

# DISEÑO DE UNA RED URBANA HFC PARA LA DISTRIBUCIÓN DE SERVICIOS AVANZADOS DE TELECOMUNICACIÓN

Pablo Cortés<sup>1</sup>, Juan Larrañeta, Luis Onieva  
Dpto. Ingeniería de Organización, Universidad de Sevilla, <sup>1</sup>pca@esi.us.es

## Resumen

*Este trabajo presenta el diseño de la infraestructura básica correspondiente a una arquitectura de red híbrida fibra óptica-cable coaxial (HFC) para la distribución de contenidos telemáticos integrados por cable en pequeños núcleos urbanos. En este contexto el problema de Steiner modela adecuadamente la situación. Finalmente se presenta una batería de heurísticas que permite afrontar con éxito este tipo de diseños.*

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Se propone una *arquitectura de red híbrida fibra óptica-cable coaxial (HFC)*, para la distribución de contenidos telemáticos integrados por cable. Para el dimensionamiento se utilizará fibra monomodo y cable coaxial CENELEC, siguiendo las recomendaciones en [1]. Este tipo de arquitecturas permiten integrar una gran variedad de servicios, demandando cada uno de los cuales diferentes requisitos de calidad y capacidad a la red. La figura 1 refleja las necesidades de capacidad e interactividad requerida para diferentes servicios soportados por redes HFC.

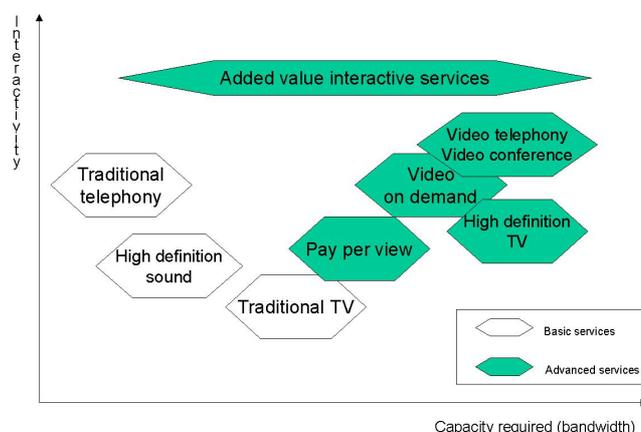


Figura 1: Servicios de telecomunicación integrados

En la actualidad las arquitecturas basadas en fibra óptica exclusivamente, como FTTH (fibra hasta el abonado) o incluso su versión más reducida FTTC (fibra hasta la acera), tienen costes demasiado elevados que harían inviable la inversión. La posibilidad que proporciona la fibra óptica, de alcanzar mayores distancias sin tener que regenerar la señal, a la vez que su capacidad para transportar grandes volúmenes a altas velocidades, la hacen especialmente adecuada para los enlaces de la red dorsal así como para los troncales y de distribución dentro de la red metropolitana, donde sustituye con ventaja al cable coaxial. Este último quedaría indicado para la red de acceso, que representa el salto final hasta el abonado. La figura 2 presenta un esquema genérico de esta arquitectura.

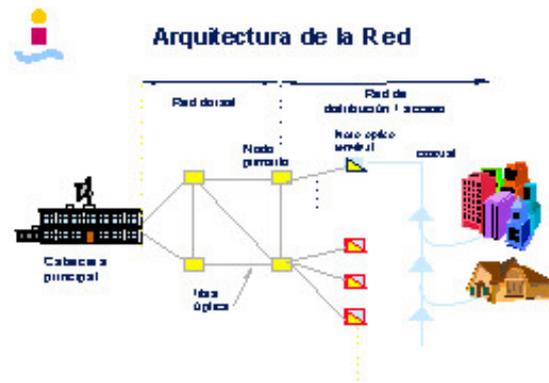


Figura 2: Arquitectura de red

En la arquitectura que se presenta, la red dorsal se conecta al municipio a través de la cabecera, donde además se puede realizar la recepción e inserción en la red local de contenidos telemáticos de tipo analógico o digital. Así, desde la cabecera se accedería a una red troncal basada en fibra óptica con topología parcialmente mallada. La red dorsal interconectaría todas las cabeceras de la demarcación, terminando en nodos ópticos primarios. La red de distribución, de topología en estrella, se adentraría hasta llegar a los nodos ópticos terminales, que constituirían la última etapa óptica. Previamente a los nodos ópticos terminales pueden situarse nodos secundarios, los cuales son nodos pasivos cuya función principal es la de dividir la señal óptica descendente que llega por la fibra y repartirla en varias fibras. Por último, la etapa de acceso haría uso de cable coaxial. La conexión final con el abonado se efectuaría mediante otro coaxial de corta longitud e inferior calidad.

