir los requisitos.

Palabras clave:

Topología de la Red de Telecomunicaciones Terrestres de la I3D, requisitos, preferencia estricta, teoría de grafos, algoritmo de Prim.

1. Introducción

1.1. Situación

La situación de partida en las que coexisten diversidad de redes de telecomunicaciones, tal y como se observa en la Figura 1, como pueden ser la WAN de Propósito General, donde discurren los servicios administrativos, con una red para voz y otra para datos; y las diferentes redes de Mando y Control, conlleva la existencia de limitaciones en el acceso a la información, redundancias y dificultades para su gestión y planeamiento. Por lo tanto, se hace necesario la convergencia de las redes hacia una infraestructura única que integre a las mismas.

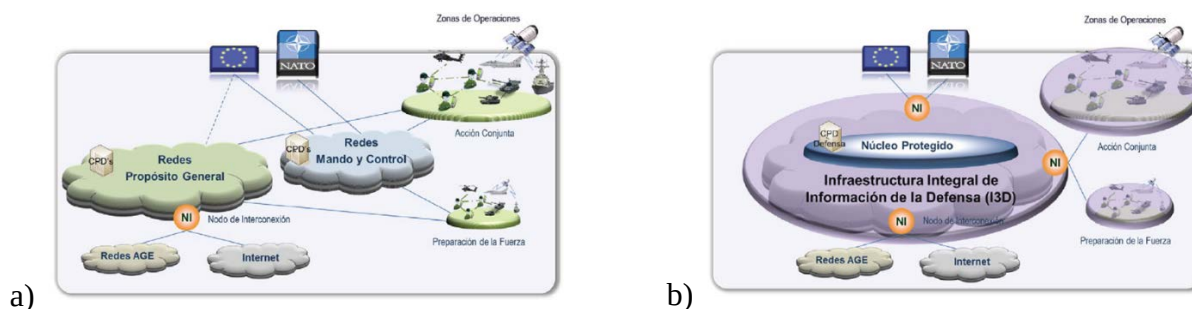


Figura 1. Situación de partida y final de la I3D tomadas de [1].

A consecuencia de lo marcado en el Plan de Transformación Digital de la Administración General del Estado (AGE) y sus Organismos Públicos [2], en 2020, las comunicaciones de los emplazamientos cuyos sistemas no afecten a la defensa o manejen información clasificada deberían ser suministradas por la AGE a través de la red SARA (Sistemas de Aplicaciones y Redes para las Administraciones). El resto de emplazamientos formarán parte del núcleo protegido de la I3D.

En la actualidad se está empezando a estudiar la unificación de la Red de Telecomunicaciones Terrestres del Ministerio de Defensa para, partiendo de la infraestructura existente, definir una red de telecomunicaciones única, como se muestra en la situación final de la Figura 1.

1.2. Objetivo

El objetivo es utilizar la teoría de grafos para diseñar un algoritmo que se pueda implementar para definir la topología de Red de Telecomunicaciones Terrestres para dar servicio a la WAN de la I3D, aprovechando la infraestructura existente.

2. Problema y solución

El primer problema encontrado es las diferencias entre las denominaciones e identificaciones de los nodos en las diferentes fuentes de información utilizadas, por lo que el trabajo de depuración de los datos ha sido arduo. Tras un primer intento de automatización, en la mayoría de los casos se ha debido realizar manualmente y en ocasiones incluso contrastar los datos con fuentes diferentes a los ficheros suministrados.

Finalmente, al tratar los datos, se observó la existencia de una zona con una alta densidad de enlaces formada por anillos de fibra óptica (FO). En esta zona se encuentran incluidos los Centros de Procesos de Datos (CPDs), existiendo al menos dos tendidos de 64 fibras que une cada emplazamiento con otros, lo que supera ampliamente las capacidades requeridas. Todos los nodos de esta zona son considerados para el presente trabajo como un nodo “sumidero”, pues es capaz de absorber y reencaminar todo el tráfico entrante y se considera como origen o destino de todas las comunicaciones.

