UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

Diseño energéticamente eficiente de tarjetas de línea y grupos de agregación de enlaces en redes de comunicaciones cableadas

Autor: Jaime Galán Jiménez

Departamento: Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos

Año de Lectura: 2014

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

Diseño energéticamente eficiente de tarjetas de línea y grupos de agregación de enlaces en redes de comunicaciones cableadas

Autor: Jaime Galán Jiménez

Departamento: Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos

Conformidad del Director:

Fdo: Alfonso Gazo Cervero

Año de Lectura: 2014

Dedicada a mis pequeñas, Zoe y Estela,

y a mis padres, Juani y Juan Luis.

Agradecimientos

Tras llegar al final del largo camino que supone completar una tesis doctoral, me gustaría agradecer el apoyo recibido por parte de una serie de personas que deben sertirse partícipes del éxito conseguido, puesto que llegar hasta este punto ya es un éxito para mí.

En primer lugar agradecer de todo corazón a mis dos razones de ser: Estela y la pequeña "little" Zoe, puesto que me han ayudado en todo lo que he necesitado y han hecho todo lo posible para que pudiera terminar la tesis. Os debo días y días de relax, parques, juegos, etc. que comenzarán no muy tarde.

A mis padres, puesto que siempre han confiado en mí y me han apoyado durante toda la vida. Gracias, de verdad.

A Alfonso, director de esta tesis, que constituye el otro pilar sobre el que se sustenta, ya que sin su impecable dirección nada de esto hubiera sido posible.

También me gustaría extender mi agradecimiento a los compañeros del departamento y del grupo de investigación por su inestimable ayuda cuando la he necesitado.

Para concluir, me gustaría dar las gracias al Gobierno de Extremadura por el soporte económico proporcionado por la beca de investigación predoctoral PRE09184 de la cual fui beneficiario durante casi 3 años y por las ayudas a grupos de investigación destinadas al grupo GÍTACA (GRU10116).

Abstract

Durante los últimos años, el incremento del consumo de energía derivado del uso de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) ha atraído la atención desde dos puntos de vista distintos: el medioambiental y el económico. Por un lado, son responsables de la generación de alrededor de un 2-4 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) a la atmósfera a nivel mundial, mientras que por el otro, su consumo de energía se acerca al 10 % de la energía eléctrica mundial y presenta una tendencia al alza, lo que se traduce en un elevado coste económico.

Las redes de comunicaciones representan un gran porcentaje de estos valores. Sin embargo, son una de las áreas más prometedoras en las que conseguir una reducción significativa del consumo de energía global y, por ende, de las emisiones de CO2 para preservar el entorno contra el temido cambio climático.

Aunque tradicionalmente los fabricantes e ingenieros de red se han centrado en maximizar el rendimiento de las redes comunicaciones, en la actualidad se propone una aproximación diferente que consiste en considerar criterios de eficiencia energética. De entre las distintas estrategias que existen para reducir el consumo de energía de las redes de comunicaciones, el trabajo realizado en esta tesis se centra en proponer un diseño de enlaces y de grupos de agregación de enlaces o *Link Aggregation Groups* (LAG) energéticamente eficientes que se traduzca en un ahorro de energía significativo en las redes que los incorporen.

Inicialmente se definen una serie de conceptos que permiten caracterizar de forma genérica el consumo de energía de un determinado enlace: nivel de energía, función de energía y distribución de energía. Mediante la aplicación de dos técnicas que se basan en la desactivación temporal de componentes y en la adaptación de la velocidad a la que éstos trabajan, se ha realizado una propuesta en la que se utilizan meta-heurísticas basadas en la computación bio-inspirada para evaluar la posible reducción del consumo de energía de la red.

Tras un conjunto de simulaciones sobre topologías de red reales de distinto tamaño para las que se explota la variación de la carga de tráfico a lo largo del día, se obtienen una serie de resultados que demuestran que no es necesario que los fabricantes construyan tarjetas de línea que soporten un elevado número de modos de operación distintos para conseguir un ahorro significativo de energía. En concreto, basta con que dispongan de

4 modos de operación como máximo para lograr mejorar en gran medida la eficiencia energética de una red.

Una vez evaluada la propuesta relacionada con el diseño de tarjetas de línea energéticamente eficientes, el problema se generaliza y extiende su ámbito de aplicación a los LAG. Partiendo de las definiciones iniciales que caracterizan el consumo energético de un determinado enlace, se define el concepto de función de energía equivalente de un LAG y se procede a su cálculo mediante la utilización de programación lineal. Esta función permite, dada una carga de tráfico concreta, configurar un LAG de modo que su consumo de energía sea el mínimo necesario para poder satisfacerla.

En base a la evaluación realizada, se realizan una serie de recomendaciones por un lado a los fabricantes de tarjetas de línea para que puedan construir tarjetas que sean a la vez energéticamente eficientes y dispongan de un compromiso con respecto a la complejidad de su fabricación y, por otro, a los administradores de red en relación a la formación y configuración de LAG cuando sus diseños de red así lo requieran para que éstos sean energéticamente eficientes y el consumo de la red se vea reducido. Los resultados obtenidos sobre un enlace real para el que también se explota la variación de la carga de tráfico a lo largo del día demuestran que desde el punto de vista de la eficiencia energética es más interesante considerar LAG con un número mayor de enlaces agregados antes que disponer de LAG cuyos enlaces implementen distinta tecnología.

La información extraída de las conclusiones de esta tesis puede resultar de interés a fabricantes de tarjetas de línea y a administradores de red que deseen incorporar características de eficiencia energética en sus respectivos ámbitos de aplicación.

Abstract

During recent years, the increase in energy consumption associated to Information and Communications Technology (ICT) equipment has gained attention from two points of view: the environmental and the economic one. On the one hand, energy consumption of ICT equipment accounts for 2-4 % of worldwide Carbon Dioxide (CO2) emissions. On the other hand, energy consumption of ICT equipment is around 10 % of the global electric consumption and shows a tendency on the rise, which implies increasing economic costs.

Communication networks represent a high proportion of those figures. Nevertheless, these are one of the most promising areas for reducing global energy consumption, and consequently, reducing CO2 emissions and thus being an aid in climate change.

Traditionally, network equipment vendors and network engineers have focused on maximizing the performance of network communications. A current trend, the one in which this work resides, includes an approximation to explore criteria of energy efficiency. Among the various existing strategies for reducing energy consumption in communication networks, the work in this thesis concentrates in proposing a design for links and Link Aggregation Groups (LAG) that would be efficient in terms of energy consumption and that would translate into significant energy savings in the networks which incorporate them.

The model proposed in this thesis builds on three concepts that allowed for the characterization of a link´s energy consumption: energy level, energy function and energy distribution. The model uses meta-heuristics based on bio-inspired algorithms to evaluate potential savings in energy consumption of a network. Two techniques were used to develop the proposed model, one based in the temporary deactivation of the components, and another one based in the adaptation of their operational rate.

The work consisted on conducting simulations on various real network topologies of various sizes, to obtain the variation of network traffic throughout a common daily period. Results from these simulations indicate that it is not necessary that vendors make line cards that would allow for a high number of operation modes in order to obtain significant energy savings. Specifically, results indicate that a maximum of 4 operation modes is needed to improve the energy efficiency of a network.

Once the proposal for energy efficient line cards design has been achieved, it was necessary to account for its impact on LAGs. Based on the initial definitions that characterize energy consumption for a determined link, the concept of equivalent energy function to a LAG is defined and calculated through lineal programming. This function allows for, given a network load, the configuration of a LAG in a way that it properly works with the minimum energy requirements.

Based on the experiments conducted, recommendations will be provided in two main directions. Firstly, recommended guidelines for the design of energy efficient line cards will be provided to their vendors. Secondly, recommendations for the formation and configuration of energy efficient and low network consumption LAGs will be provided to network administrators. The results obtained for a real link, for which variation in the network traffic throughout the day is also accounted for, suggest that a higher number of aggregated links in a LAG would be more energy efficient than utilizing LAGs with different line cards technologies.

The conclusions derived from this thesis could be of interest to network equipment vendors, and to network administrators who would like to incorporate energy efficient characteristics into the networks they are responsible for.

Índice general

1. Introducción, Objetivos, Contribuciones, Metodología y Estructura de esta Tesis **1**
1.1. Objetivos 4
1.2. Contribuciones 4
1.3. Metodología 6
1.3.1. El Método Científico 6
1.3.2. Metodología Utilizada en el Desarrollo de esta Tesis 8
1.4. Estructura de esta Tesis 9
1.5. Publicaciones Obtenidas 12
1.5.1. Publicaciones Relacionadas con esta Tesis 12
1.5.2. Otras Publicaciones 13

I Diseño de Tarjetas de Línea Energéticamente Eficientes **15**

2. Eficiencia Energética en las Redes de Comunicaciones **17**
2.1. Historia y Evolución de las Técnicas de Eficiencia Energética en las Redes de Comunicaciones 18
2.2. Eficiencia Energética en Redes Inalámbricas 18
2.2.1. Encaminamiento Energéticamente Eficiente 19
2.2.2. Planificación de la Actividad del Nodo 20
2.2.3. Ajuste de la Potencia de Transmisión del Nodo 20
2.2.4. Reducción del Volumen de Información Transmitida 21
2.2.5. Posibilidad de Aplicación de estas Estrategias sobre Redes Cableadas 21
2.3. Eficiencia Energética en Redes Cableadas 22
2.3.1. El Estándar IEEE 802.3az - *Energy Efficient Ethernet* 23
2.3.2. Adaptación de la Velocidad de los Enlaces para el Ahorro de Energía 25
2.4. Eficiencia Energética en Redes Ópticas 27
2.4.1. Diseño de Red Energéticamente Eficiente 28
2.4.2. Desactivación de Componentes de Red 28
2.4.3. Reenvío de Paquetes IP Energéticamente Eficiente 29
2.4.4. Encaminamiento Energéticamente Eficiente 29
2.5. Conclusiones 30

3. Configuración de Red para el Ahorro de Energía 31
3.1. Definición del Problema 31
3.2. Definición de Nivel de Energía 33
3.3. Definición de Distribución de Energía 34
3.4. Definición de Función de Energía 35
3.5. Caracterización de las Funciones de Energía 37
3.6. Conclusiones 39

4. Aplicación de Algoritmos Bio-inspirados para el Ahorro de Energía 41
4.1. Algoritmos Genéticos 42
4.1.1. Aplicación de Algoritmos Genéticos para el Ahorro de Energía 43
4.1.2. Codificación del Cromosoma 43
4.1.3. Función de *Fitness* 46
4.1.4. Parámetros del Algoritmo Genético 47
4.2. Optimización por Enjambre de Partículas 48
4.2.1. Codificación de las Partículas 49
4.2.2. Función de *Fitness* 50
4.2.3. Parámetros de la Optimización por Enjambre de Partículas . . 50
4.3. Consideraciones sobre la Aplicación de los Algoritmos Bio-inspirados 51
4.3.1. Recursos y Herramientas Utilizados 51
4.3.2. Coste Computacional de la Evaluación de la Función de *Fitness* 52
4.3.3. Reducción del Número de Evaluaciones de la Función de *Fitness* 52
4.4. Análisis del Compromiso Ahorro de Energía-Tiempo de Cómputo . . 54
4.5. Conclusiones 56

5. Resultados Experimentales 57
5.1. Carga de Tráfico 57
5.2. Metodología 59
5.3. Análisis y Discusión de Resultados 59
5.3.1. Validación de los Resultados 63
5.3.2. Variación en la Carga de los Enlaces tras Aplicar los Mecanismos de Reducción de Consumo Energético 66
5.4. Comparación con Otras Propuestas de Eficiencia Energética 69
5.5. Conclusiones 71

II Diseño de Grupos de Agregación de Enlaces Energéticamente Eficientes 73

6. Grupos de Agregación de Enlaces: Protocolos y Eficiencia Energética 75
6.1. Protocolos de Agregación de Enlaces 77
6.1.1. El Estándar IEEE 802.3ad - IEEE 802.1ax 78
6.1.2. *Link Aggregation Control Protocol* 80
6.1.3. *Virtual Router Redundancy Protocol* 85

