

Diseño de Redes de Comunicaciones bajo las Restricciones Típicas de un Entorno Ferroviario

Communications Network Design under Constraints of Typical Railroad Environment

José Higuera Soler (*)
INECO

Resumen

Una Red de Telecomunicaciones es un sistema imprescindible en la arquitectura global de una línea ferroviaria. La distribución a lo largo de toda la línea de servicios asociados a elementos clave para la movilización segura de trenes tales como la transmisión de señales ferroviarias, la gestión de la energía de catenaria, la comunicación entre el maquinista y el controlador de circulación, o los servicios necesarios para el mantenimiento de la propia línea, se tornan imprescindibles. Tal es el caso que la pérdida de disponibilidad de cualquier elemento en una red de telecomunicaciones de una línea ferroviaria puede suponer la no viabilidad de la misma y por tanto la imposibilidad de circulación de máquinas comerciales. Sin entrar en más detalles sobre la tipología de los servicios ni sus requisitos de disponibilidad, existe una serie de características asociadas a la propia arquitectura física de una línea ferroviaria cuyo estudio nos puede facilitar la optimización del diseño de su red de telecomunicaciones.

En el presente artículo, se hace un estudio de las mencionadas características para poder establecer ciertos criterios de diseño aplicando estas restricciones a las herramientas clásicas en el diseño de redes como la teoría de grafos, de tal modo que tras un pequeño estudio del modelo de grafo y los recursos disponibles, podamos diseñar una red con la mayor disponibilidad.

Como conclusión final, en este artículo se demuestra que la inclusión de las restricciones de los entornos ferroviarios a las herramientas clásicas de diseño de redes, nos proporcionan modelos más efectivos en el problema NP de optimización de redes.

Palabras clave: Telecomunicaciones, diseño, redes, grafos, confiabilidad, costes, ferroviarias

Abstract

A Telecommunications Network is a system essential to the overall architecture of a railway line. The distribution along the entire line of services associated with key elements for safe movement of trains such as railway signal transmission, the power management catenary, communications between train drivers and traffic controllers, or services necessary for the maintenance of the line, becoming indispensable. Such is the case that the loss of availability of any element in a telecommunications network of a railway line can lead to non-viability and hence the impossibility of movement of business machines. Without going into more detail on the types of services and their availability requirements, a number of characteristics associated with physical architecture of a railway line whose study can facilitate the optimization of the design of its telecommunications network.

In this paper, we study the aforementioned characteristics to establish certain design criteria applying these restrictions to the classic tools in the design of networks as graphs theory, so that after a short study graph model and the resources available, we can design a high availability network.

As a final conclusion, this article shows that the inclusion of rail environments restrictions to the classic tools of network design, we provide more effective models in the NP network optimization problem.

keywords: Telecommunications, design, networking, graph, reliability, costs, rail

* jose.higuera@ineco.es

1. Una Red de Telecomunicaciones en un Entorno Ferroviario

La construcción de una Red de Telecomunicaciones en la actualidad bajo un entorno Ferroviario se realiza habitualmente sobre una infraestructura de fibra óptica tendida sobre dos canaletas situadas a ambos lados de la vía. Un cable de N fibras ópticas es capaz de dotar a la red de N servicios de fibra que podemos duplicar a través de ambas canaletas.

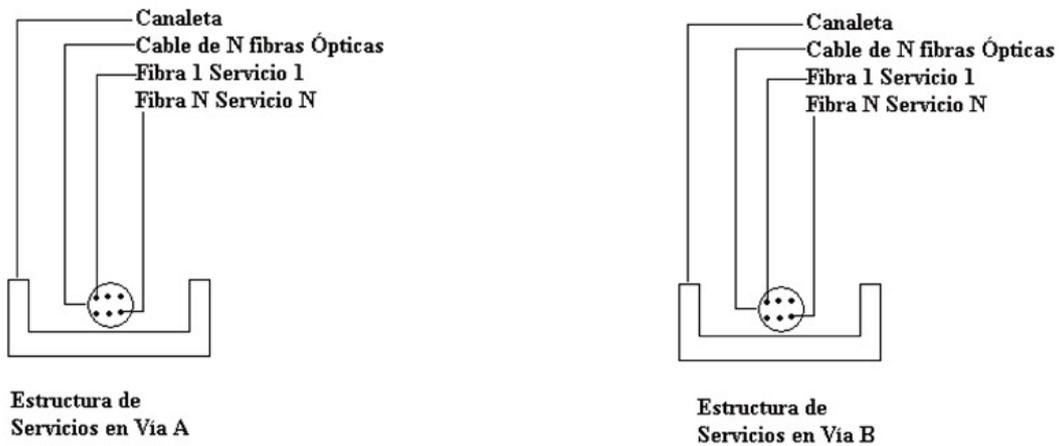


Fig 1. Estructura básica de la Red de FO en una línea Ferroviaria.