2.1 Requisitos necesarios

Aunque todavía se están fijando los requisitos por parte de las entidades involucradas, inicialmente se van a considerar dos tipos: capacidad o velocidad de transferencia de datos de salida necesaria en cada nodo o emplazamiento; y número de enlaces para asegurar la continuidad del servicio.

Respecto a la capacidad, el ancho de banda necesario para cada tipo de nodo para este trabajo es el que figura en la Tabla 1 siguiente, correspondiéndose el tipo 5 o de tránsito, a un nodo que no necesite de capacidad adicional de la red de telecomunicaciones.

Tipo	Capacidad
1	10 Gbps
2	1 Gbps
3	400 Mbps
4	100 Mbps
5	Tránsito

Tabla 1. Tipo de nodo y capacidad requerida.

Se parte de la hipótesis de que el número de enlaces necesario por nodo del núcleo protegido será de 2, de forma que en todo momento estará asegurado el servicio en caso de caída de un enlace.

Por otra parte, los enlaces de la Red de Telecomunicaciones Terrestre de la I3D se pueden clasificar en tres tipos:

- Fibra óptica en propiedad.
- Fibra óptica de terceros.
- Radioenlaces.

Esta clasificación es importante, porque a la hora de diseñar la red de telecomunicaciones terrestre va a existir una preferencia estricta entre los tipos de enlace, precisamente en el orden señalado anteriormente. Las razones para estas preferencias se centran en la mayor capacidad, fiabilidad y seguridad de la FO y el menor mantenimiento, pues los radioenlaces están generalmente ubicados en zonas altas de difícil acceso, donde es necesario mantener una infraestructura aislada que incluye los tendidos eléctricos, caminos, desbroce de maleza y seguridad perimetral, y ya sólo los gastos de desplazamiento, en caso de ser necesaria una actuación, se ven incrementados.

Aunque no se han marcado requisitos de latencia, cumpliendo con las preferencias anteriores, se intentará que el enlace tenga el menor número de saltos posible, lo que facilitará que se produzcan las menores latencias y pérdidas posibles.

2.2 Definición del problema

El problema consiste en definir los enlaces necesarios entre nodos y las capacidades de los mismos que satisfagan los requisitos.

Como se tiene que partir de la infraestructura existente, se podrían utilizar dos enfoques: considerar la red existente con todas sus características, entre ellas la capacidad de los enlaces o considerar sólo los enlaces, sin la capacidad.

Considerando la red de telecomunicaciones terrestres existente con sus capacidades, se debería de tratar como un problema de flujo máximo. Este problema se podría resolver con el algoritmo de Ford-Fulkerson [3]. Sin embargo, este enfoque no se va a considerar y desarrollar por varios motivos entre los que destacan que los radioenlaces de los que se parte, son bastantes antiguos y los anchos de banda son a todas luces insuficientes para los requerimientos de los nuevos sistemas; y que considerando la capacidad se podrían llegar a utilizar varios enlaces entre dos nodos sumando las capacidades de los mismos, pero se intenta disminuir el número de enlaces necesarios, con la economía de medios que conlleva.

Al suponer la red de telecomunicaciones terrestres sin capacidades, solamente se considera el “esqueleto” de la infraestructura existente, es decir, la existencia o no de enlace entre dos emplazamientos o nodos. Además, se tiene en cuenta el tipo de enlace por los requisitos exigidos de preferencias de unos tipos de enlace sobre otros. Con este planteamiento, aunque seguramente sea necesario aumentar la capacidad de los enlaces utilizados, se reduce el número de enlaces necesarios, con el consiguiente ahorro en mantenimiento de infraestructuras no necesarias. Esta visión parece más adecuada estratégicamente, por lo que es la que se ha desarrollado.