Se pretende el diseño de la red en el núcleo urbano, quedando, de esta forma, el diseño de la red dorsal fuera de las intenciones del proyecto.

Una red urbana, de modo genérico, a diseñar mediante arquitectura HFC puede constar de los siguientes elementos:

- *Cabecera principal*: recoge la señal correspondiente a la TV analógica, la TV Digital-Satélite y la TV Digital-Terrestre, también realiza la conexión con la red telefónica (RTC) y la conexión con la red de datos (Internet). La cabecera da cobertura a, aproximadamente, 100.000 abonados.
- *Nodos ópticos primarios (NP)*: en esta zona de la red el estándar de transmisión dispuesto es todavía SDH (Jerarquía Digital Síncrona). Mezclan datos y telefonía enviando la señal hasta los nodos ópticos terminales. Los NP dan cobertura a, aproximadamente, 50.000 abonados, pudiendo llegar incluso a 70.000.
- *Nodos secundarios (NS)*: actúan como difusores ópticos, *splitters*, y se comportan como nodos pasivos a efectos del flujos de información. Es habitual ubicar 6 NS por cada NP. Cada NS cubre a, aproximadamente, 2.000 a 10.000 abonados.
- *Nodos ópticos terminales (NOT)*: son los nodos en los cuales termina la red de fibra. Los NOT cubren manzanas de edificios, los cuales se conectan a la red de fibra mediante cable coaxial. Cada NOT da cobertura a, aproximadamente, 500 abonados.

La red HFC, tal y como muestra la figura 2, se puede descomponer en una red troncal, más una red de distribución y una red final de acceso al abonado. La relación jerárquica entre los nodos y enlaces viene determinada en la figura 3:

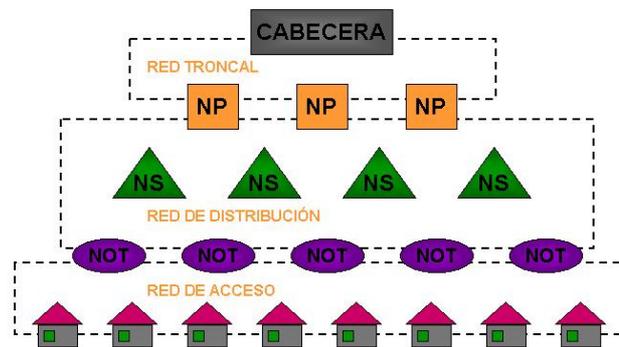


Figura 3: Jerarquía de nodos y enlaces

### Red Troncal

La red troncal debe ser diseñada mediante el establecimiento de un anillo con redundancia, lo que da lugar a una estructura de carácter mallado. Debe estar construida totalmente en fibra óptica, tal y como recoge el RD 2066/96. La tecnología de transmisión dentro de la red troncal debe ser SDH.

### Red de distribución

La red de distribución conecta los NP con los NOT. También debe estar construida en fibra óptica en su totalidad. Las estructuras de diseño más habituales son el uso de anillos, o bien, la conexión en estrella. La primera permite un mayor grado de supervivencia, mientras la segunda resulta más económica aunque pierde niveles de supervivencia.

### Red de acceso

La red de acceso consta del despliegue desde el NOT hasta el abonado final. Toda la red de acceso se construye mediante cable coaxial CENELEC RG6/RG11. Las estructuras de diseño para la red de acceso más habituales son la conexión en estrella, en bus o en árbol.

El cable coaxial llega hasta el abonado donde se sitúa el SET-TOP-BOX, lugar en que termina el coaxial y donde se conecta el correspondiente modem de cable, el cual actúa como un elemento de la capa MAC (control de acceso al medio). Es un modem asimétrico con mayor capacidad descendente (del orden de 2 a 36 Mbps) que ascendente (del orden de 200 Kbps).

Las siguientes figuras muestran las topologías más extendidas para el diseño de redes HFC. Así se presentan topologías estrella simple (en figura 4), estrella múltiple (en figura 5), anillo-estrella simple (en figura 6), anillo-estrella múltiple (en figura 7) y anillo-anillo (en figura 8).