Cada uno de estos N servicios nos permite crear los distintos enlaces en nuestra red de Telecomunicaciones.

Una red puede ser modelada a través de un grafo simple (Brecht, 1995) $G = (V, E)$ donde $V[j] = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ es el conjunto de n nodos que representan los centros de comunicaciones de la red y $E[k] = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ es el conjunto de los m enlaces que los unen.

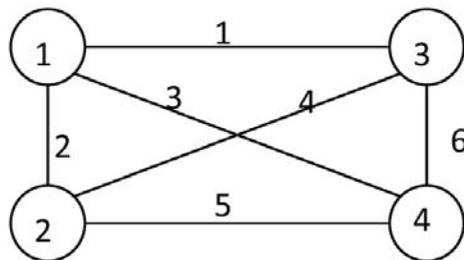


Fig 2. Grafo con 4 nodos y 6 enlaces

Si suponemos un grafo simple, tal cual se muestra en la figura 2 en el que disponemos de 4 nodos que en un ámbito ferroviario estarán situados en 4 puntos distintos de la línea unidos por 6 enlaces que estarán distribuidos dentro de los servicios de fibra disponibles en las 2 canaletas. La figura 3 nos muestra cómo sería una distribución real de los 6 enlaces en una arquitectura con 2 cables de N fibras ópticas.

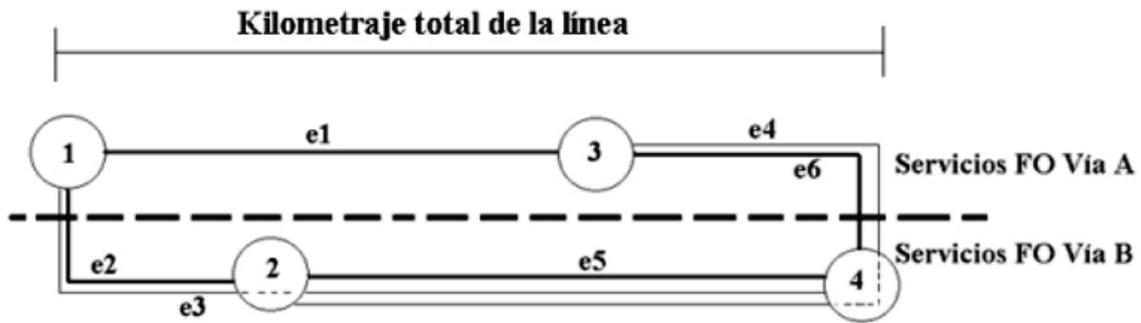


Fig 3. Ejemplo de distribución de un grafo con 4 nodos y 6 enlaces en una arquitectura de 2 cables de fibra óptica.

1.1. Cálculo de Costes.

Podemos determinar el coste de un enlace como la suma de los costes de los puertos de los nodos más el coste del cable necesario para unirlos:

$$C_{\text{enlace}[k(i,j)]} = C_{\text{Puerto}(i,j)} + C_{\text{Puerto}(j,i)} + C_{\text{Cable}(i,j)}$$

Teniendo en cuenta lo observado en la figura 3, podemos determinar que el coste de los cables en una red ferroviaria será siempre una constante igual a la suma de los dos cables de fibra de ambos lados de la vía.

$$C_{\text{Cable } e1} = C_{\text{Cable víaA entre n1 y n3}};$$

$$C_{\text{Cable } e2} = C_{\text{Cable víaB entre n1 y n2}};$$

$$C_{\text{Cable } e5} = C_{\text{Cable víaB entre n2 y n4}};$$

$$C_{\text{Cable } e6} = C_{\text{Cable víaA entre n3 y n4}};$$

$$C_{\text{Cable } e4} = 0; \text{ ya que está incluido en } C_{\text{Cable } e5} + C_{\text{Cable } e6};$$

$$C_{\text{Cable } e3} = 0; \text{ ya que está incluido en } C_{\text{Cable } e2} + C_{\text{Cable } e5};$$

De este modo observamos lo siguiente:

$$C_{\text{Cable vía A}} = C_{\text{Cable } e1} + C_{\text{Cable } e6};$$

$$C_{\text{Cable vía B}} = C_{\text{Cable } e2} + C_{\text{Cable } e5};$$

Entonces:

$$C_{\text{Cable}} = C_{\text{Cable vía A}} + C_{\text{Cable vía B}}$$

Podemos determinar que el coste total del cable es independiente del número de enlaces que tenga el grafo.