Los problemas a los cuales será necesario dar solución serán, en primer lugar, determinar qué enlaces se van a utilizar y después calcular la capacidad requerida por cada uno de ellos.

2.3 Solución

2.3.1 Aproximación inicial

Planteada la problemática, y dado que inicialmente el número de nodos y aristas del grafo es de 280 y 361 respectivamente, y que la potencia de los ordenadores actuales es alta, tanto en procesamiento como en memoria, el problema de determinar el esqueleto inicial de la red se podría resolver utilizando casi cualquier algoritmo. Se comentan a continuación las principales alternativas.

Al considerar la red sin capacidades, esta se puede representar por un grafo en el que los emplazamientos son los nodos y los enlaces son las aristas. El problema resultante se puede afrontar desde dos perspectivas en teoría de grafos: problema del camino más corto o árbol de expansión mínima. En ambos es necesario determinar una métrica. La solución más sencilla es atribuir a todos los enlaces un coste o distancia unidad. Sin embargo, adoptando esta solución no se cumpliría el criterio de preferencia de enlaces. Por tanto, para cumplir con el criterio de las preferencias bastaría con hacer que el coste de un tipo de enlaces sobre otro difiera en un orden de magnitud del total de enlaces existentes. Como el total de enlaces del problema es de $361 < 10^3$, basta con multiplicar cada coste sobre el anterior en 10^3 . La solución más sencilla, partiendo del valor unidad para la FOP es asignar los siguientes costes en función del tipo de enlace, tal y como se observa en la Tabla 2:

Tipo enlace	Coste
FO en propiedad	1
FO de terceros	1.000
Radioenlace	1.000.000

Tabla 2. Costes por tipo de enlace.

El problema del camino más corto está ampliamente estudiado en teoría de grafos y bastaría con aplicar el algoritmo de Dijkstra [4] o el de Bellman-Ford [5]. Inicialmente no se tiene previsto asignar

costes negativos por lo que directamente se desecha el algoritmo de Bellman-Ford y se utilizaría el de Dijkstra.

Para calcular el árbol de expansión mínima existen dos algoritmos, el de Prim [6] y el de Kruskal [7]. La complejidad temporal de los algoritmos es diferente pero dadas las dimensiones del problema y la potencia de los ordenadores actuales este aspecto no va a resultar decisivo a la hora de elegir uno u otro. Dadas las peculiaridades del problema, al final se opta por utilizar el algoritmo de Prim pero con modificaciones o mejoras.

Hasta ahora se han planteado dos posibles soluciones para solucionar el problema inicial: el cálculo del camino más corto con el algoritmo de Dijkstra, o el árbol de expansión mínimo con el algoritmo de Prim. Como no es necesario ir almacenando distancias desde el nodo sumidero (necesario en el algoritmo de Dijkstra), y al existir una preferencia estricta de unos enlaces se opta por el algoritmo de Prim de más fácil implementación.

A grandes rasgos, la mejora introducida en el algoritmo de Prim mejorado es de rapidez, particularmente interesante en el problema a resolver donde existe una gran cantidad de enlaces con costes iguales y donde la diversidad de los mismos es mínima, lo que hace que las necesidades de máquina en la implementación del algoritmo sean mínimas. También se ha considerado un procedimiento de interrupción en caso de que el grafo no sea conexo. Este caso puede presentarse si en el ciclo se utilizan otro tipo de enlaces distintos a los considerados, como puede ser el caso de enlaces satélite

En una iteración, en el caso de poder enlazar un vértice o nodo por dos lados con la misma distancia, aunque no se han considerado latencias, se cogerá como antecesor el vértice que presente menos lados o saltos para llegar al nodo origen o sumidero. En este punto el algoritmo para y presenta los datos de los nodos que no es posible enlazar con este nodo sumidero para su estudio posterior.