6.1.4. *Spanning Tree Protocol* 87
6.1.5. *Multi-Chassis Link Aggregation Group* 88
6.1.6. *Transparent Interconnection of Lots of Links* y *Shortest Path Bridging* 90
6.1.7. Comparación de los Protocolos que Permiten la Agregación de Enlaces 92
6.2. Eficiencia Energética en Grupos de Agregación de Enlaces 94
6.2.1. Aplicación de la Técnica *Sleeping* en Grupos de Agregación de Enlaces para el Ahorro de Energía 94
6.2.2. Aplicación de la Técnica *Rate Adaptation* en Grupos de Agregación de Enlaces para el Ahorro de Energía 100
6.3. Conclusiones 100

7. Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces 103
7.1. Definición de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces 103
7.2. Cálculo de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces. Definición del Problema 105
7.3. Ejemplos de Cálculo de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces 106
7.3.1. Ejemplo 1. Grupo de Agregación de Enlaces de 2 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Lineales 106
7.3.2. Ejemplo 2. Grupo de Agregación de Enlaces de 2 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Homogéneas 112
7.3.3. Ejemplo 3. ¿Cómo se consigue que la Función de Energía Equivalente sea de consumo mínimo? 118
7.3.4. Ejemplo 4. Grupo de Agregación de Enlaces de 3 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Heterogéneas 121
7.4. Conclusiones 123

8. Resultados Experimentales 125
8.1. Carga de Tráfico 126
8.2. Metodología 129
8.3. Análisis y Discusión de Resultados 132
8.3.1. Enlace individual 132
8.3.2. LAG de 2 enlaces 135
8.3.3. LAG de 3 enlaces 137
8.3.4. LAG de 4 enlaces 137
8.3.5. Validación de los Resultados 141
8.4. Comparación con Otras Propuestas de Eficiencia Energética en Grupos de Agregación de Enlaces 143
8.5. Conclusiones 145

III Conclusiones y Trabajos Futuros **147**

9. Conclusiones Finales **149**

10. Trabajos Futuros **153**

10.1. Tarjetas de Línea Energéticamente Eficientes y Calidad del Servicio . 153

10.2. Normalización de la Carga de Tráfico 154

10.3. Grupos de Agregación de Enlaces Energéticamente Eficientes, Protocolos de Agregación de Enlaces y *Software Defined Networking* 154

Bibliografía **156**

A. Listado de Acrónimos **169**

Índice de figuras

1.1. Problema del consumo de energía derivado de la equipación TIC. . . 2
1.2. Áreas de clasificación de los métodos de eficiencia energética en redes cableadas. 10

2.1. Transiciones de los diferentes modos de operación en *Energy Efficient Ethernet*. 24
2.2. Aproximación al modelo de consumo de la tecnología Ethernet. 27

3.1. Esquema de infraestructura de red con los conceptos de la definición del problema. 32
3.2. Esquema del concepto de nivel de energía asociado a un enlace. . . . 33
3.3. Descripción de un enlace unidireccional con tres niveles de energía, función de energía lineal y distribución de energía lineal. 36
3.4. Ejemplos de enlaces con distintas características. 37
3.5. Funciones de energía lineal y logarítmica para ($n_{e_{i,j}} = \infty$). 38
3.6. Adaptación de áreas de las funciones de energía para ($n_{e_{i,j}} = \infty$). . . 39
3.7. Ejemplos de adaptación de áreas para las funciones de energía lineal y logarítmica en función del número de niveles de energía y del tipo de distribución de energía. 40

4.1. Ejemplos de codificación de cromosomas para una distribución de energía lineal y distinto número de niveles de energía. 45
4.2. Esquema de la metodología utilizada para reducir el número de evaluaciones de la función de *fitness*. 53
4.3. Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo en GA. 55
4.4. Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo en PSO. 55
4.5. Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo para ambos algoritmos bio-inspirados. 56

5.1. Porcentaje de carga de tráfico agregado a lo largo del día para las redes NSFNet, Géant y AT&T. 58
5.2. Porcentaje de ahorro de energía instantáneo para NSFNet utilizando una distribución de energía lineal y la configuración GA_{C2}. 61
5.3. Porcentaje de ahorro de energía instantáneo para Géant utilizando una distribución de energía lineal y la configuración GA_{C2}. 62

5.4. Diagrama de frecuencias de los niveles de significación en las pruebas de Wilcoxon. 64
5.5. Porcentaje de ahorro de energía de las distintas combinaciones de tuplas en función del número de niveles de energía. 65
5.6. Carga de los enlaces a lo largo del día para la red NSFNet. 67
5.7. Carga de los enlaces a lo largo del día para la red Géant. 68

6.1. Ejemplo de grupo de agregación de enlaces o LAG. 75
6.2. Ejemplo de topología con agregación de capacidad y alta disponibilidad. 76
6.3. Agregación de enlaces en el modelo de referencia OSI. 78
6.4. Diagrama de bloques de la Subcapa de Agregación de Enlaces. 79
6.5. Secuencia de pasos para el establecimiento de un LAG con LACP en modo activo / pasivo. 83
6.6. Establecimiento de LAG con LACP en modo activo / activo. 84
6.7. Distribución de tráfico con LACP. 84
6.8. Ejemplo de operación del protocolo VRRP. 86
6.9. Ejemplo de utilización de STP con agregación de enlaces. 87
6.10. Utilización ineficiente de la red con STP. 88
6.11. Esquema de ejemplo con MC-LAG. 89
6.12. *RBridging*. 91
6.13. Modificación de LACP. 96
6.14. Ahorro de energía sobre la topología Abilene en función del tamaño del LAG. 98

7.1. Descripción de un LAG o enlace agregado. 104
7.2. Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del primer ejemplo. 107
7.3. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el primer nivel de energía. 108
7.4. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el segundo nivel de energía. 109
7.5. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el tercer nivel de energía. 110
7.6. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el cuarto nivel de energía. 111
7.7. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el quinto nivel de energía. 112
7.8. Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del segundo ejemplo. 113
7.9. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el primer nivel de energía. 114
7.10. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el segundo nivel de energía. 115
7.11. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el tercer nivel de energía. 116

7.12. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el cuarto nivel de energía. 117
7.13. Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el quinto nivel de energía. 118
7.14. Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del tercer ejemplo. 119
7.15. Pasos 1 a 3 del proceso de cálculo de FEE de un LAG. 120
7.16. FEE del LAG tras el paso 3. 120
7.17. Pasos 3 a 5 del proceso de cálculo de FEE de un LAG. 121
7.18. FEE resultante del LAG. 121
7.19. Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del cuarto ejemplo (a, b, c) y FEE resultante del propio LAG (d). 122

8.1. Porcentaje de carga de tráfico de ESpanix a lo largo del día. 128
8.2. Diferencia en el porcentaje de carga de tráfico de ESpanix a lo largo del ciclo diario entre un día laborable y un día festivo. 129
8.3. Consideraciones para la obtención de los resultados experimentales. . 131
8.4. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un enlace individual, $e_{i,j}$. 133
8.5. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un enlace individual, según los distintos percentiles de la Figura 8.4. 134
8.6. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 2 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}\}$. 135
8.7. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 2 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.6. 136
8.8. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 3 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, e^3_{i,j}\}$. 138
8.9. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 4 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, e^3_{i,j}, e^4_{i,j}\}$. 138
8.10. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 3 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.8. 139
8.11. Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 4 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.9. 140

Índice de tablas

2.1. Cálculo de la eficiencia de trama individual (SFe) para diferentes velocidades de operación. 25

3.1. Ejemplo de enlace Ethernet con $n_{e_{i,j}} = 5$. 34
3.2. Valores de las distribuciones de energía en función del número de niveles de energía. 35

4.1. Valores de los parámetros utilizados para el GA. 47
4.2. Valores de los parámetros utilizados para PSO. 51

5.1. Características de los enlaces de las tres redes evaluadas. 58
5.2. Posibles valores para los componentes de la tupla $(T, r_{e_{i,j}}, f_{e_{i,j}}, CA)$. . 59
5.3. Resultados experimentales para NSFNet, con una distribución de energía lineal, una función de energía lineal y la configuración GA_{C2}. . . . 60
5.4. Resultados experimentales: evaluación del GA para la red NSFNet. . 63
5.5. Resultados de la regresión^{A} 65
5.6. Comparación entre nuestra propuesta y otras soluciones existentes en la literatura relacionada. 70

6.1. Combinaciones válidas en LACP. 81
6.2. Comparación de las características de los distintos protocolos que permiten la agregación de enlaces. 93

7.1. Características de los enlaces agregados en el LAG del primer ejemplo. 106
7.2. Características de los enlaces agregados en el LAG del segundo ejemplo. 113
7.3. Características de los enlaces agregados en el LAG del tercer ejemplo. 119
7.4. Características de los enlaces agregados en el LAG del cuarto ejemplo. 122

8.1. Trazas de tráfico correspondientes a los enlaces analizados. 127
8.2. Posibles valores de los elementos de la tupla de características $T_{e_{i,j}}$ de un enlace individual $e_{i,j}$. 130
8.3. Criterios y variables utilizadas en el análisis multivariante. 142
8.4. Resultados de la regresión^{A} 143
8.5. Comparación entre nuestra propuesta y otras soluciones existentes en la literatura relacionada con la eficiencia energética en LAG. 144

Índice de algoritmos

4.1. Descripción en pseudocódigo del GA clásico. 43
4.2. Descripción en pseudocódigo del algoritmo utilizado para crear un cromosoma correspondiente a una configuración de red determinada. . . 44
4.3. Descripción en pseudocódigo del algoritmo de PSO clásico. 49

Capítulo 1

Introducción, Objetivos, Contribuciones, Metodología y Estructura de esta Tesis

> "El comienzo del conocimiento es el descubrimiento de algo que no entendemos."
>
> Frank Herbert

La energía consumida por la equipación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) ha generado una preocupación en la sociedad a lo largo de los últimos años. Esta preocupación está relacionada por un lado con el impacto ejercido sobre el medio ambiente y por el otro con el coste económico asociado.

Desde el punto de vista medioambiental, el cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad, ya que se requieren medidas a gran escala para evitar daños que podrían ser en un futuro irreversibles.

Las TIC son responsables de la generación de alrededor de un 2-4 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) a nivel mundial [1]. De este porcentaje, aproximadamente el 37 % proviene de las redes de comunicaciones y del equipamiento de red [2] y se estima que para el año 2020 se multiplique por dos si no se aplican iniciativas para la reducción de este tipo de emisiones a la atmósfera.

Sin embargo, para que la temperatura global del planeta no aumente más de un 2 % en dicho año, es necesario que el volumen de emisión de los gases de efecto invernadero se reduzca del 15 al 30 % [3]. Un ejemplo de actuación para tratar de minimizar este impacto es el adoptado por la empresa española Telefónica, que se ha propuesto el objetivo de reducir las emisiones de CO2 para el año 2020 en un 30 % en relación a los 1,7 millones de toneladas emitidas en 2010 [4].

Desde el punto de vista económico, el consumo de energía actual de las TIC se acerca al 10 % de la energía eléctrica mundial (en torno a 1500 TWh/año), lo que equivale a toda la generación eléctrica conjunta de Japón y Alemania en la actualidad o a la cantidad de energía utilizada para la iluminación del planeta en el año 1985.

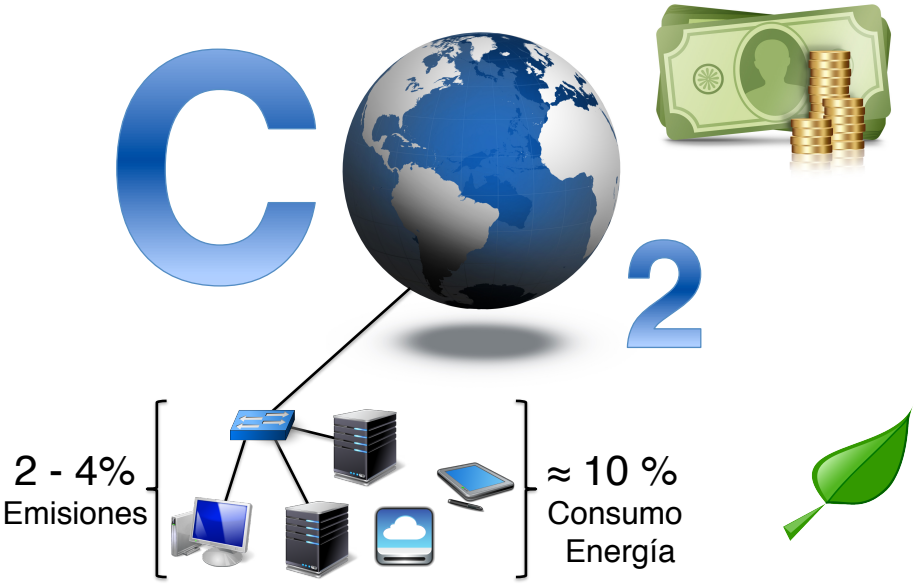


Figura 1.1: Problema del consumo de energía derivado de la equipación TIC.