Suponiendo que el coste de los puertos es siempre el mismo C_p , el coste total de los enlaces de un grafo de n nodos y m enlaces en un ámbito ferroviario se puede simplificar como:

$$C = m \cdot (C_p) + C_{\text{Cable}}$$

Por otro lado, observando empíricamente los datos referentes a precios de mercado podemos aproximar la siguiente relación:

$$C_{\text{Cable}}[1\text{Km}] \approx C_p$$

Es decir, el coste de los dos puertos ópticos de un enlace es equivalente (al menos en orden de magnitud) al coste de un kilómetro de cable de fibras ópticas, por lo que si establecemos que el coste de un kilómetro es 1:

$$\text{Si } C_{\text{Cable}}[1\text{Km}] \approx C_p = 1 \rightarrow C = m + C_{\text{Cable}};$$

Donde C_{Cable} será aproximadamente doble la distancia en Km de la línea.

Por lo cual, siempre que se cumpla que el número de enlaces sea muy inferior al kilometraje de la línea:

$$\text{Si } m \ll C_c \rightarrow C \approx C_c$$

Podemos determinar que el coste total de los enlaces es prácticamente independiente del número de enlaces que tenga el grafo.

1.2. Cálculo de Confiabilidad.

Para calcular la confiabilidad de una red independientemente del tiempo, emplearemos un modelo de probabilidad discreto. Los componentes de la red (nodos y enlaces) pueden estar en uno de dos estados: operativo o caído, independientemente de los estados del resto de componentes.

Si partimos del grafo $G(V, E)$, donde e es un enlace E siendo E el conjunto de todos los enlaces entre los elementos $v \in V$ y siendo E' el conjunto de enlaces operativos, será $G(V, E')$ un grafo tal que $E' \subseteq E$ y por tanto $E' \leq E$. Siendo p_e la probabilidad de que un enlace esté operativo y $q_e = 1 - p_e$, la probabilidad de que el mismo esté caído. Si Ω es el conjunto de todos los posibles estados operacionales $G(V, E)$, la confiabilidad exacta de la red estará dada por la siguiente expresión (Dengiz, 1997):

$$R(G) = \sum_{\Omega} \left[\prod_{e \in E'} p_e \right] \cdot \left[\prod_{e \in E \setminus E'} q_e \right]$$

Podemos determinar la probabilidad de un enlace como la conjunción entre la probabilidad de que el cable esté operativo y que además los dos puertos que lo unen también lo estén.

$$p_e = p_C * p_{Pa} * p_{Pb};$$

Si los puertos son iguales, entonces:

$$p_p = p_{Pa} = p_{Pb};$$

Por lo cual:

$$p_e = p_C * p_p;$$

Para obtener $R(G)$ calcularemos de forma independiente la confiabilidad en función de los puertos y los cables, tal que:

$$R(G) = R(G)_p * R(G)_C$$

Para para $R(G)_P$ tendremos que emplear la expresión de Dengiz, no obstante, en el cálculo de $R(G)_C$, el ámbito ferroviario aún nos deja otra sorpresa.

Si observamos de nuevo la figura 3, nos damos cuenta de las siguientes interdependencias entre las disponibilidades del cable en los distintos enlaces:

$$P_{ce1} = P_{\text{Cable víaA entre n1 y n3}}$$

$$P_{ce2} = P_{\text{Cable víaB entre n1 y n2}}$$

$$P_{ce5} = P_{\text{Cable víaB entre n2 y n4}}$$

$$P_{ce6} = P_{\text{Cable víaA entre n3 y n4}}$$

p_{Ce4} está incluida en p_{Ce5} y p_{Ce6} y del mismo modo, p_{Ce3} está incluida en p_{Ce2} y p_{Ce5} .