2.3.2 Cálculo de las capacidades de los enlaces

Hasta ahora sólo se sabe qué enlaces son necesarios para conseguir enlazar todos los nodos, pero no se han detallado las capacidades de los mismos.

La solución del cálculo de capacidades es simple. Basta con ir recorriendo los “caminos” desde los extremos más alejados del sumidero u hojas del árbol e ir añadiendo las capacidades que demanda cada nodo existente en ese recorrido.

Ahora bien, existen nodos que son solamente de tránsito y no demandan capacidad. Puesto que los algoritmos empleados conectan todos los nodos del grafo, en este apartado habrá que fijarse si hay enlaces que, tras el cálculo anterior, su capacidad resultante sea nula. Estos enlaces con capacidad nula tendrán que ser eliminados de la solución pues realmente no son necesarios.

Otra forma de realizar lo anterior es comprobando que los extremos del árbol u hojas no son nodos de tránsito. Estas hojas y los enlaces que las sustentan se podrían ir podando u eliminando en dirección a la raíz o sumidero hasta encontrar un nodo que no sea de tránsito. Para llevar a cabo este procedimiento no sería necesario calcular las capacidades y se podría realizar al finalizar el cálculo del procedimiento anterior. Sería suficiente con ir etiquetando los nodos que son extremos del árbol o camino.

2.3.3 Redundancia de enlaces

Realmente con la solución inicial existirán muchos nodos con al menos dos enlaces. Bastará con que el nodo no sea un extremo para que al menos esté enlazado con su nodo antecesor y con los nodos de los que él es antecesor.

Sin embargo, resulta necesario disponer de redundancia en los enlaces para permitir la recuperación de la red. Lo primero que se nos podría ocurrir es unir nodos extremo entre sí para asegurar la existencia de ciclos en el grafo. Esta solución no es factible por dos motivos. El primero es que no existe infraestructura. El segundo es que, aunque exista la conexión entre esos extremos, al enlazarlos se crea un ciclo que es válido ante la caída de un enlace, pues seguirá existiendo un camino entre el resto de nodos del ciclo. Pero el problema es que sólo nos servirá si el ciclo formado contiene al nodo sumidero, porque en caso contrario, siempre existirá un enlace que, de fallar, incomunicaría el ciclo formado con el nodo sumidero, y se dejaría de dar servicio, tal y como se ilustra en la Figura 3.

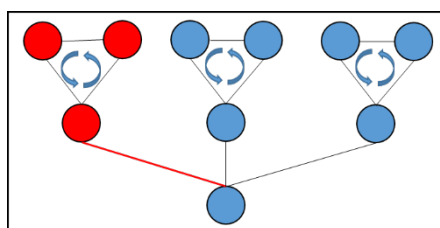


Figura 2. Ciclo sin enlace ante la caída de un enlace (en rojo).

Además, la solución ideal sería crear un anillo con todos los nodos extremos. De esta manera se aseguraría el enlace con el nodo sumidero, a pesar de que pudieran caer varios enlaces. Esta opción es inviable por la no existencia de infraestructura, pero también considerando el despliegue en todo el territorio nacional, ello supondría crear un anillo que prácticamente rodearía la península.

Realmente, con el requisito de que el número de enlaces por nodo del núcleo protegido tiene que ser de dos, lo que se pretende es asegurar que se continúa dando servicio, aunque se caiga un enlace, por lo que una reformulación del requisito en ese sentido se hace necesario, evitando de esta manera los problemas mostrados en la Figura 3, que aunque cumple con el requisito de que el número de enlaces de cada nodo sea de dos, no da servicio a los nodos marcados en rojo.

Por otra parte, al eliminar una arista, el resultado es la obtención de dos grafos conexos, por lo que parece lógico pensar que bastaría con utilizar cualquier arista existente para unir esos dos grafos y generar un único grafo conexo. Sin embargo, esta solución no valdría pues afectaría a los caminos y las capacidades necesarias, tal y como se ve en la Figura 4.