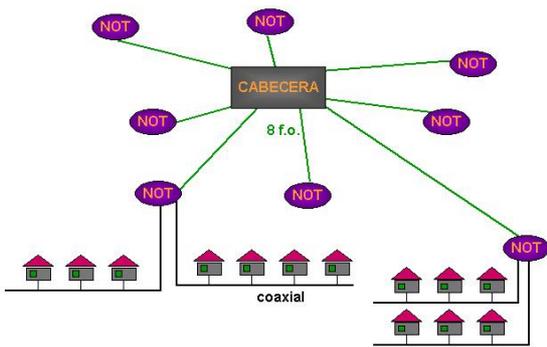


Figura 4: Conexión en estrella simple

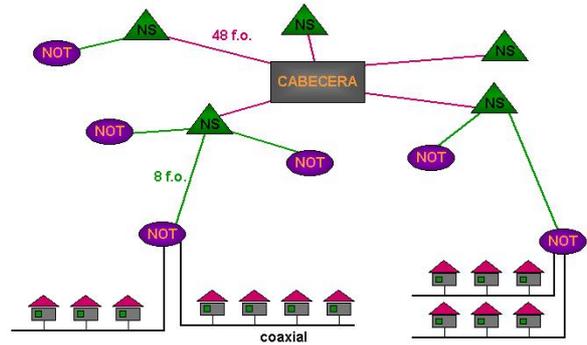


Figura 5: Conexión en estrella múltiple

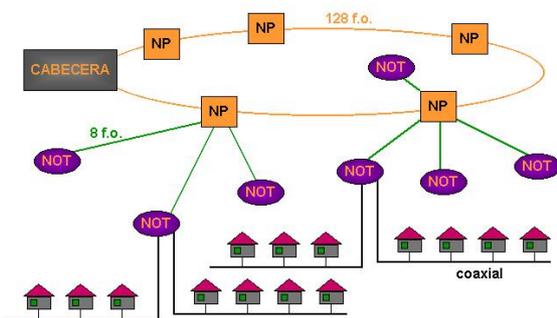


Figura 6: Conexión en anillo-estrella simple

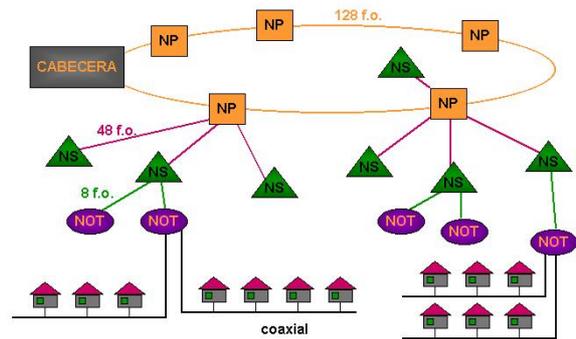


Figura 7: Conexión en anillo-estrella múltiple

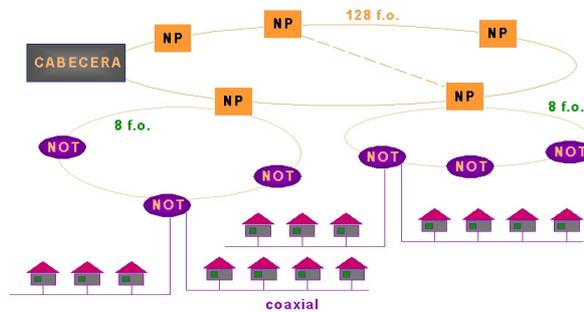


Figura 8: Conexión anillo-anillo

Las topologías de estrella simple (fig. 4) y estrella múltiple (fig. 5) no resultan adecuadas para casos de grandes núcleos urbanos debido a la falta de supervivencia en la red troncal, al no desplegarse un anillo de redundancia. Cuando el núcleo urbano es de gran tamaño se hace necesario recurrir al anillo-anillo (fig. 8), quedando indicadas para núcleos de tamaño moderado las topologías del tipo anillo-estrella (figs. 6 y 7). Sin embargo para pequeños núcleos urbanos, o bien, para urbanizaciones y zonas residenciales anexas a importantes núcleos poblacionales, las topologías basadas en estrellas simples y múltiples se convierten en especialmente adecuadas debido al escaso despliegue de red que se precisa, el cual redundaría en una menor inversión inicial que pueda hacer más rentable la explotación. La

siguiente tabla 1 recoge las topologías más indicadas dependiendo del tamaño del núcleo poblacional.