De hecho, la denominada era del zettabyte ya usa alrededor de un 50 % más de la energía utilizada por la industria de la aviación [5].

En concreto, la infraestructura de red de los EEUU supuso en el año 2008 un consumo estimado de entre 5 y 24 TWh/año [6], lo que se tradujo en un coste anual de entre 0,5 y 2,4 billones de dólares. En ese mismo año, el consumo de energía de los *data centers* alcanzó el 3 % del total de la energía consumida en el país. En 2011 su consumo fue de 100 TWh/año, con un coste total de más de 10 billones de dólares asumiendo un precio de electricidad de 100$/MWh. Por ello, existe una preocupación latente por parte de los operadores de *data centers* relacionada con la factura eléctrica, ya que en estas condiciones puede suponer hasta la mitad del coste total de la propiedad del propio *data center* [7].

En España, el informe de sostenibilidad corporativa de Telefónica [4] sirve como ejemplo para conocer un conjunto de datos relacionados con el consumo de energía de compañías dedicadas a las TIC en nuestro país. Concretamente, el consumo de energía en redes y oficinas de Telefónica alcanzó alrededor de 5,9 GWh en el año 2012, aunque se prevé que este número se reduzca en un 10 % para el año 2015 gracias a los objetivos fijados por la empresa en materia de mejora de eficiencia energética anteriormente mencionados.

Por otro lado, las estimaciones indican que el consumo de energía de las redes de comunicaciones crecerá globalmente más de un 200 % en 2017 [8]. En Europa, concretamente, se prevén valores en torno a 35,8 TWh en 2020 [9], mientras que en Japón, el consumo de dispositivos de red tales como los *routers* supondrán el 9 % de la electricidad del país en 2015 [10].

Estos datos muestran la necesidad de frenar el creciente consumo de energía de las TIC en general y de las redes de comunicaciones en particular. Para ello, durante

los últimos años se han realizado gran cantidad de propuestas por parte tanto de la academia como de la industria cuyo foco está puesto en la aplicación de estrategias de eficiencia energética sobre las redes de comunicaciones debido a la conciencia global por la sostenibilidad del planeta y al creciente coste económico derivado.

Afortunadamente, el ámbito de las TIC es una de las áreas más prometedoras en las que poder conseguir una reducción significativa del consumo de energía global, ya que el equipamiento de sus infraestructuras, ya sea para el almacenamiento o para las comunicaciones, normalmente se encuentra operando a su máximo rendimiento incluso cuando no está siendo utilizado.

Aunque tradicionalmente los avances en el campo de las redes de comunicaciones han estado relacionados con la mejora del rendimiento, la escalabilidad o la calidad del servicio, en la actualidad se pretende conseguir un ahorro significativo de energía sin que la comunicación se vea afectada, es decir, manteniendo las prestaciones requeridas.

Una de las estrategias para reducir el consumo energético de las redes de comunicaciones consiste en realizar un diseño de sistemas energéticamente eficientes mediante la optimización de sus componentes hardware. Existen tecnologías que para un requisito específico son mucho más eficientes desde el punto de vista energético que otras, como por ejemplo las tecnologías ópticas en comparación con las tecnologías de red que utilizan el cable de par trenzado (10GBase-SR y 10GBase-T respectivamente) [11]. En este ámbito también se puede realizar un control dinámico de potencia de forma que se limite la potencia de transmisión necesaria para alcanzar al receptor en función de la distancia y poder así reducir el consumo de energía.

Otra aproximación para la mejora de la eficiencia energética en las redes de comunicaciones consiste en dormir (pasar a modo de ahorro de energía) partes de la electrónica de red que no están siendo utilizadas en un momento dado. Una vez que sea necesaria su utilización, se vuelven a activar (despertar) para poder operar a su máximo rendimiento. Una variante de esta estrategia consiste en adaptar la velocidad de las tarjetas de línea a los requisitos puntuales de la red. En este caso, las tarjetas de línea no pasan a dormirse sino que reducen su velocidad, con el consiguiente ahorro de energía cuando la carga de la red así lo permite.

También es posible rediseñar protocolos de encaminamiento desde el punto de vista de la eficiencia energética, de modo que se pueda reconducir el tráfico por ciertas zonas de la red para que otras tengan que realizar un menor esfuerzo en términos de consumo energético. El principal objetivo en este caso es determinar el mínimo conjunto de recursos que han de ser utilizados para satisfacer una demanda de tráfico dada. Los recursos en cuestión, *routers* y tarjetas de línea, podrán ahorrar energía al utilizar las técnicas mencionadas en el párrafo anterior.

En resumen, existen una serie de estrategias que generan la oportunidad de proponer mecanismos para conseguir un incremento del ahorro de energía en las redes de comunicaciones, de forma que su aplicación se traduzca en una reducción de las emisiones de CO2 a la atmósfera y del coste económico asociado.

1.1. Objetivos

Las redes de comunicaciones cableadas se comportan como grandes consumidores de energía cuyo consumo aún no se ha optimizado. Partiendo de esta base, el objetivo general de esta tesis consiste en:

> "Mejorar la eficiencia energética de las redes de comunicaciones cableadas sin que ello repercuta negativamente sobre el rendimiento actual y las necesidades de los usuarios".

Debido a que este objetivo general es muy amplio, nos centramos en la mejora de la eficiencia energética del equipamiento de red en su etapa de diseño. Concretamente, los objetivos específicos de esta tesis son dos:

- Diseño de tarjetas de línea energéticamente eficientes. Parte I de esta tesis.

  Con este primer objetivo se pretenden proporcionar una serie de recomendaciones a los fabricantes de tarjetas de línea de modo que puedan construir tarjetas energéticamente eficientes sin que ello suponga un elevado impacto sobre la complejidad de su fabricación.

- Diseño de grupos de agregación de enlaces o *Link Aggregation Group* (LAG) energéticamente eficientes. Parte II de esta tesis.

  Este segundo objetivo pretende proporcionar una serie de pautas a los administradores de red en relación con la formación y configuración de LAG para que éstos sean energéticamente eficientes y el consumo de energía de la red se vea reducido.

Con el objetivo de diseñar enlaces energéticamente eficientes (tarjetas de línea y LAG) se pretenden aplicar dos técnicas que permiten conseguir una reducción del consumo de energía del equipamiento hardware de forma individual. Estas técnicas se basan en la desactivación temporal de componentes y en la adaptación de la velocidad a la que éstos trabajan.

Para ello, se pretenden utilizar técnicas de optimización y meta-heurísticas en función de la complejidad computacional derivada de la resolución del problema, de modo que permitan obtener resultados para evaluar la eficiencia energética. Además, actuando de forma independiente sobre los elementos de la red, se pretende estimar la cantidad de energía que se puede ahorrar en la misma mediante la suma de los efectos sobre cada uno de estos elementos individuales.

1.2. Contribuciones

Tal y como se irá describiendo a lo largo de esta memoria, las contribuciones más importantes de esta tesis pueden resumirse en las siguientes:

- Definición formal de nivel de energía, distribución de energía y función de energía asociados a un enlace. Estas tres definiciones permiten caracterizar de forma genérica el consumo de energía de un determinado enlace para poder aplicar la metodología de reducción de consumo energético sobre redes cableadas independientemente de la tecnología concreta de los enlaces que las constituyen.

- Caracterización de las funciones de energía de los enlaces mediante la utilización de un *framework*[1] que permite la comparación de funciones de energía por pares. Con el objetivo de poder comparar el ahorro de energía conseguido en la red al utilizar tarjetas de línea cuyo comportamiento con respecto al consumo energético es heterogéneo, se ha propuesto un *framework* que permite realizar esta comparación de forma normalizada.

- Propuesta de metodología que permite, partiendo de las definiciones de las contribuciones anteriores, proporcionar una serie de recomendaciones destinadas a los fabricantes de tarjetas de línea para que puedan construir tarjetas que sean a la vez energéticamente eficientes y dispongan de un compromiso con respecto a la complejidad de su fabricación.

- Implementación de meta-heurísticas basadas en computación bio-inspirada para aplicar la propuesta anterior sobre topologías de red reales. Concretamente, se han utilizado los *Genetic Algorithms* (GA) y *Particle Swarm Optimization* (PSO) con el objetivo de aplicar la propuesta anteriormente mencionada y conseguir una reducción del consumo de energía de la red en base al diseño energéticamente eficiente de las tarjetas de línea. De esta forma, se puede realizar una comparación de los resultados obtenidos por ambas meta-heurísticas.

- Definición formal y cálculo de la función de energía equivalente de un LAG mediante técnicas de optimización. Partiendo de las definiciones de nivel de energía, distribución de energía y función de energía asociados a un enlace individual, se define el concepto de función de energía equivalente de un enlace agregado o LAG en función de los modelos de consumo de los enlaces individuales que lo componen y se procede a su cálculo mediante la utilización de programación lineal.

- Propuesta de metodología de agregación de enlaces con extensiones de eficiencia energética en la que los enlaces que constituyen los LAG pueden utilizar un número limitado de niveles de energía. Esta metodología trata de evaluar el impacto, en términos de ahorro energético, relacionado con el número de enlaces que constituyen un LAG y el tipo de tecnología de los propios enlaces.

- Comparación de los resultados obtenidos con los resultados de otros trabajos existentes en la literatura en los que se proponen métodos para la eficiencia energética en redes de comunicaciones. Se ha realizado una comparación de los

[1] Conjunto estandarizado de conceptos, prácticas y criterios para enfocar un tipo de problemática particular que sirve como referencia, para enfrentar y resolver nuevos problemas de índole similar.

resultados obtenidos por ambas metodologías, es decir, la metodología referente al diseño energéticamente eficiente de tarjetas de línea con un número limitado de niveles de energía y la relacionada con la mejora de la eficiencia energética en enlaces agregados, con los resultados de otros trabajos directamente relacionados.

1.3. Metodología

La metodología (del griego: -μετά = hacia, a lo largo- -οδός = camino- y -λογος = razón, estudio-) hace referencia al conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar una gama de objetivos que rigen una investigación científica, una exposición doctrinal o tareas que requieran habilidades, conocimientos o cuidados específicos. Alternativamente puede definirse como el estudio o elección de un método pertinente para un determinado objetivo.

La metodología depende de los postulados que el investigador considere válidos (de lo que considere objetivo de la ciencia y del conocimiento científico), porque será mediante la acción metodológica cómo recabe, ordene y analice la realidad estudiada. No existe una metodología perfecta, por lo que muchas veces concurren mezcladas en relación simbiótica. La validez otorgada al uso de uno u otro método vendrá dada por el paradigma científico en el que se sitúe. Uno de estos métodos es el denominado método científico.

1.3.1. El Método Científico

El método científico (del griego: -μετά = hacia, a lo largo- -οδός = camino-; y del latín *scientia* = conocimiento; camino hacia el conocimiento) es un método de investigación que se utiliza principalmente en la producción de conocimiento en ciencias. Para llamarse científico, un método de investigación debe basarse en la empírica y en la medición, y estar sujeto a los principios específicos de las pruebas de razonamiento.

Presenta diversas definiciones debido a la complejidad de una exactitud en su conceptualización: "conjunto de pasos fijados de antemano por una disciplina con el fin de alcanzar conocimientos válidos mediante instrumentos confiables", "secuencia estándar para formular y responder a una pregunta", "pauta que permite a los investigadores ir desde el punto A hasta el punto Z con la confianza de obtener un conocimiento válido" o, como indica el *Oxford English Dictionary*: "un método o procedimiento que ha caracterizado a la ciencia natural desde el siglo XVII, que consiste en la observación sistemática, medición y experimentación, y la formulación, análisis y modificación de las hipótesis". Así, el método científico es un conjunto de pasos que trata de protegernos de la subjetividad en el conocimiento.