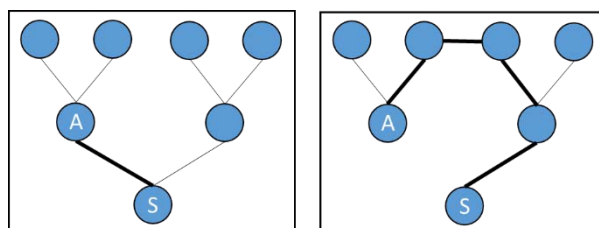


Figura 3. Diferencia de caminos entre S y A al quitar un enlace SA.

La solución al problema será ir eliminando los enlaces de la solución original uno a uno, quitar la etiqueta de los nodos afectados o no enlazados por la eliminación de ese enlace y aplicar de nuevo los pasos anteriores.

Para el cálculo de las capacidades se compararán las inicialmente obtenidas con las nuevas quedando como resultado final la mayor de las dos. De esta forma, se asegura que siempre habrá enlace de todos los nodos con el nodo central, aunque caiga un enlace.

3. Resultados

Todas las soluciones se han implementado usando una solución sencilla realizando los algoritmos en VBA.

Cuando se ejecuta por primera vez el algoritmo de Prim se consigue detectar aquellos nodos que no es posible enlazar. Esto indica que no existe ningún camino o enlace terrestre que llegue desde esos nodos al sumidero. La interpretación que se le daría a estos resultados, partiendo del supuesto de que actualmente todos los nodos tienen conexión hacia los CPDs, que se encuentran en el sumidero, es que en el presente trabajo solo se han considerado los enlaces terrestres. Sin embargo, además de los enlaces terrestres también se utilizan enlaces satélite, por lo que es de sospechar que estos grupos de nodos dispongan al menos de un enlace satélite que los conecte con el resto de la red.

Tras la realización del diseño inicial de la red sin redundancia de enlaces, se trata de simular aquellos nodos que se quedarían sin conexión ante la caída de los enlaces utilizados en el diseño inicial de la red. En ningún caso se consideran ya los nodos “no conectados” tratados en el apartado anterior. Los resultados que se ofrecen en este apartado son útiles para identificar cuellos de botella en la red, identificando nodos o grupos de nodos que en el camino hacia el nodo sumidero solo dispongan de una alternativa de enlace para unirse al resto de la red.

La solución a este problema se puede afrontar secuencialmente de la siguiente forma. Una vez identificados los nodos, comprobar que no existe algún enlace satélite que los comuniquen con el resto de la red. En caso negativo, si se pretendiera intentar automatizar y que se ofrecieran propuestas de nuevos enlaces, se podría realizar introduciendo los datos de las coordenadas de los emplazamientos y buscando los emplazamientos más cercanos. La limitación del número de emplazamientos propuesto se puede realizar por número de emplazamientos o por distancia. Finalmente se debería valorar la viabilidad de las propuestas realizadas, la posibilidad de doblar el enlace que se ha caído con otra tecnología distinta (por ejemplo, si el enlace caído es de FO, montar un radioenlace) o asumir el riesgo de que ese emplazamiento sólo disponga de un enlace.

Una vez analizados los nodos no conectados y aquellos sin conexión ante una caída, se va a ver los enlaces junto con las capacidades necesarias para enlazar los nodos, tanto en la primera ejecución del algoritmo (sin redundancia de enlaces), como la capacidad final necesaria de estos tras la simulación de la caída de enlaces, que se correspondería a la solución final para cumplir los requisitos establecidos (a excepción de los casos considerados en los puntos anteriores).

Lo más significativo es que de los enlaces considerados, más de la mitad en la solución final tienen una capacidad igual a cero, o lo que es lo mismo, enlaces que no proporcionan servicio a ningún nodo de los que demandan capacidad, y por tanto no son necesarios, siendo la mayoría radioenlaces. Todos estos enlaces se podrían desmontar con el consiguiente ahorro económico en mantenimiento o alquiler.