Podemos observar esta dependencia cortando el cable en los distintos puntos de la figura 3; por ejemplo si se pierde la disponibilidad del cable entre n1 y n2, se perderán los enlaces 1 y 3. Así para calcular $R(G)_C$, podemos simplificar el $G(E,V)$ tal y como se observa en la figura 4.

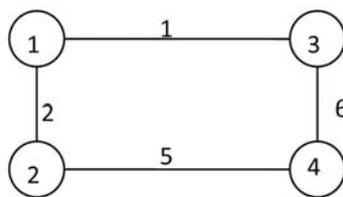


Fig 4. $G(E,V)$ simplificado para el cálculo de $R(G)_C$

Para el cálculo de $R(G)_C$ podremos utilizar la siguiente simplificación (Jan, 1993):

$$R(n) = p_e^n + np_e^{n-1}q_e$$

De este modo podemos concluir que para el cálculo de la confiabilidad de un grafo de n nodos y m enlaces en función de la disponibilidad del cable $R(G)_C$ en un entorno ferroviario sea:

$$R(G)_C = p_{ce}^n + np_{ce}^{n-1}q_e$$

2. Aplicación.

Suponemos una línea ferroviaria con una distancia total $D = 186\text{Km}$ que dispone de un total de 9 emplazamientos principales a los cuales debemos dar servicio con una red Backbone de Telecomunicaciones de Alta Disponibilidad cuyo esquema general de vías se corresponde con el de la figura 5.

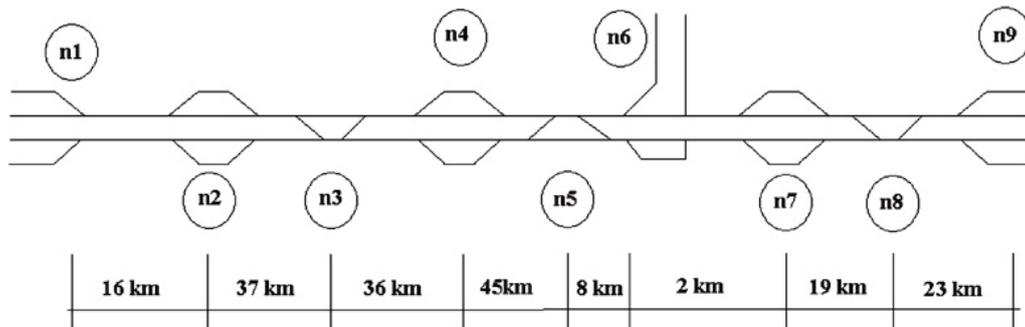


Fig 5. Ejemplo de esquema general de vías $D=186$ y $N=9$.

Como se ha explicado en el anterior apartado, se tendería el cable de fibras ópticas a ambos lados de la vía, de tal modo que inicialmente uniríamos los nodos en forma de anillo, tal y como se representa en la figura 6.

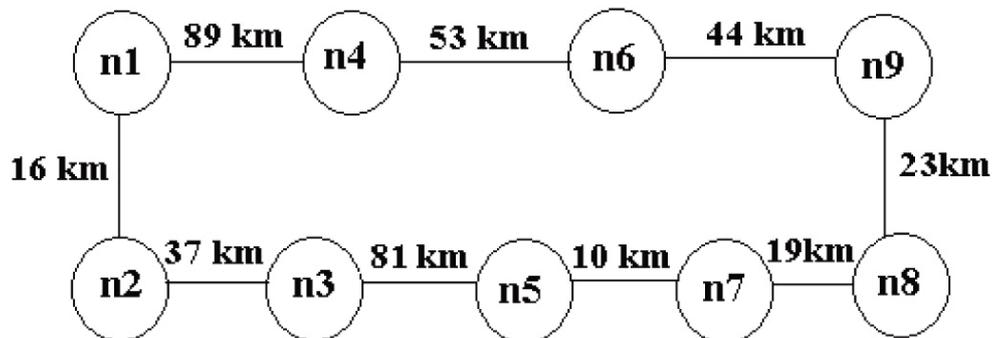


Fig 6. Anillo inicial para el ejemplo de Fig 5.

2.1. Cálculo de Costes.

Definimos una **matriz de costes** $C(G)$ donde cada elemento c_{ij} representa el coste del enlace entre los nodos i y j .