El método científico está sustentado por dos pilares fundamentales: la reductibilidad y la falsabilidad. Como reductibilidad se entiende a la capacidad de repetir un determinado experimento en cualquier lugar y por cualquier persona. Este pilar se basa, esencialmente, en la comunicación y publicidad de los resultados obtenidos. El segundo pilar hace referencia a la falsabilidad, en la que toda proposición científica

tiene que ser susceptible de ser falsada (falsacionismo). Esto implica que se pueden diseñar experimentos que en el caso de dar resultados distintos a los predichos negarían la hipótesis puesta a prueba. Específicamente, la falsabilidad corresponde al *modus tollendo tollens*[2] del método hipotético deductivo experimental.

Para James B. Conant, no existe un método científico. El científico usa métodos definitorios, métodos clasificatorios, métodos estadísticos, métodos hipotético-deductivos, procedimientos de medición, etc. Y según esto, referirse al método científico es referirse a este conjunto de tácticas empleadas para constituir el conocimiento, sujetas al devenir histórico, y que eventualmente podrían ser otras en el futuro. Ello nos conduce a tratar de sistematizar las distintas ramas dentro del campo del método científico. Sin embargo, el mero uso de metodologías experimentales no es necesariamente sinónimo del uso del método científico, o su realización al 100 %. Por ello, Francis Bacon definió el método científico de la siguiente manera:

1. Observación: Observar consiste en aplicar atentamente los sentidos a un objeto o a un fenómeno, para estudiarlos tal como se presentan en realidad.

2. Inducción: La acción y efecto de extraer, a partir de determinadas observaciones o experiencias particulares, el principio particular de cada una de ellas.

3. Hipótesis: Planteamiento mediante la observación siguiendo las normas establecidas por el método científico.

4. Probar la hipótesis por experimentación.

5. Demostración o refutación (antítesis) de la hipótesis.

6. Tesis o teoría científica (conclusiones).

Así queda definido el método científico tal y como es normalmente entendido, es decir, la representación social dominante del mismo. Esta definición se corresponde sin embargo únicamente a la visión de la ciencia denominada positivismo en su versión más primitiva. Sin embargo, es evidente que la exigencia de la experimentación es imposible de aplicar a áreas de conocimiento como la vulcanología, la astronomía, la física teórica, etc. En tales casos, es suficiente la observación de los fenómenos producidos naturalmente, en los que el método científico se utiliza en el estudio (directos o indirectos) a partir de modelos más pequeños, o a partes de éste.

Por otro lado, existen ciencias no incluidas en las ciencias naturales, especialmente en el caso de las ciencias humanas y sociales, donde los fenómenos no sólo no se pueden repetir controlada y artificialmente (que es en lo que consiste un experimento), sino que son, por su esencia, irrepetibles. De tal forma que el concepto de método científico ha de ser repensado, acercándose más a una definición como la siguiente: "proceso de

[2]En lógica, el *modus tollendo tollens* (en latín, modo que negando niega) es una regla de inferencia que tiene la siguiente forma:
Si A entonces B
No B
Por lo tanto, no A

conocimiento caracterizado por el uso constante e irrestricto de la capacidad crítica de la razón, que busca establecer la explicación de un fenómeno ateniéndose a lo previamente conocido, resultando una explicación plenamente congruente con los datos de la observación".

Así, por método o proceso científico se entiende aquellas prácticas utilizadas y ratificadas por la comunidad científica como válidas a la hora de proceder con el fin de exponer y confirmar sus teorías. Las teorías científicas, destinadas a explicar de alguna manera los fenómenos que observamos, pueden apoyarse o no en experimentos que certifiquen su validez.

1.3.2. Metodología Utilizada en el Desarrollo de esta Tesis

El comienzo de esta tesis data de mediados del año 2010. En aquel momento, la conciencia global por la eficiencia energética comenzaba a destacar y la preocupación de la sociedad por la tendencia derivada del incremento en el consumo de energía era latente. Este problema invitaba a aunar esfuerzos que permitieran reducir el consumo de energía en distintos ámbitos de aplicación. Uno de ellos, tal y como se ha podido comprobar al comienzo de este capítulo, son las TIC en general y las redes de comunicaciones en particular.

Una vez identificado el problema y el ámbito de aplicación en el que se iba a trabajar en esta tesis, se definieron los objetivos descritos en la Sección 1.1. Estos objetivos surgen como consecuencia de trabajos previos desarrollados en el contexto de las líneas de investigación relacionadas con esta tesis.

Tras la identificación de los objetivos, se realiza un estudio de los trabajos relacionados, asegurando que se trata de un ámbito de investigación en auge e identificando la oportunidad de contribución.

A comienzos del año 2011 se concreta el problema que se pretende resolver, de forma que además de innovador sea de interés. Se identifican dos partes claramente diferenciadas que forman parte del trabajo de esta tesis, aunque la segunda parte se basa ampliamente en los conceptos definidos y utilizados en la primera.

Tras ello, se realiza un análisis en profundidad de los aspectos que pueden formar parte de la solución y se diseña una primera aproximación a la resolución del problema identificado en la primera parte de esta tesis. A mediados de 2011, una vez finalizado el diseño inicial y obtenidos los resultados tras la aplicación del mismo, se preparó un artículo para enviar a una conferencia internacional relacionada con el ámbito del trabajo con el objetivo de recopilar distintos puntos de vista por parte de los revisores del propio trabajo. Esta publicación, junto con el resto de publicaciones relacionadas con esta tesis aparecen en la Sección 1.5 de esta memoria.

Con la información extraída del *feedback* obtenido, se refina la propuesta y, a lo largo de la primera mitad de 2012 se procede a su desarrollo mediante la utilización de una serie de técnicas, a su aplicación sobre situaciones realistas y a la obtención y análisis de resultados. Una vez que esta fase finaliza, se preparan dos artículos a enviar a revistas internacionales con alto índice de impacto. Por un lado, se envía un artículo a una revista específica de telecomunicaciones en la que se describe la propuesta y se analizan los resultados desde el punto de vista que afecta a las redes de comunicaciones

mientras que para el otro artículo se pone el foco en el método utilizado para resolver el problema y obtener los resultados anteriormente mencionados.

Con la aceptación de ambos artículos se da por terminada la primera parte de esta tesis y se procede a analizar los objetivos correspondientes a la segunda parte. Durante la segunda mitad de 2012 y la primera mitad de 2013 se trabaja en el análisis y el diseño de esta segunda propuesta en la que se utilizan los conceptos definidos y utilizados en la propuesta anterior. Una vez finalizado el diseño de la misma, a lo largo de la segunda mitad de 2013 se procede a su validación y a la evaluación de su bondad con el análisis de los resultados obtenidos. Del mismo modo que en etapas anteriores, se prepara un artículo para ser enviado a una revista con alto índice de impacto.

Por último, durante el primer trimestre de 2014 se procede a la elaboración de esta memoria de tesis. Con las últimas aportaciones de la fase anterior finaliza la elaboración de la memoria de tesis para su posterior depósito y, en su caso, defensa ante el tribunal correspondiente.

1.4. Estructura de esta Tesis

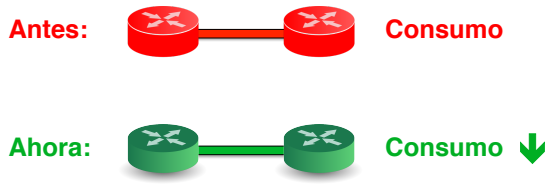
Para enfocar la estructura de esta tesis nos basaremos en la clasificación establecida en [12] que permite categorizar los métodos que tratan de ahorrar energía en las redes de comunicaciones cableadas. Esta clasificación establece las tres siguientes áreas que vienen representadas en la Figura 1.2:

Diseño de sistemas energéticamente eficientes. El principal objetivo de este área consiste en proponer diseños energéticamente eficientes para los componentes hardware que constituyen la red de modo que se optimice su consumo de energía.

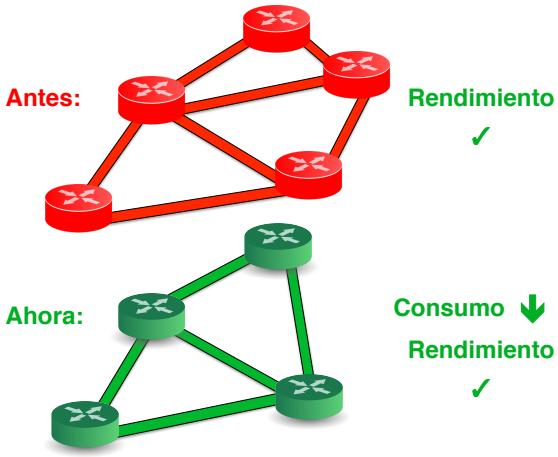
Diseño de red energéticamente eficiente. Esta segunda área trata de establecer diseños de red que permitan reducir el consumo de energía de la misma en base a la utilización de sistemas energéticamente eficientes (área anterior) asegurando que el rendimiento de la red no se vea afectado.

Diseño de protocolos energéticamente eficientes. En este caso se pretenden realizar diseños de nuevos protocolos de red en los que se incluyan características de eficiencia energética mediante la posibilidad de actuar sobre los modos de operación de los componentes hardware que constituyen la red (pasar a modo dormido, adaptar la velocidad de operación, etc.).

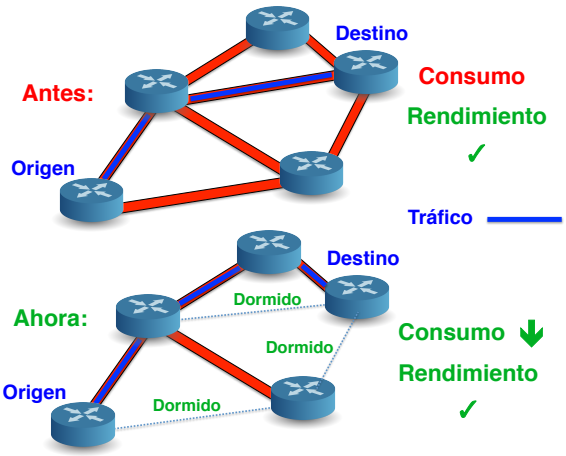
Una vez conocidas las diferentes áreas que engloban los métodos que tratan de mejorar la eficiencia energética en las redes cableadas, se pasa a describir la estructura de esta tesis en la que se han identificado una serie de partes que engloban un conjunto de capítulos. A continuación se explican brevemente los contenidos incluidos en cada uno de los capítulos:



(a) Diseño de sistemas energéticamente eficientes.



(b) Diseño de red energéticamente eficiente.



(c) Diseño de protocolos energéticamente eficientes.

Figura 1.2: Áreas de clasificación de los métodos de eficiencia energética en redes cableadas.

Capítulo 1: Introducción, Objetivos, Contribuciones, Metodología y Estructura de esta Tesis. En este capítulo introductorio se presenta la motivación que origina este trabajo de investigación, los objetivos identificados, las contribuciones realizadas, la metodología que se ha seguido para su consecución, la estructura de esta memoria y las publicaciones que se han obtenido a lo largo del período que engloba la realización de esta tesis.

Parte I: Diseño de Tarjetas de Línea Energéticamente Eficientes.

Capítulo 2: Eficiencia Energética en las Redes de Comunicaciones. Este capítulo analiza el trabajo existente en la literatura centrado en la búsqueda de mecanismos que permitan conseguir un significativo ahorro de energía en las redes de comunicaciones sin que el rendimiento de la red se vea afectado.

Capítulo 3: Configuración de Red para el Ahorro de Energía. Partiendo del conocimiento previo extraído de los trabajos existentes en la literatura relacionados con la eficiencia energética en redes cableadas, se identifica, define y formula el problema a resolver. Este problema consiste en minimizar el consumo de energía de una infraestructura de red en base a la propuesta de un diseño de tarjetas de línea energéticamente eficientes.

Capítulo 4: Aplicación de Algoritmos Bio-inspirados para el Ahorro de Energía. En este capítulo se describen los métodos basados en la computación bio-inspirada que se han utilizado y cómo se han aplicado para resolver el problema descrito en el capítulo anterior.

Capítulo 5: Resultados Experimentales. Para finalizar esta parte, se analizan y discuten los resultados experimentales obtenidos tras la ejecución de los métodos anteriormente descritos.

Parte II: Diseño de Grupos de Agregación de Enlaces Energéticamente Eficientes.

Capítulo 6: Grupos de Agregación de Enlaces: Protocolos y Eficiencia Energética. En este capítulo se realiza una revisión literaria tanto de los protocolos de agregación de enlaces como de los mecanismos propuestos para mejorar la eficiencia energética en enlaces agregados.