Muy grandes núcleos urbanos	Grandes núcleos urbanos	Núcleos urbanos medios	Pequeños núcleos urbanos
Anillo-anillo	Anillo-estrella múltiple Anillo-estrella simple	Anillo-estrella simple Estrella múltiple	Estrella múltiple Estrella simple

Tabla 1: Arquitectura de red dependiendo del tamaño del núcleo urbano

Aquí presentamos el diseño de una red HFC para pequeños núcleos urbanos. En este contexto hay que ser especialmente cuidadoso al atender a los niveles de inversión, puesto que podrían hacer inviable el acometido de la red y por tanto la distribución de servicios. En este ámbito se propone el empleo de topologías del tipo estrella simple y estrella múltiple a tal efecto.

## 2. MODELADO DEL PROBLEMA

El problema de extensión de una red en estrella en el nivel lógico, lo cual corresponde a una red en árbol en el nivel físico, equivale a resolver el problema de Steiner asociado [2]. En esta situación existe un conjunto de nodos (cabecera y NOT) que equivalen a los nodos terminales a la vez que los cruces del viario conforman los nodos Steiner, y las vías de comunicación urbanas (las calzadas) el conjunto de arcos potenciales del grafo. La figura 9 refleja la situación:

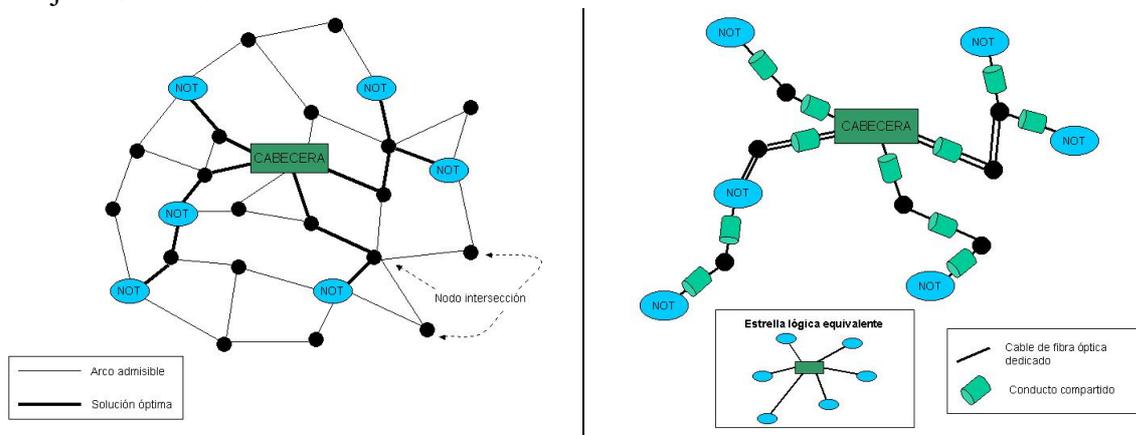


Figura 9: Redes lógica y física

De este modo el problema se puede formular como el de Steiner; siguiendo a Winter [3]:

- Dado: Un grafo dirigido  $G = (N, A)$  con  $|N|$  nodos y  $|A|$  arcos con coste  $c_{ij}$ , para todo  $(i, j) \in A$ , y un subconjunto  $I \subseteq N$  con  $|I|$  nodos denominados terminales (en nuestro caso cabecera y NOTs). El resto de nodos se denominan nodos Steiner.
- Encontrar: Una red  $G_I \subseteq G$  que conecte todos los terminales en  $I$  a mínimo coste. Esta red puede incluir algunos de los nodos Steiner pero no debe necesariamente que incorporarlos.

Con todo ello, una forma de modelar el problema de Steiner discutida en [4], se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 Z = \text{MIN} \quad & \sum_{(r,l) \in A^+} c_{rl} y_{rl} \\
 (1) \quad & \sum_{l \in P(k)} x_{kl} - \sum_{r \in A(k)} x_{rk} = \begin{cases} 1 & \forall k \in I \\ 0 & \forall k \in J \\ -|I| & K=e \end{cases} \\
 (2) \quad & |I| \cdot y_{kl} \geq x_{kl} + x_{lk} \quad \forall (k,l) \in A^+, k \neq s \\
 & x_{rl} \geq 0 \quad \forall (r,l) \in A \\
 & y_{rl} \in \{0,1\} \quad \forall (r,l) \in A^+
 \end{aligned}$$

En el modelo, las variables  $y_{kl}$  son binarias e indican si se acomete la obra en el tramo  $(k,l)$  mientras que las  $x_{kl}$  son variables auxiliares de flujo, que permiten la conectividad del árbol físico de la red, que equivale a una estructura lógica en estrella.