El motivo de esta cantidad de enlaces innecesario puede ser debido a que muchos de los nodos existentes en la actualidad no van a formar parte del núcleo protegido de la I3D y las comunicaciones de estos nodos van a ser suministrados por la red SARA, correspondiéndose a establecimientos que no disponen de sistemas que afecten a la defensa o manejen información clasificada.

4. Conclusiones

Se puede concluir que el algoritmo propuesto sí que es válido para ser utilizado y proporcionar una primera aproximación a la topología de red de telecomunicaciones terrestre de la I3D, identificando posibles cuellos de botella en la red y definiendo los enlaces necesarios y las capacidades de los mismos, hasta donde permite la red considerada. Esta primera aproximación se debe complementar con el estudio de los casos en los que no se pueden cumplir los requisitos.

También se podría utilizar como un algoritmo de enrutamiento centralizado estático creando las tablas de enrutamiento basadas en los nodos predecesores, calculados y almacenados al ejecutar el algoritmo. La tabla inicial sería inmediata en la primera iteración o inicial del algoritmo. En las sucesivas iteraciones realizadas simulando la caída de los enlaces, se podrían también almacenar en una tabla los resultados asociados a ese enlace, de manera que cuando el sistema de supervisión de la red detecte la caída de un enlace, o bien se envíen automáticamente los nuevos enrutamientos almacenados en las tablas, o incluso tenerlas ya almacenadas en los distintos nodos de la red y lo único que se deba transmitir es el identificador del enlace caído, para que cada nodo afectado aplique la nueva tabla de enrutamiento asociada, pasando a ser un enrutamiento distribuido.

Se podría ampliar introduciendo también los enlaces satélite, con lo que se toda la red de telecomunicaciones de la I3D. Dadas las especiales características de estos, sólo se utilizarían como última posibilidad. Esto se traduciría para el algoritmo en atribuir a estos enlaces un coste superior que esté un orden de magnitud respecto al número total de enlaces por encima de los tipos de enlaces más costosos hasta ese momento. En nuestro caso sería de 10^9 .

Finalmente, si se decide tener una mayor seguridad en la red basada en una mayor redundancia, se podrían hacer nuevas iteraciones simulando la caída de dos o más enlaces simultáneamente y calculando los enlaces y las capacidades necesarias. Aunque la caída de más de dos enlaces debería considerarse como excepcional, y llegado el caso incluso se podría suplir con la utilización, aunque limitada en capacidad, de medios desplegados.

Referencias

1. Instrucción 58/2016, de 28 de octubre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se aprueba la Arquitectura Global de Sistemas y Tecnologías de Información y Comunicaciones del Ministerio de Defensa, BOD, 2016, pp. 26181-26351.
2. «Portal de administración electrónica,» [En línea]. https://www.administracionelectronica.gob.es/pae_Home/dam/jcr:898162f1-2682-483e-9e43-50f2d3a08eff/20151002-Plan-transformacion-digital-age-oopp.pdf. [Último acceso: 11 10 2020].
3. L. R. Ford y D. R. Fulkerson, «Flows in Networks» Princeton University Press, 1962.
4. E. Dijkstra, «A note on two problems in connection with graphs» Number. Math. 1, p. 269–271, 12 10 1959.
5. C. E. L. R. L. R. a. C. S. Thomas H. Cormen, Introduction to Algorithms, Second Edition, Vols. 1 de 2, Section 24.1: The Bellman-Ford algorithm, MIT Press and McGraw-Hill, 2001, p. 588–592.
6. R. C. Prim, «Shortest connection networks and some generalisations» Bell System Technical Journal, nº 36, p. 1389–1401, 1957.
7. J. B. Kruskal, «On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem» Proc. Amer. Math. Soc., nº 7, pp. 48-50, 1956.