Capítulo 7: Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces. Una vez conocido el estado del arte relacionado con la pretensión de reducir el consumo de energía en enlaces agregados, se procede a definir y formular el problema correspondiente a la segunda parte de esta tesis. Concretamente, se propone una metodología de agregación de enlaces con extensiones de eficiencia energética cuyo núcleo corresponde a la definición y cálculo, mediante técnicas de optimización, de la función de energía equivalente de un LAG.

Capítulo 8: Resultados Experimentales. Los resultados obtenidos al aplicar la propuesta del capítulo anterior se analizan en este capítulo para dar lugar a una serie de conclusiones.

Parte III: Conclusiones y Trabajos Futuros.

Capítulo 9: Conclusiones Finales. En este capítulo se reflejan las principales contribuciones de esta tesis y se incluye, además, un resumen que permite esbozar sus conclusiones.

Capítulo 10: Trabajos Futuros. Por último se identifica el posible trabajo futuro con el que continuar la investigación inciada en esta tesis.

1.5. Publicaciones Obtenidas

Como resultado del trabajo de investigación llevado a cabo a lo largo del proceso de realización de esta tesis, se han logrado un total de 6 publicaciones directamente relacionadas con el tema de investigación que actúa como núcleo de la misma. Concretamente se han obtenido 2 publicaciones en revistas internacionales con alto índice de impacto, 3 publicaciones en conferencias (2 nacionales y 1 internacional) y 1 capítulo de libro.

A estas publicaciones hay que añadir, además, un total de 7 publicaciones en diferentes ámbitos relacionados con las redes de comunicaciones. Por tanto, se han obtenido un total de 13 publicaciones científicas a lo largo del período que incumbe a la realización de esta tesis.

1.5.1. Publicaciones Relacionadas con esta Tesis

Las publicaciones derivadas de esta tesis aseguran una cierta calidad del trabajo de investigación llevado a cabo en estos últimos cuatro años. Todos los trabajos han sido publicados en conferencias tanto internacionales como nacionales con procesos de revisión por pares, así como en revistas internacionales con procesos de revisión por pares indexadas por el *Institute for Scientific Information* (ISI) en el *Journal Citation Reports* (JCR). A continuación, se presenta una lista de las publicaciones directamente relacionadas con el tema principal de esta tesis:

Un total de 2 publicaciones en revistas internacionales indexadas por el ISI en el JCR:

1. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Using Bio-inspired Algorithms for Energy Levels Assessment in Energy Efficient Wired Communication Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 37:171-185, 2014. ISSN: 1084-8045 (Factor de Impacto = 1,467 en 2012, primer cuartil - Q1).

2. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. ELEE: Energy Levels-Energy Efficiency Tradeoff in Wired Communication Networks. *IEEE Communications Letters*, 17(1):166-168, 2013. ISSN: 1089-7798 (Factor de Impacto = 1,160 en 2012, segundo cuartil - Q2).

Un total de 3 publicaciones en conferencias nacionales (2) e internacionales (1):

1. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Discretización de la Adaptación de Rate para la Mejora de la Eficiencia Energética en Redes Cableadas. *XI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2013)*, pp. 35-42. Granada (España). Octubre 2013. ISBN: 978-84-616-5597-7.

2. A. Bravo-Vicente, J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Análisis del Impacto de la Configuración de un Dispositivo 802.11g sobre su Consumo Energético. *XI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2013)*, pp. 43-48. Granada (España). Octubre 2013. ISBN: 978-84-616-5597-7.

3. C. Phillips, A. Gazo-Cervero, J. Galán-Jiménez y X. Chen. Pro-active Energy Management for Wide Area Networks. *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, pp. 317-322. Pekín (China). Octubre 2011. ISBN: 9781618399267.

Un total de 1 publicación en capítulos de libro:

1. A. Gazo-Cervero, M. Chincoli, L. Dittmann, A. Fischer, A.E. Garcia, J. Galán-Jiménez, L. Lefevre, H. de Meer, T. Monteil, P. Monti, A.C. Orgerie, L.F. Pau, C. Phillips, S. Ricciardi, R. Sharrock, P. Stolf, T. Trinh y L. Valcarenghi. Green Wired Networks. Capítulo del libro *Large-scale Distributed Systems and Energy Efficiency: A holistic view*. En proceso de publicación.

1.5.2. Otras Publicaciones

Por otro lado, a lo largo del período de realización de esta tesis, se han obtenido adicionalmente un total de 7 publicaciones procedentes de trabajos de investigación iniciados previamente o como fruto de colaboraciones con otros investigadores.

Un total de 3 publicaciones en revistas internacionales:

1. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. AMFVoNet: An Active Messaging Framework for Volatile Networking. *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications*, 2(5):607-614, 2012. ISSN: 2250-3501.

2. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Overview and Challenges of Overlay Networks: A Survey. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, 2(1):19-37, 2011. ISSN: 0976-2760.

3. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Overlay Networks: Overview, Applications and Challenges. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 10(12):40-49, 2010. ISSN: 1738-7906.

Un total de 4 publicaciones en conferencias internacionales:

1. J. Galán-Jiménez y A. Gazo-Cervero. Routing Characterization in Volatile Connectivity Environments. *6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS 2012)*. pp. 1-8. Valencia (España). Mayo 2012. ISBN: 978-1-4503-1012- 3.

2. J. Galán-Jiménez, A. Gazo-Cervero y J.L. González-Sánchez. Exploiting the Use of Mobile Technologies for Chronic Patients Home Distance Monitoring. *6th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2011)*. pp. 215-220. Chaves (Portugal). Junio 2011. ISBN: 978-989-96247-4-0.

3. J. Galán-Jiménez, A. Gazo-Cervero y J.L. González-Sánchez. Experiences in Remote Monitoring of Patients with Chronic Diseases using Mobile Technologies. *International Conference on e-Health Services and Technologies (ICEHST 2010)*, pp. 93-98. Atenas (Grecia), Julio 2010. ISBN: 978-989-8425-15-7.

4. J. Galán-Jiménez, A. Gazo-Cervero, J.L. González-Sánchez y J. Carmona-Murillo. Application of Mobile Technologies and Study of Interferences in Remote Monitoring of Patients with Chronic Diseases. *IADIS International Conference e-Health 2010*. pp. 77-84. Friburgo (Alemania). Julio 2010. ISBN: 978-972-8939-16-8.

Parte I

Diseño de Tarjetas de Línea Energéticamente Eficientes

Capítulo 2

Eficiencia Energética en las Redes de Comunicaciones

> "La energía y la persistencia conquistan todas las cosas."
>
> Benjamin Franklin

Tradicionalmente, los esfuerzos realizados en el diseño de las redes de comunicaciones se han centrado en el uso eficiente de los recursos necesarios. Sin embargo, esta eficiencia se ha definido en términos de maximización de *throughput*, minimización de retardos y otros objetivos relacionados prioritariamente con la maximización del rendimiento ofrecido.

Si bien es cierto que la eficiencia energética se ha convertido en un tema de interés principal en el diseño de las comunicaciones inalámbricas desde la aparición de los dispositivos móviles debido a la vida limitada de sus baterías, la conciencia por el ahorro de energía en entornos cableados se ha convertido en un tema de investigación muy reciente. Concretamente, los esfuerzos se están derivando hacia la búsqueda de un compromiso donde se consiga una reducción del consumo de energía de la red sin que ello repercuta negativamente sobre el rendimiento y las necesidades de los usuarios.

Este capítulo analiza en profundidad el trabajo existente en la literatura centrado en la búsqueda de mecanismos que permitan conseguir un significativo ahorro de energía en las redes de comunicaciones sin que el rendimiento de la red se vea afectado.

Inicialmente se introduce un breve resumen de la historia de este campo de investigación, donde se hace hincapié en el origen y la evolución de las técnicas de ahorro de energía a lo largo de los últimos años. A continuación se especializa en el ámbito de las redes inalámbricas, germen de la conciencia por la reducción del consumo energético debido a factores críticos como la dependencia de baterías por parte de los dispositivos pertenecientes a este tipo de redes. Seguidamente, se pasa al campo de las redes cableadas, donde se intenta aprovechar la experiencia conseguida en redes inalámbricas y se hace hincapié en las técnicas de apagado / encendido de enlaces y adaptación de la velocidad. Finalmente, se desglosan las oportunidades existentes para la mejora de la eficiencia energética en el ámbito de las redes ópticas.

2.1. Historia y Evolución de las Técnicas de Eficiencia Energética en las Redes de Comunicaciones

La conciencia por el ahorro energético en las TIC se inicia en el diseño de las comunicaciones inalámbricas, con un punto de partida ligado a la aparición de los dispositivos móviles [13]. Los dispositivos móviles presentan capacidades de procesamiento limitadas y funcionan mediante baterías, lo que supone un gran condicionamiento referente a la cantidad de consumo de energía que pueden soportar.

Para ello, la mayoría de dispositivos móviles y sensores inalámbricos poseen un pequeño ciclo de trabajo en el que se suceden cortos periodos de tiempo a un rendimiento elevado y posteriores intervalos de inactividad continuada. De ahí que el consumo de energía de las transmisiones de datos a través de las redes inalámbricas sea menor que el de las transmisiones de datos a través de redes cableadas [14].

Sin embargo, la actividad investigadora relacionada con el ahorro energético en redes cableadas es muy reciente. Además, los mecanismos existentes para la reducción del consumo energético en redes inalámbricas no se pueden extrapolar de manera sencilla para su aplicación sobre las redes cableadas. Esto se debe a que la mayoría de los dispositivos pertecientes a las redes cableadas suelen operar en un modo de actividad continuada, pasando en tal caso a un estado de completo reposo durante intervalos de tiempo muy cortos. Este modo de operación difiere del modo de operación característico de los dispositivos que constituyen las redes inalámbricas.

Al igual que en las redes cableadas, el concepto de red óptica energéticamente eficiente es muy reciente. La mejora del rendimiento en este tipo de redes durante la última década ha derivado en la búsqueda de mecanismos que permitan reducir su consumo de energía teniendo en cuenta sus caracterísitcas clave, como son la alta velocidad y la gran capacidad [15].

2.2. Eficiencia Energética en Redes Inalámbricas

En las redes inalámbricas, los nodos consumen energía al procesar, transmitir y recibir mensajes. Aunque esta energía es necesaria para el correcto funcionamiento de este tipo de redes, existe una cantidad de energía adicional que se despercidia en una serie de estados que no son de utilidad desde el punto de vista operativo:

- Un nodo no conoce cuándo va a recibir un mensaje, de forma que se encuentra continuamente escuchando al medio en estado de reposo o *idle*. En [16] se comprueba que la energía consumida en este estado es similar a la utilizada en estado de recepción.

- Cuando un nodo envía un paquete al siguiente salto, el resto de vecinos del nodo origen reciben este paquete aunque no sean los destinatarios del mismo debido a la propia naturaleza del medio inalámbrico. En este caso, se desperdicia energía en estos nodos que reciben la información de manera innecesaria.

- En el caso del acceso al medio *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), se desperdicia energía en la transmisión y en la recepción de tramas cuando se producen colisiones.

Por tanto, la naturaleza intrínseca de los nodos que requieren de un uso eficiente de la energía para su funcionamiento hace que sea necesaria la utilización de estrategias energéticamente eficientes. Estas estrategias tienen como objetivo minimizar la energía desperdiciada de los casos expuestos anteriormente y maximizar el ahorro de energía de los estados necesarios para el correcto envío y recepción de la información. A continuación se presenta una clasificación de este tipo de estrategias:

Encaminamiento energéticamente eficiente. El objetivo consiste en minimizar la energía consumida por la transmisión extremo a extremo de un paquete al evitar nodos con una energía residual baja de forma que se reduzca el número de transmisiones erróneas.

Planificación de la actividad del nodo. La idea radica en alternar los estados del nodo entre dormido y activo para minimizar el consumo de energía al mismo tiempo que se garantiza la funcionalidad de la red y de las aplicaciones.

Ajuste de la potencia de transmisión del nodo. Esta estrategia trata de encontrar la potencia de transmisión óptima del nodo de modo que se minimice el consumo de energía y se mantenga la conectividad de la red.