### 3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La tabla 2 presenta los resultados obtenidos mediante la implementación de las heurísticas suma de rutas mínimas (SRM), árbol (tree) y vecindades. La heurística SRM se encuentra ampliamente discutida en [4] y se obtiene por reducción de la forma obtenida de la relajación lineal del problema. La heurística del árbol se detalla en Magnanti *et al* [5] y dispone de un análisis del tipo *worst case*, el cual garantiza un error inferior al 100%. Esta considerada la mejor acotación del error para una formulación directa del problema de Steiner.

$$Z^* \leq z^H \leq \left(2 - \frac{2}{|I|}\right) \cdot Z^{LP}, \text{ donde } \begin{cases} Z^* & \text{es la solución óptima} \\ z^H & \text{es la solución de la heurística del árbol} \\ Z^{LP} & \text{es la solución de la relajación lineal} \end{cases}$$

En efecto, la relajación lineal,  $Z^{LP}$ , es siempre menor o igual que el óptimo del problema original,  $Z^*$ , esto es,  $Z^{LP} \leq Z^*$ .

Finalmente la heurística de vecindades construye subredes mediante vecindades de radio  $\alpha$  que contengan, al menos, un nodo terminal. Posteriormente se aplica la heurística de árbol internamente garantizándose la acotación del error dentro de cada subred. Finalmente, se lleva a cabo la conexión de las distintas vecindades mediante la conformación de un supra-árbol de Steiner que conecta todas las subredes.

El tamaño de la vecindad viene caracterizado por el parámetro  $\alpha$ , el cual se puede aproximar a una variable aleatoria del tipo  $N(\mu(c_{avg}), \sigma(c_{avg}))$ , donde el valor de medio de  $\alpha$  se encuentra muy centrado en torno al coste medio de los arcos del grafo.

Para la validación de los resultados se han utilizado los problemas que aparecen en las colecciones *steinb*, *steinc* y *steind* de la OR-Library (Imperial College, Londres) de libre acceso en la dirección electrónica <http://mscmga.ms.ic.ac.uk/info.html> [6] y se ha utilizado una máquina PC Pentium MMX 200MHz con 32 MB RAM.