La matriz de costes la rellenamos con la distancia (en km) más 1 (coste cable + coste puertos) en los elementos correspondientes a los enlaces que aparecen en la figura 5. Rellenamos con ceros los costes de los enlaces inexistentes:

	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	
C(G)	0	17	0	90	0	0	0	0	0	n1
	17	0	38	0	0	0	0	0	0	n2
	0	38	0	0	82	0	0	0	0	n3
	90	0	0	0	0	54	0	0	0	n4
	0	0	82	0	0	0	11	0	0	n5
	0	0	0	54	0	0	0	0	45	n6
	0	0	0	0	11	0	0	20	0	n7
	0	0	0	0	0	0	20	0	24	n8
	0	0	0	0	0	45	0	24	0	n9

Podemos calcular el coste total del grafo representado en la figura 6 como:

$$C = 2 * D + m = 381$$

Siendo m el número de enlaces y D la distancia total de la línea en Km.

Suponemos ahora un grafo con 13 enlaces tal y como aparece en la figura 7.

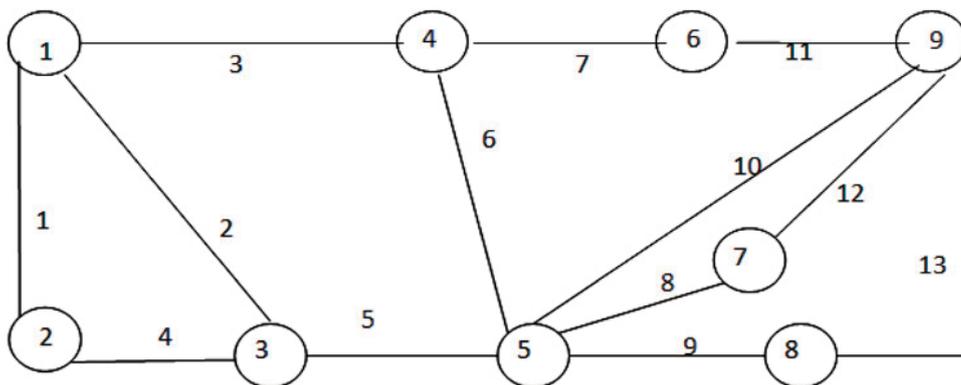


Fig 7. Grafo G(V,E) con 9 nodos y 13 enlaces

Dibujando la nueva matriz de costes:

	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	
C(G)	0	17	1	90	0	0	0	0	0	n1
	17	0	38	0	0	0	0	0	0	n2
	1	38	0	0	82	0	0	0	0	n3
	90	0	0	0	1	54	0	0	0	n4
	0	0	82	1	0	0	1	30	1	n5
	0	0	0	54	0	0	0	0	45	n6
	0	0	0	0	1	0	0	0	1	n7
	0	0	0	0	30	0	0	0	24	n8
	0	0	0	0	1	45	1	24	0	n9

Observamos que la matriz ha variado en función de los enlaces y que se ha puesto a 1 el coste de los enlaces dependientes por lo comentado en el anterior apartado. Calculando los costes del grafo:

$$C(G) = 2 * D + m = 385$$

Es decir, que como ya observamos anteriormente, el coste del grafo $C(G)$ será igual al coste total del cable (dos veces la distancia) más el número total de enlaces. Si la distancia en km es muy superior al número de enlaces dependientes, el coste total se aproximará al doble de la distancia total D .

2.2. Cálculo de Confiabilidad:

Para realizar el cálculo de la confiabilidad, tenemos que suponer 'a priori' los valores de disponibilidad del cable de fibra y de los puertos.

Para facilitar los cálculos, vamos a suponer que la disponibilidad de todos los tramos de fibra es la misma independientemente de la distancia.

Por lo observado en campo, sabemos que la disponibilidad del cable es inferior a la disponibilidad de un puerto ya que es más común la pérdida de disponibilidad de un enlace por un corte de fibra debido a robos, sabotajes o degradación de empalmes que el fallo de un puerto óptico en el nodo. No obstante, suponemos los siguientes valores:

$$p_C = 0,99;$$

$$p_p = 0,99;$$

Dicho de otro modo, tras un tiempo no definido t , la probabilidad de perder un enlace debido a la indisponibilidad del cable será del 1% y la probabilidad de perder un enlace por la caída de cualquiera de sus dos puertos será igualmente del 1%.