Reducción del volumen de información transmitida. A su vez, se puede descomponer en las siguientes estrategias:

- Agregación de la información.
- Reducción de la frecuencia de refresco de la información de la red según se incrementa la distancia.
- Transmisión de la información únicamente a los nodos que están interesados.
- Optimización los mensajes de difusión en la red.

A continuación se explica, de forma resumida, cada una de estas cuatro categorías de estrategias para la mejora de la eficiencia energética en redes inalámbricas.

2.2.1. Encaminamiento Energéticamente Eficiente

Existe una gran cantidad de protocolos de encaminamiento diseñados para conseguir ahorrar energía en las redes inalámbricas. El objetivo principal de todos ellos consiste en minimizar la energía consumida en los períodos de actividad, en los períodos de inactividad o en ambos casos.

Algunos de estos protocolos realizan asunciones acerca del modelo de aplicación y optimizan el tráfico mediante el envío de solicitudes a ciertos nodos en base a una serie de intereses o atributos de los datos [17, 18].

Otros protocolos crean grupos de nodos para reducir el número de transmisiones, de forma que se minimiza el tráfico de la red y se mejora la escalabilidad [19, 20].

La información basada en la localización es utilizada también por otro tipo de protocolos de encaminamiento para reducir la difusión de solicitudes, limitándola al ámbito de una región determinada [21, 22].

Además, existen una serie de protocolos que utilizan encaminamiento multicamino para balancear el consumo de energía a través de los nodos de la red [23, 24, 25] y otros que seleccionan diferentes criterios en los que el consumo de energía actúa como métrica para seleccionar las distintas rutas [26, 27, 28].

2.2.2. Planificación de la Actividad del Nodo

Esta categoría se apoya en el hecho de que la energía consumida por un dispositivo en estado dormido es menor que la energía consumida en los estados de transmisión, recepción o reposo (*idle*) [16]. La idea básica que sustenta esta categoría es, por tanto, permitir que el dispositivo se duerma cuando no reciba ni transmita datos (técnica *Sleeping*) de forma que se pueda ahorrar energía. Sin embargo, es necesario realizar una planificación de la actividad de los nodos para prevenir particiones en la red y la pérdida de mensajes. En esta categoría existen dos tipos de variantes:

Soluciones independientes del acceso al medio. En este tipo de soluciones, el número de nodos desplegados en la red es superior al número óptimo de nodos, es decir, existe redundancia. El objetivo consiste en agrupar una serie de nodos de modo que solamente los nodos que pertenecen a este conjunto están activos mientras que el resto de nodos de la red pueden dormirse. Como es lógico, ni la conectividad de la red ni la funcionalidad de las aplicaciones deben verse afectadas [29, 30, 31].

Soluciones dependientes del acceso al medio. En este caso, cualquier nodo de la red se puede dormir siempre que no esté transmitiendo o recibiendo datos. En función del acceso al medio, se han realizado propuestas para CSMA/CA [32], *Time Division Multiple Access* (TDMA) [33] y soluciones híbridas que engloban ambos mecanismos [34].

2.2.3. Ajuste de la Potencia de Transmisión del Nodo

Los algoritmos de control de topología se han propuesto para reducir el consumo de energía y mejorar la capacidad de la red mientras se mantiene la conectividad de la misma. La idea clave es la siguiente: en lugar de transmitir a la máxima potencia, cada nodo ajusta su potencia de transmisión para reducir la energía disipada, con lo que se puede crear una nueva topología de red.

Este tipo de soluciones se basan generalmente en uno de los siguientes algoritmos que minimizan el número de arcos del grafo de red mientras aseguran la conectividad de la misma: *Relative Neighborhood Graph* (RNG) [35], *Minimum Spanning Tree* (MST) [36] y *Local Minimum Spanning Tree* (LMST) [37]. Los objetivos perseguidos por los algoritmos de control de topología son los siguientes:

- Reducir la energía consumida.
- Reducir las interferencias.
- Mejorar la reutilización del espacio y mitigar la contención.

En [38, 39, 40] se presentan una serie de soluciones en las que se pretende minimizar la energía disipada en las transmisiones y, al mismo tiempo, mantener conectada la topología de red.

2.2.4. Reducción del Volumen de Información Transmitida

La última estrategia para la mejora de la eficiencia energética en redes inalámbricas consiste en agregar información, reducir transmisiones innecesarias e ineficientes o ajustar la frecuencia de refresco de los mensajes de control.

La agregación de la información se utiliza frecuentemente en aplicaciones de recolección de información en las que, por ejemplo, un nodo envía a su padre un único mensaje que contiene los valores transmitidos por sus hijos [41, 20].

La utilización de la técnica de inundación clásica en redes inalámbricas se traduce en un gran número de transmisiones redundantes. Para optimizar este tipo de técnicas y reducir el número de transmisiones innecesarias se han propuesto una serie de trabajos en los que se limita el número de retransmisiones de los mensajes de difusión [42, 43].

La energía consumida también se puede reducir al decrementar la frecuencia con la que se realiza el refresco de la información en la red. El trabajo de [44] se aprovecha de una analogía basada en la naturaleza, en la que los objetos que se ven de una forma más clara son los que se encuentran más cerca, mientras que la nitidez se va perdiendo a medida que la distancia aumenta. Para ello, proponen un protocolo en el que la información asociada con los nodos más lejanos se refresca de manera menos frecuente que la correspondiente a los nodos más cercanos. Este principio se ha aplicado también a extensiones escalables de *Optimized Link State Routing* (OLSR) [45].

2.2.5. Posibilidad de Aplicación de estas Estrategias sobre Redes Cableadas

Ya se han comentado las restricciones que presentan los dispositivos móviles en relación a la capacidad de procesamiento y a la vida limitada de sus baterías. De ahí que se diseñen con un corto ciclo de trabajo en el que se suceden cortos períodos de tiempo en los que el rendimiento es intenso seguidos de largos intervalos en reposo.

En las redes cableadas, la mayoría de los dispositivos que forman parte de las infraestructuras de red suelen operar en un modo de actividad continuada y es únicamente en intervalos de tiempo muy cortos cuando pueden encontrarse en un estado de completo reposo. Por ello, la mayoría de la investigación en eficiencia energética sobre redes inalámbricas no es fácilmente extrapolable al ámbito cableado [46].

Además, las comunicaciones inalámbricas son propensas a originar colisiones e interferencias debido a la naturaleza del medio inalámbrico. Por su parte, en las redes cableadas los enlaces físicos generalmente conectan dos dispositivos concretos y están libres de colisiones.

Sin embargo, es posible realizar una adaptación de las técnicas utilizadas en el ámbito inalámbrico para conseguir reducir el consumo de energía en redes cableadas. Un claro ejemplo de esta situación lo representa el escalado de voltaje dinámico o *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) [47, 48], que surgió debido a la necesidad de reducir el consumo de energía de sistemas con batería en entornos inalámbricos y hoy en día se utiliza ampliamente en una gran cantidad de arquitecturas de computadores fuera de ese ámbito.

Esta técnica presenta similitudes con la técnica de adaptación de velocidad para redes cableadas. El hecho de trabajar a una menor velocidad debería implicar una menor complejidad en la modulación de la capa física del estándar *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11, lo que derivaría en un menor consumo energético [49].

Existen otras similitudes entre ambos entornos de red para la mejora de la eficiencia energética. En el caso de las redes móviles, existen limitaciones en el número de usuarios a los que puede dar soporte a una estación base. En áreas urbanas en las que existe una gran densidad de población, se procede al dimensionado de la red mediante un conjunto de estaciones base de corto alcance que incrementan el número de comunicaciones simultáneas. Sin embargo, en periodos en los que la carga de la red es baja, como puede ser en horario nocturno, se podrían desactivar (dormir) parte de estas estaciones base para ahorrar energía e incrementar el rango de transmisión de las restantes para preservar la cobertura [50].

Esta técnica, en la que ciertos componentes de la red pasan a dormir cuando existen posibilidades para ello debido a un decremento de la carga de la red, se puede extrapolar también al ámbito de las redes cableadas tal y como se comprobará en el siguiente capítulo.

Por ello, si bien las redes inalámbricas fueron el origen del estudio de la eficiencia energética en redes de comunicaciones, a continuación se explica una aproximación más reciente que persigue la reducción del consumo de energía en las redes cableadas.

2.3. Eficiencia Energética en Redes Cableadas

En el ámbito de las redes cableadas, se estima que cada año se venden alrededor de 100 millones de interfaces Ethernet [51]. El total estimado en funcionamiento podría ser alrededor de 30 veces superior (3.000 millones) [52].

Este gran volumen de dispositivos hace que un pequeño ahorro en cada uno de ellos de forma individual pueda contribuir a conseguir un gran ahorro global. El consumo energético del total de interfaces sería del orden de decenas de TWh cada año, lo que podría suponer más del 10 % del total de la energía consumida por las TIC [53]. Como ejemplo, sólo en los Estados Unidos de América (EEUU) el consumo estimado en conmutadores Ethernet en domicilios o pequeñas y medianas empresas

alcanza los 7,9 TWh cada año en base al número de dispositivos [54]. Por tanto, el ejemplo de la tecnología Ethernet puede convertirse en un claro campo de estudio en el que se puedan conseguir ahorros de energía significativos debido a su amplia implantación. Una de las áreas donde se puede hacer especial hincapié es en el diseño y funcionamiento de la capa física (PHY), ya que en Ethernet, por lo general, tanto el transmisor como el receptor operan continuamente incluso cuando no hay datos que transmitir para mantenerse alineados, sin tener en cuenta el flujo de datos que realmente se está intercambiando.

2.3.1. El Estándar IEEE 802.3az - *Energy Efficient Ethernet*

La principal iniciativa existente actualmente para la mejora de la eficiencia energética de los dispositivos Ethernet es el estándar IEEE 802.3az, conocido como *Energy Efficient Ethernet* (EEE) [55].

El proceso completo de desarrollo del estándar se encuentra resumido en [52]. En Julio de 2005 se presentó un tutorial al IEEE 802.3 *Working Group* que mencionó por primera vez la idea de crear un nuevo estándar específico cuya función sería la de mejorar la eficiencia energética de Ethernet. Después de una serie de reuniones y presentaciones, el IEEE 802.3 *Working Group* comenzó un nuevo *Call for Interest* para el IEEE, que tuvo una gran acogida durante el IEEE 802.3 *Working Group* de Noviembre de 2006.

Seguidamente, se estableció un grupo de estudio de EEE que analizó la posibilidad de iniciar un proyecto para crear el estándar, de modo que en Septiembre de 2007 se formó el P802.3az *Task Force*. En aquel momento existían dos tecnologías distintas por considerar: *Adaptive Link Rate* (ALR) y *Low Power Idle* (LPI). El *Task Force* finalmente eligió LPI y finalizó el primer *draft* en Octubre de 2008, para aprobar el estándar IEEE 802.3az final en Septiembre de 2010.

La idea en la que se sustenta este estándar se basa en que un dispositivo debería consumir energía únicamente cuando está transmitiendo o recibiendo datos, en lugar de tener un consumo constante al mantener el enlace activo a pesar de que no se esté haciendo uso del mismo.

Se asegura la compatibilidad hacia atrás, de forma que no se permite ahorrar energía en enlaces en los que uno de los extremos disponga de una interfaz Ethernet no compatible con EEE. Se espera que con la progresiva implantación de nuevos equipos con interfaces compatibles con este estándar se puedan producir ahorros de energía cada vez más significativos [56].

Una interfaz de red que implemente EEE puede señalizar intervalos de tiempo durante los cuales no se transmiten datos, de forma que el receptor de la comunicación puede hacer que su interfaz pase a modo dormido, es decir, a un modo de bajo consumo de energía.