ID	nodos	% terms	arcs	Optimum	SRM	% error	tree	% error	vecind	% error	time SRM	time tree	time vecind
Steinb1	13	61,5	19	82	82	0,0	82	0,0	82	0,0	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Steinb2	15	73,3	21	83	84	1,2	85	2,4	89	7,2	0:00:00	0:00:00	0:00:01
Steinb3	20	75,0	25	138	144	4,3	138	0,0	138	0,0	0:00:00	0:00:01	0:00:00
Steinb4	40	22,5	80	59	59	0,0	62	5,1	62	5,1	0:00:01	0:00:00	0:00:01
Steinb5	39	30,8	80	61	63	3,3	61	0,0	62	1,6	0:00:01	0:00:00	0:00:01
Steinb6	45	55,6	87	122	134	9,8	126	3,3	124	1,6	0:00:00	0:00:00	0:00:02
Steinb7	22	50,0	33	111	113	1,8	112	0,9	112	0,9	0:00:01	0:00:00	0:00:00
Steinb8	26	57,7	38	104	110	5,8	105	1,0	105	1,0	0:00:00	0:00:00	0:00:02
Steinb9	27	85,2	35	220	220	0,0	221	0,5	220	0,0	0:00:00	0:00:01	0:00:00
Steinb10	55	23,6	121	86	90	4,7	91	5,8	90	4,7	0:00:02	0:00:00	0:00:02
Steinb11	63	30,2	129	88	95	8,0	90	2,3	90	2,3	0:00:01	0:00:00	0:00:05
Steinb12	63	57,1	125	174	192	10,3	174	0,0	174	0,0	0:00:02	0:00:01	0:00:04
Steinb13	36	38,9	56	165	172	4,2	172	4,2	172	4,2	0:00:01	0:00:00	0:00:00
Steinb14	42	50,0	65	235	253	7,7	238	1,3	238	1,3	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Steinb15	47	80,9	67	318	335	5,3	321	0,9	321	0,9	0:00:01	0:00:01	0:00:03
Steinb16	77	22,1	166	127	139	9,4	137	7,9	137	7,9	0:00:03	0:00:01	0:00:08
Steinb17	74	31,1	153	131	138	5,3	133	1,5	133	1,5	0:00:03	0:00:01	0:00:04
Steinb18	82	54,9	165	218	247	13,3	222	1,8	222	1,8	0:00:04	0:00:02	0:00:08
Steinc1	143	3,5	260	85	86	1,2	85	0,0	85	0,0	0:00:10	0:00:00	0:01:37
Steinc2	128	7,8	234	144	160	11,1	144	0,0	150	4,2	0:00:08	0:00:01	0:01:01
Steinc3	178	42,1	295	754	846	12,2	774	2,7	775	2,8	0:00:18	0:00:07	0:00:35
Steinc4	193	52,8	314	1079	1200	11,2	1096	1,6	1086	0,6	0:00:20	0:00:12	0:00:35
Steinc5	223	80,7	341	1579	1707	8,1	1582	0,2	1581	0,1	0:00:32	0:00:32	0:00:56
Steinc6	366	1,4	837	55	56	1,8	60	9,1	55	0,0	0:01:08	0:00:03	0:16:36
Steinc7	383	2,6	866	102	103	1,0	114	11,8	103	1,0	0:02:00	0:00:05	0:18:06
Steinc8	387	20,4	867	509	597	17,3	532	4,5	529	3,9	0:01:59	0:00:29	0:08:41
Steinc9	418	29,7	903	707	865	22,3	728	3,0	724	2,4	0:02:45	0:00:53	0:06:24
Steinc10	427	56,7	891	1093	1323	21,0	1116	2,1	1114	1,9	0:03:00	0:02:05	0:07:36
Steinc11	499	1,0	2005	32	32	0,0	37	15,6	33	3,1	0:04:59	0:00:05	0:36:48
Steinc12	499	2,0	2065	46	46	0,0	48	4,3	46	0,0	0:05:01	0:00:09	0:38:09
Steinc13	498	16,7	2026	258	327	26,7	273	5,8	277	7,4	0:05:01	0:01:02	0:18:02
Steinc14	499	25,1	1968	323	416	28,8	342	5,9	339	5,0	0:04:55	0:01:32	0:14:25
Steinc15	500	50,0	1814	556	698	25,5	572	2,9	565	1,6	0:04:43	0:03:13	0:10:53
Steinc16	500	1,0	3517	11	12	9,1	13	18,2	12	9,1	0:05:31	0:00:05	0:15:24
Steinc17	500	2,0	3463	18	21	16,7	20	11,1	20	11,1	0:05:33	0:00:10	0:10:58
Steinc18	500	16,6	3495	113	146	29,2	126	11,5	126	11,5	0:05:35	0:01:02	0:03:50
Steinc19	500	25,0	3349	146	193	32,2	159	8,9	159	8,9	0:05:34	0:01:47	0:06:04
Steinc20	500	50,0	3099	267	343	28,5	268	0,4	269	0,7	0:05:33	0:03:32	0:08:53
Steind1	272	1,8	504	106	107	0,9	107	0,9	107	0,9	0:01:01	0:00:02	0:07:50
Steind2	283	3,5	519	220	228	3,6	235	6,8	228	3,6	0:01:07	0:00:03	0:8:06
Steind3	350	42,3	585	1565	1769	13,0	1612	3,0	1600	2,2	0:02:00	0:00:46	0:03:00
Steind4	359	57,7	590	1935	2173	12,3	1970	1,8	1969	1,8	0:02:11	0:01:17	0:04:41
Steind5	470	80,2	708	3250	3502	7,8	3269	0,6	3268	0,6	0:04:34	0:04:36	0:10:00
Steind6	759	0,7	1730	67	70	4,5	74	10,4	71	6,0	0:13:27	0:00:12	1:25:31
Steind7	749	1,3	1722	103	111	7,8	105	1,9	103	0,0	0:11:56	0:00:18	1:28:58
Steind8	802	20,7	1778	1072	1290	20,3	1144	6,7	1140	6,3	0:13:34	0:03:47	1:03:26
Steind9	802	30,7	1769	1448	1769	22,2	1534	5,9	1528	5,5	0:12:39	0:05:47	0:52:03
Steind10	836	58,0	1781	2110	2546	20,7	2165	2,6	2163	2,5	0:13:31	0:13:57	0:51:58
Steind11	993	0,5	4442	29	29	0,0	31	6,9	29	0,0	0:37:23	0:00:20	3:13:48
Steind12	1000	1,0	4437	42	43	2,4	52	23,8	43	2,4	0:47:05	0:00:42	4:00:39
Steind13	998	16,7	4354	500	657	31,4	554	10,8	549	9,8	0:38:56	0:09:11	1:01:08
Steind14	998	25,1	4309	667	853	27,9	723	8,4	723	8,4	0:48:56	0:13:56	1:04:24
Steind15	996	50,0	3916	1116	1412	26,5	1150	3,0	1152	3,2	0:35:31	0:23:56	0:58:17
Steind16	1000	0,5	8048	13	13	0,0	15	15,4	13	0,0	0:50:03	0:00:27	1:10:50