Calculamos entonces la confiabilidad, en base a estos valores del anillo representado en la figura 6 Utilizando la aproximación de Jan:

$$R(G)_C = p_C^n + n p_C^{n-1} q_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = p_p^n + n p_p^{n-1} q_p = 0,996564$$

Entonces:

$$R(G)_{fig6} = R(G)_C * R(G)_p = 0,993140$$

Es decir, pasado un tiempo t , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 6 estén disponibles es del 99,31%.

Calculamos ahora la confiabilidad del grafo representado en la figura 7:

$$R(G)_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = 0,999497$$

Por lo que:

$$R(G)_{fig7} = R(G)_C * R(G)_p = 0,996063$$

Dicho de otro modo, pasado un tiempo t , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 7 estén disponibles es del 99,61%.

Teniendo en cuenta que $R(G)_C$ será siempre constante e independiente del tipo de grafo, se establece un límite máximo tal que:

$$R(G)|_{R(G)_p = 1} = R(G)_C$$

Por último, vamos a suponer un grafo $G(E,V)$ que suponga un máximo en el problema de maximización de $R(G)$ para el mismo número de enlaces y nodos, tal y como supondría el de la figura 8.

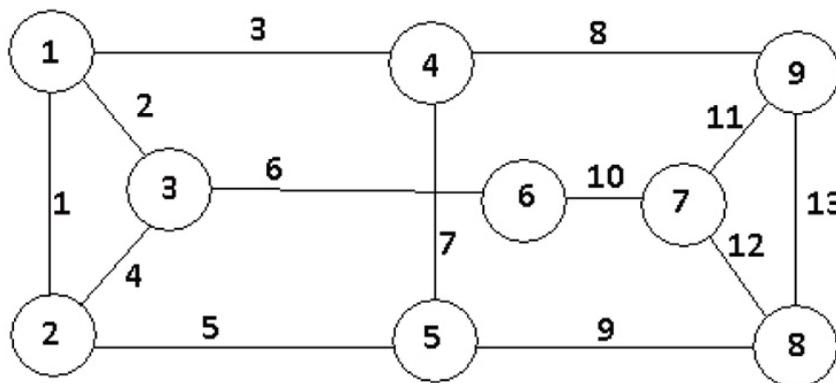


Fig 8. $C(V,E)$ con 9 nodos y 13 enlaces máximo para $R(G)$

Como ya hemos visto, el coste del grafo sería el mismo que el de la figura 7, es decir:

$$C(G) = 2 * D + m = 385$$

Calculando la confiabilidad:

$$R(G)_C = 0,996564$$

$$R(G)_p = 0,999892$$

$$R(G)_{fig8} = R(G)_C * R(G)_p^2 = 0,996457$$

Pasado un tiempo t , la probabilidad de que todos los nodos de la red representada en la figura 8 estén disponibles será 99,65%.

3. Conclusiones.

En el presente artículo se han estudiado las características típicas que presenta una red de telecomunicaciones desarrollada en un entorno ferroviario, con el objetivo de establecer ciertos aspectos en los criterios de diseño focalizados en el entorno que nos ocupa.

Hemos observado que pese a que el aumento de costes a la hora de sumar enlaces en una red de telecomunicaciones ferroviaria es muy bajo respecto al coste total de la propia red, la confiabilidad no aumenta significativamente de grado y esto es debido al peso que supone la interdependencia entre los enlaces debida al uso del mismo cable.

Por otro lado, hemos establecido simplificaciones importantes que nos ayudarán a facilitar enormemente las opciones de búsqueda de máximos redes ferroviarias en el problema NP complejo de optimizar $G(E,V)$ maximizando $R(G)$ y minimizando $C(G)$.

4. Referencias

- [1] Deo, N., *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1974).
- [2] Jan, R. H., "Design of Reliable Networks", *Computers and Operations Research*, vol. 20, January 1993, pp 25-34 1993.
- [3] Jan, R. H., Hwang, F.J., Cheng, S.T., "Topological Optimization of a Communication Network Subject to a Reliability Constraint", *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 42, No. 1, March 1993 pp 63-70.
- [4] Brecht, Timoty, "Lower Bounds for Two Terminal Network Reliabilit", Thesis 1995.
- [5] Dengiz Berna, Fulya Altipamak, "Efficient optimization of all-terminal reliable network using evolutionary aproach". *IEEE Transactions on Reliability*, march 1997.
- [6] Dengiz, B. "Efficient Optimization of All Reliable networks, using an Evolutionary Approach". *IEEE transactions on reliability* vol 46 nro 1, 1997.