Para ello, EEE introduce el concepto de LPI, utilizado en lugar del envío continuo de señales *IDLE* cuando no existe tráfico a enviar. LPI define una serie de períodos de tiempo que describen los distintos intervalos correspondientes a la señalización del protocolo:

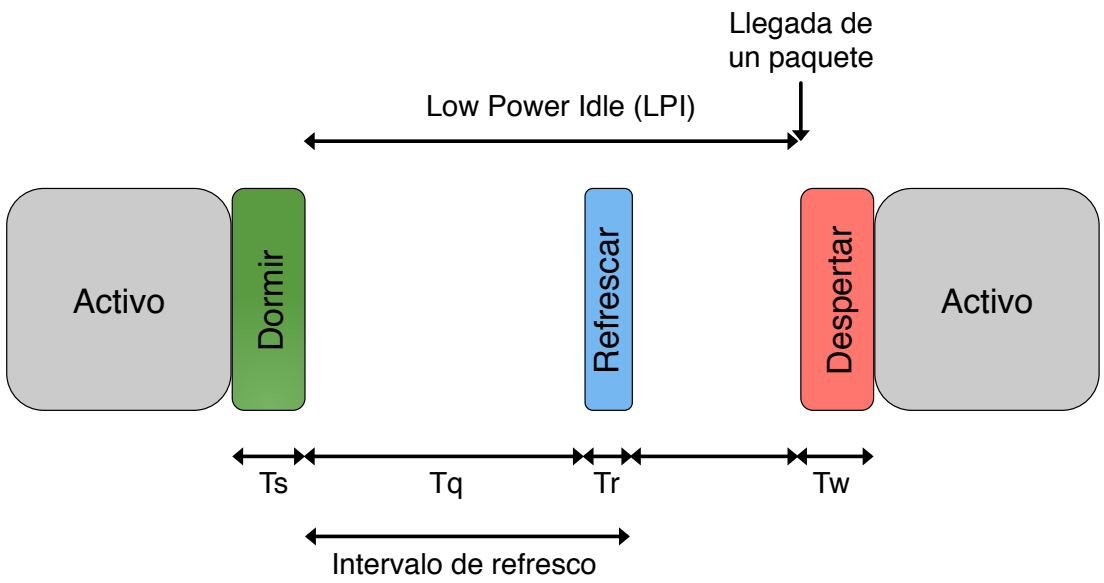


Figura 2.1: Transiciones de los diferentes modos de operación en *Energy Efficient Ethernet*.

- T_s: *Time to sleep*. Intervalo de tiempo durante el cual el enlace pasa al modo de baja energía tras el envío de una señal LPI.
- T_q: *Time quiescent*. Intervalo de tiempo durante el cual el enlace permanece en estado LPI. El enlace se mantiene en este estado durante cada uno de los intervalos de refresco (T_r). Normalmente, se trata de un largo período de tiempo durante el cual no se transmite ninguna señal.
- T_r: *Time refresh*. Intervalo de tiempo durante el cual se transmite una señal para refrescar el estado del receptor y realizar una actualización con las condiciones del momento. Dependiendo de la tecnología, el intervalo de refresco tiene una duración diferente. Por tanto, tras el intervalo de refresco se envía una señal de refresco (de duración T_r) que permite detectar los cambios en el enlace (paso a modo activo, desconectado, etc.).
- T_w: *Time to wake*. Intervalo de tiempo durante el cual el enlace pasa a modo activo tras la llegada de un paquete. Para volver a dejar el enlace activo, el transmisor envía una señal normal *IDLE*, lo que despierta el lado del receptor y permite que éste reciba datos de nuevo. El intervalo de tiempo hasta que el receptor está en condiciones de poder recibir datos es T_w. El transmisor espera dicho tiempo para empezar a transmitir, tiempo que normalmente coincide con lo que tarda un paquete de tamaño máximo para la velocidad del enlace en cuestión.

La Figura 2.1 muestra el funcionamiento de LPI, incluyendo los diferentes intervalos de tiempo descritos anteriormente.

El ahorro de energía que proporciona EEE sobre un determinado enlace depende de la cantidad de tiempo que éste se encuentra en modo LPI. Sin embargo, durante el tiempo empleado en realizar las transiciones a modo activo (T_w) y a modo LPI (T_s) se produce un significativo consumo de energía debido a que los tiempos de transición son elevados en comparación con los tiempos de transmisión de tramas [57, 58, 59].

La Tabla 2.1 muestra los tiempos de transición para diferentes velocidades de operación junto con los tiempos de transmisión para paquetes de 64 Bytes y 1.518 Bytes [59]. De esta forma, se puede comparar cuáles son las diferencias entre los tiempos de transición y los tiempos de transmisión de tramas.

Para poder medir la eficiencia de EEE, se introduce el concepto de eficiencia de trama individual o *Single Frame efficiency* (SFe), que calcula la eficiencia de EEE para la transmisión de una única trama. Cuando se desea transmitir una trama, el enlace se tiene que activar para realizar su envío y desactivar una vez que la trama ha sido enviada. Por tanto, para un tiempo de transmisión de trama genérico, T_f, el enlace está o activo o en transiciones $T_w + T_s + T_f$. La eficiencia de trama individual, SFe, se define, por tanto, como el ratio entre ambos tiempos:

$$SFe = \frac{T_f}{T_w + T_s + T_f} \tag{2.1}$$

En la Tabla 2.1 se puede observar que los valores de SFe son relativamente bajos, lo que lleva a los investigadores a aunar esfuerzos para desarrollar nuevos mecanismos que mejoren el rendimiento de EEE [60].

Tabla 2.1: Cálculo de la eficiencia de trama individual (SFe) para diferentes velocidades de operación.

Estándar Ethernet	**Min T_w (μs)**	**Min T_s (μs)**	**Min T_f (μs) (tr. 1518 B)**	**SFe (%) (tr. 1518 B)**	**Min T_f (μs) (tr. 64 B)**	**SFe (%) (tr. 64 B)**
100Base-TX	30,5	200	120	34,2 %	5,1	2,2 %
1000Base-T	16,5	182	12	5,7 %	0,5	0,3 %
10GBase-T	4,48	2,88	1,2	14 %	0,05	0,7 %

2.3.2. Adaptación de la Velocidad de los Enlaces para el Ahorro de Energía

Trabajos como los de [6, 61] indican que el consumo energético de dispositivos de red como las tarjetas de línea se puede reducir al disminuir la velocidad a la que éstas trabajan (técnica *Rate Adaptation* [62]).

Esto se debe a que un dispositivo que trabaja a una menor frecuencia puede reducir su consumo energético por dos razones. Primeramente, un funcionamiento más lento hace que se consigan ahorros sustanciales. La segunda razón hace referencia al hecho en el que trabajar a una menor frecuencia también permite el uso de DVS [47, 48], que permite reducir el voltaje de operación y, en consecuencia, la energía consumida por los dispositivos de red.

Los autores de [6] tratan de buscar una zona de decisión con respecto a qué técnica basada en hardware (*Sleeping* o *Rate Adaptation*) utilizar en función de las características concretas de la red. Para ello, investigan la relación entre la velocidad de operación de los enlaces y su consumo energético para diferentes distribuciones de velocidades, entre las que se encuentran una distribución uniforme de velocidades y una distribución exponencial (10 Mbps, 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps). Esta última aproximación la estudian al considerar que actualmente existe tecnología hardware para dar soporte a dichas velocidades (tecnología Ethernet).

De los resultados se extrae que el tipo de distribución más apropiada para conseguir una mayor reducción en la velocidad de operación de los enlaces y, por consiguiente, un menor consumo energético, es una distribución de tipo uniforme. Además, indican que tanto *Sleeping* como *Rate Adaptation* son dos técnicas eficaces dependiendo principalmente del perfil energético del equipamiento de la red y de la utilización de la misma.

En un paso más, los autores de [63] realizan un estudio basado en [6] en el que comparan el ahorro energético en redes cableadas tras aplicar las técnicas *Sleeping* y *Rate Adaptation* en función del consumo base de los componentes de la red a nivel individual, es decir, en base a la cantidad de energía que es consumida por un elemento de la red sin tener en cuenta su velocidad de operación.

Mediante simulaciones sobre topologías de distinto tamaño y diferentes patrones de tráfico basados en [64] llegan a la conclusión de que para el caso en que el consumo base de los elementos de la red sea alto, interesa mantener el menor número de enlaces activos (*Sleeping*). Por el contrario, si el consumo base de los elementos de la red presenta valores pequeños, la técnica *Rate Adaptation* es la más apropiada. En este segundo caso, puesto que los autores se basan en los resultados de [6], también asumen y utilizan una distribución de velocidades uniforme en sus experimentos.

Por otro lado, en [12] se realizan diversos experimentos para medir el consumo energético de dos routers Cisco diferentes: GSR 12008 y 7507; ambos con sus sistemas base (chasis más procesador del *router*) y tarjetas de línea. De los resultados obtenidos al aplicar tráfico sintético generado como en [65], se puede extraer que en este caso la función de energía que describe el consumo de las tarjetas de línea de dichos *routers* toma valores discretos y, al igual que en la Figura 2.2, se puede asumir su adaptación a una función de tipo logarítmico.

En [61], a su vez, se utiliza un Intel 82579 Gigabit Ethernet PHY y se obtienen los valores de consumo energético para enlaces de 100 Mbps y 1 Gbps. En este caso, se realizan mediciones para cada uno de los tres modos de operación en los que se pueden encontrar configurados los enlaces: Activo, *Idle* y LPI. De los resultados obtenidos tras las mediciones, se puede extraer cuál es el consumo de un enlace cuando no porta tráfico alguno (modo de operación LPI) en función de su consumo cuando está activo. De esta forma, podemos asumir que el consumo de un enlace en modo LPI o *Sleeping* toma valores de entre un 5-10 % de su consumo cuando se encuentra en modo activo.

La Figura 2.2 muestra una gráfica con los valores referentes a las mediciones obtenidas en [12] y en [61], donde se puede comprobar que a medida que se incrementa la velocidad, el consumo de energía también aumenta. De hecho, la función que describe dicho modelo de consumo real, aunque toma valores discretos, puede aproximarse a

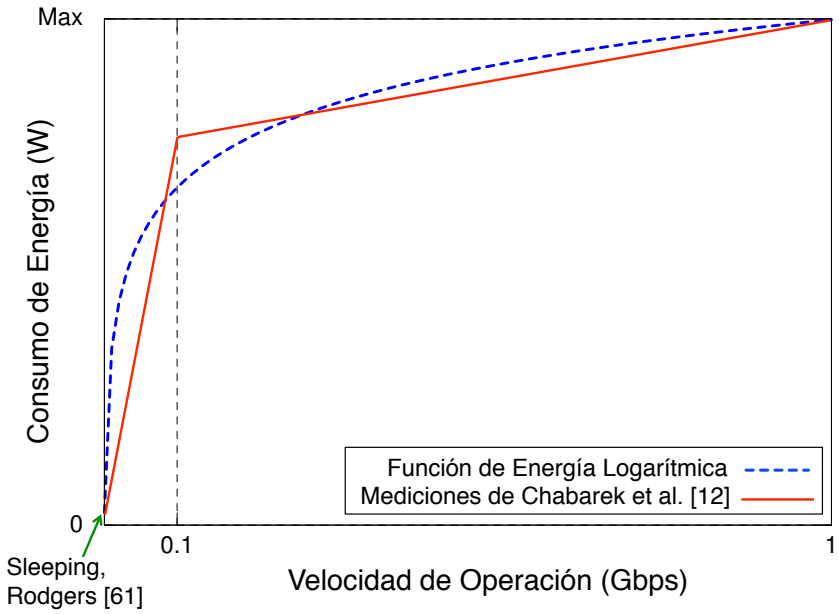


Figura 2.2: Aproximación al modelo de consumo de la tecnología Ethernet.

una función continua de tipo logarítmico. Además, para lograr un significante ahorro de energía en las redes cableadas, normalmente se utilizan una serie de heurísticas cuyo modo de actuación está relacionado con el apagado progresivo de nodos y enlaces después de haber realizado una agregación previa de los flujos de tráfico [66]. Otros trabajos dan solución a este problema mediante la utilización de Programación Lineal Entera, al considerar que solamente los enlaces [67] o tanto los enlaces como los nodos [68] pueden ser apagados de forma individual.

2.4. Eficiencia Energética en Redes Ópticas

Una vez revisada la literatura relacionada con la mejora de la eficiencia energética en redes cableadas, a continuación se profundiza en las técnicas que permiten reducir el consumo de energía en redes ópticas.

Este campo de estudio ha atraído recientemente la atención de los investigadores debido a su importancia y al amplio uso de las tecnologías ópticas en las redes de comunicaciones actuales. Este tipo de tecnologías constituye la infraestructura de red física que sirve como base a las redes *backbone*, cuyas características principales son la alta velocidad y la gran capacidad [15].

Con el objetivo de categorizar los métodos que permiten ahorrar energía en redes ópticas, se han identificado las cuatro categorías siguientes:

- Diseño de red energéticamente eficiente.
- Desactivación de componentes de red.
- Reenvío de paquetes IP energéticamente eficiente.