Steind17	1000	1,0	8061	23	26	13,0	30	30,4	25	8,7	0:50:29	0:00:39	1:07:32
Steind18	1000	16,7	7755	223	305	36,8	257	15,2	254	13,9	0:50:11	0:09:05	0:16:06
Steind19	1000	25,0	7552	310	430	38,7	348	12,3	347	11,9	0:53:15	0:14:14	0:23:29
Steind20	1000	50,0	6887	537	694	29,2	546	1,7	545	1,5	0:52:02	0:30:52	0:49:50

Tabla 2: Resultados computacionales

Total 58 pbs. (steinb, steinc, steind)	SRM	Árbol	Vecindades	Árbol mejor que SRM	32 veces
<b>Error medio</b>	12.4 %	5.6 %	3.6 %	<b>SRM mejor que árbol</b>	10 veces
<b>Error medio (problemas con term &lt;10%)</b>	4.6 %	10.4 %	3.1 %	<b>Empates SRM-árbol</b>	16 veces
<b>Error medio (problemas con 10% &lt; term &lt; 30%)</b>	23.3 %	8 %	7.6 %	<b>Vecindades mejor que SRM- árbol</b>	48 veces
<b>Error medio (problemas con term &gt; 30%)</b>	11.4 %	1.7 %	1.8 %	<b>Máximo error</b>	13.9 %
<b>Óptimos</b>	7 veces	6 veces	10 veces		
<b>Éxitos</b>	20 veces	34 veces	42 veces		

Tabla 3: resumen de resultados

Se ha considerado un éxito para errores por debajo del 5% respecto al óptimo. Un empate considera diferencias inferiores al 5%, en otro caso una heurística prevalece como mejor frente a otra. El análisis de resultados permite mostrar los siguientes intervalos adecuados para cada una de las heurísticas.

Terminales < 10%	Terminales $\in(10,40)\%$	Terminales > 40%
SRM y vecindades	Árbol y vecindades	Árbol y vecindades

Tabla 4: Batería de heurísticas

## Referencias

- [1] Onieva, L. *et al*, (1996) Determinacion de demarcaciones para la provision de servicios de telecomunicacion por cable en la Comunidad Autónoma Andaluza. Estudio técnico, Consejería de la Presidencia, Junta de Andalucía.
- [2] Cortés, P., Onieva, L., Larrañeta, J. y García, J.M., (2001) "Decision Support System for Planning Telecommunication Networks: A Case Study Applied to the Andalusian Region", *Journal of the Operational Research Society*, 52 pp. 283-290.
- [3] Winter, P. (1987) "Steiner problem in networks". *Networks*, 17 pp. 129-167.
- [4] Cortés, P., García, J.M., Caraballo, M.S. y Villa, G., (1999), Modelo multi-inyección para el problema de Steiner en redes. En A. Corominas *et al* (eds.) III Jornadas de Ingeniería de Organización, Vol. II, pp. 539-546.
- [5] Magnanti, T.L. y Wolsey, L.A., (1995) Optimal trees. En: Ball, M.O. *et al* (eds). *Network Models*. North-Holland, Elsevier, pp 503-615.
- [6] Beasley, J.E., (2001) OR-Library. <http://mscmga.ms.ic.ac.uk/info.html>.