- Encaminamiento energéticamente eficiente.

A continuación se explica, de forma resumida, cada una de estas cuatro categorías de estrategias para la mejora de la eficiencia energética en redes ópticas.

2.4.1. Diseño de Red Energéticamente Eficiente

Una de las alternativas a estudiar para reducir el consumo de energía en este tipo de redes consiste en realizar un diseño de red energéticamente eficiente. En esta categoría, el principal objetivo radica en proponer arquitecturas energéticamente eficientes durante la fase de diseño de red.

Los autores de [69] proponen un diseño en el que se minimiza el consumo de energía de todos los componentes de la red en su conjunto para una red *IP-over-WDM*, *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Consideran dos enfoques diferentes para realizar una comparación entre ambos: *lightpath non-bypass* y *lightpath bypass*. En el primer caso, los *routers Internet Protocol* (IP) procesan y reenvían todos los datos que llevan los *lightpaths*, mientras que en el segundo caso se permite que el tráfico IP pueda evitar pasar por los *routers* intermedios y viajar a través de caminos directos.

Los resultados muestran que la estrategia de tipo *lightpath bypass* permite ahorrar una mayor cantidad de energía que el enfoque *non-bypass* (de un 25 % a un 45 % dependiendo de la topología considerada) debido a la posible reducción en el número de *routers* IP a atravesar. De este modo, a mayor tamaño de red, mayor ahorro de energía. Otra conclusión interesante está relacionada con el hecho de que el consumo de energía global de los *routers* IP en la red (con valores superiores al 90 %) es mucho más importante que el consumo del resto del equipamiento de red en este tipo de redes, como los *Erbium-Doped Fiber Amplifier* (EDFA) y los transpondedores.

2.4.2. Desactivación de Componentes de Red

En relación con la segunda categoría de los métodos que permiten ahorrar energía en redes ópticas, en [70] se relaciona la conciencia por el ahorro de energía con la agrupación de tráfico, de forma que se pueda reducir el número de componentes activos de la red (pasando a modo dormido). De esta manera, la arquitectura física modular de un nodo puede ofrecer un ahorro de energía sustancial, especialmente cuando la carga de tráfico es baja.

Los *chipsets* de ciertos módulos pueden pasar a modo dormido con velocidades de reloj inferiores mientras que el resto de módulos permanecen activos. Por tanto, el estado de un módulo concreto puede cambiar de forma dinámica [55, 12, 71]. Puesto que el problema al que se intenta dar solución es de tipo *NP-hard*, la propuesta utiliza heurísticas sobre un modelo de grafo auxiliar, que representa la relación entre la arquitectura física, el nivel de *lightpath* y el nivel de longitud de onda.

En base a la variación del perfil de tráfico a lo largo del ciclo diario, los resultados indican que se puede conseguir un ahorro de energía significativo (alrededor de un 30 %) especialmente en horas valle, en comparación con otras propuestas que no tienen en cuenta la eficiencia energética.

Los autores de [72] estudian el problema de conseguir un diseño de red *IP-over-WDM* que sea eficiente tanto en términos energéticos como de coste de puertos. Con el objetivo de reducir ambas métricas (consumo de energía y coste de puertos), se presenta una propuesta de agrupación de tráfico con multigranularidad en la que se utiliza una agrupación híbrida para la primera métrica y mezcla de la banda de longitudes de onda para la segunda métrica.

Para la obtención de los resultados de simulación se han utilizado redes de diferente tamaño como NSFNet, USANET, RedIRIS y Géant. Estos resultados concluyen que se puede conseguir un ahorro de energía de hasta un 68 % y un ahorro en puertos de hasta un 19 % en comparación con otros métodos de agrupación existentes en la literatura.

2.4.3. Reenvío de Paquetes IP Energéticamente Eficiente

Otro modo para reducir la energía consumida por una red óptica está relacionado con el hecho de considerar el reenvío de paquetes IP como energéticamente eficiente. En [12] se demuestra que el tamaño de los paquetes IP está fuertemente relacionado con el consumo de energía de los *routers*. Por ejemplo, cuanto menor es el tamaño de los paquetes IP en un escenario con tráfico *Constant Bit Rate* (CBR), mayor es el consumo de los *routers* que lo constituyen.

Por tanto, existe margen para la optimización del tamaño de los paquetes IP y el diseño de nuevas técnicas de reenvío que permitan conseguir ganancias sustanciales en términos de ahorro energético. Sin embargo, también existe un compromiso obvio entre esta aproximación y el retardo sufrido en la entrega de paquetes. Se trata pues de un hecho comúnmente conocido que también se estudia en la aplicación de procedimientos energéticamente eficientes sobre las redes de comunicaciones.

2.4.4. Encaminamiento Energéticamente Eficiente

Para finalizar, cabe destacar que también se usan técnicas de encaminamiento energéticamente eficientes con el objetivo de ahorrar energía mediante la utilización del consumo del equipamiento de red como función objetivo en las distintas técnicas de optimización.

En comparación con las técnicas de encaminamiento tradicionales como *Shortest Path-First* (SPF) o aquéllas que no consideran métricas para mejorar la eficiencia energética de la red, este tipo de esquemas pretenden conseguir un significativo ahorro de energía.

Los autores de [12] proponen un esquema de encaminamiento en el que se actúa sobre la reconfiguración de las tarjetas de línea y los chasis de los *routers* IP. Estos componentes son unos de los mayores consumidores de energía en las redes debido a que no son configurados de una manera energéticamente eficiente por parte de los esquemas de encaminamiento tradicionales. En [73] se presenta un estudio para poder adaptar *Open Shortest Path First* (OSPF) de forma que incluya características de eficiencia energética.

Así pues, se concluye que la comunidad investigadora está poniendo esfuerzos de diverso tipo en relación con la propuesta de algoritmos, utilización de técnicas de optimización, necesidad de cambios en la arquitectura de la red o procedimientos de señalización y control para conseguir una mejora de la eficiencia energética en las redes ópticas.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha podido comprobar la existencia de una gran cantidad de propuestas que tratan de resolver el problema de la eficiencia energética en redes inalámbricas, fijas y ópticas.

Sin embargo, una vez analizados estos trabajos y los distintos modelos de energía utilizados en cada uno de ellos, no se ha identificado ningún trabajo que trate de evaluar en términos de eficiencia energética cuál es el número de modos de operación más apropiado para ser implementados por las tarjetas de línea.

Mediante la aplicación de técnicas basadas en hardware como *Sleeping* o *Rate Adaptation* se pretende conseguir un significativo ahorro de energía global en la red sin la necesidad de que las tarjetas de línea implementen un número elevado de niveles de energía.

Puesto que este es el objetivo principal de la Parte I de esta tesis, en los siguientes capítulos se define y formula el problema a resolver, se aplican métodos basados en la computación bio-inspirada para su resolución y se analizan los resultados obtenidos para dar respuesta a este compromiso.

Capítulo 3

Configuración de Red para el Ahorro de Energía

> "No podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando los creamos."
>
> Albert Einstein

Partiendo del conocimiento previo extraído de los trabajos existentes en la literatura relacionados con la eficiencia energética en redes cableadas, el trabajo llevado a cabo en la Parte I de esta tesis se centra en la actuación sobre los componentes hardware de la red para proponer un diseño energéticamente eficiente de este tipo de elementos. Concretamente, se ha identificado la oportunidad de evaluar el compromiso que existe entre el número de modos de operación a implementar en las tarjetas de línea y la cantidad de energía que se puede ahorrar con su utilización.

Para ello, se propone minimizar el consumo de energía de la red en base a la actuación individual sobre cada uno de los elementos que la constituyen. A continuación se presenta, paso por paso, la descripción formal del problema a resolver así como una serie de conceptos que son claves para su resolución.

3.1. Definición del Problema

Dada una infraestructura de red $G = (V, E, R)$ de nodos $v \in V$, conectados por un conjunto de enlaces unidireccionales $e \in E$ que pueden operar según un conjunto de niveles de energía $r_e \in R$ y una matriz de demanda de tráfico $M_{(i,j)}, \forall i, j \in V$ con una demanda de tráfico de $d_{(s,d)} \in M_{(i,j)}$ unidades desde el nodo origen $s \in V$ hasta el nodo destino $d \in V$, encontrar la configuración de red que minimice el consumo de energía requerido.

Un enlace unidireccional dirigido desde el nodo $i \in V$ hacia el nodo $j \in V$ se denota por $e_{i,j}$ y está asociado a un nivel de energía $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$ durante un intervalo de tiempo T, que representa la velocidad a la que está configurada la tarjeta de línea del enlace durante dicho intervalo. La Figura 3.1 muestra un esquema de infraestructura

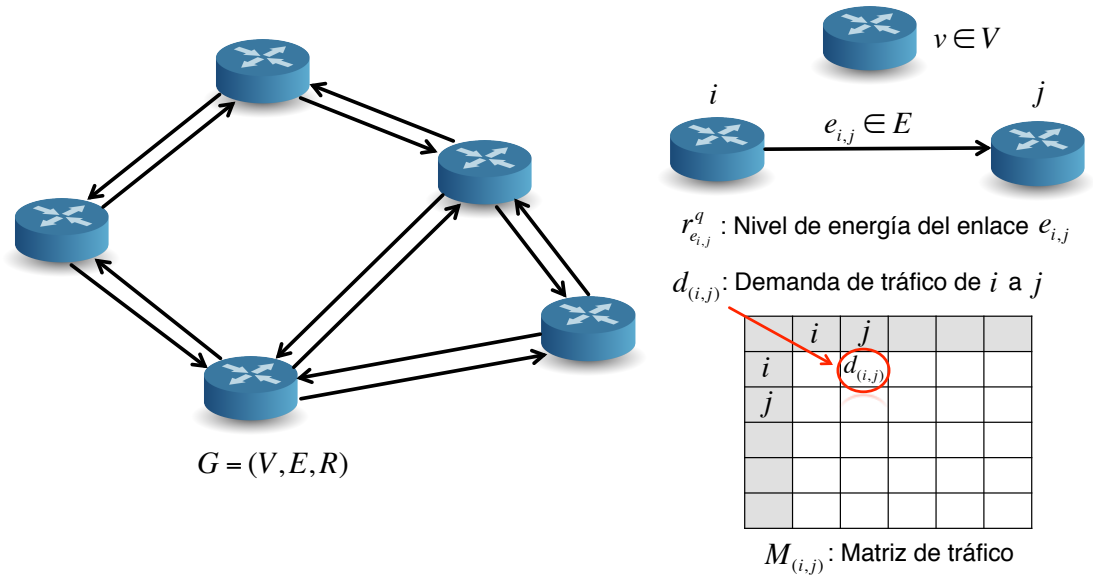


Figura 3.1: Esquema de infraestructura de red con los conceptos de la definición del problema.

de red en donde se explican todos los conceptos utilizados para la definición formal del problema.

La función $powerL\left(e_{i,j}, r^q_{e_{i,j}}, T\right)$ calcula el consumo de energía en Vatios de la tarjeta de línea correspondiente al enlace unidireccional $e_{i,j}$, que se encuentra configurada con un nivel de energía $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$ durante un intervalo de tiempo T. Para ello, $c_{r^q_{e_{i,j}}}$ hace referencia al consumo instantáneo de la tarjeta de línea correspondiente al enlace $e_{i,j}$ cuando se encuentra configurada con un nivel de energía $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$.

El objetivo es, por tanto, minimizar el consumo instantáneo de la red para un conjunto de intervalos de tiempo, de forma que este conjunto constituye una secuencia que proporciona una completa cobertura sobre el ciclo diario:

$$\text{mín}\, IPC\,(C, T) = \sum_{e_{i,j} \in E} powerL\left(e_{i,j}, r^q_{e_{i,j}}, T\right) \tag{3.1}$$

donde

$$powerL\left(e_{i,j}, r^q_{e_{i,j}}, T\right) = c_{r^q_{e_{i,j}}} T, \forall e_{i,j} \in E, \forall r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}} \tag{3.2}$$

En resumen, el consumo energético instantáneo IPC de una configuración de red $C \in G$ durante un intervalo de tiempo T viene determinado por el sumatorio del consumo energético instantáneo de cada tarjeta de línea activa (ecuación 3.1), el cual depende del nivel de energía con el que éstas se encuentran configuradas (ecuación 3.2).

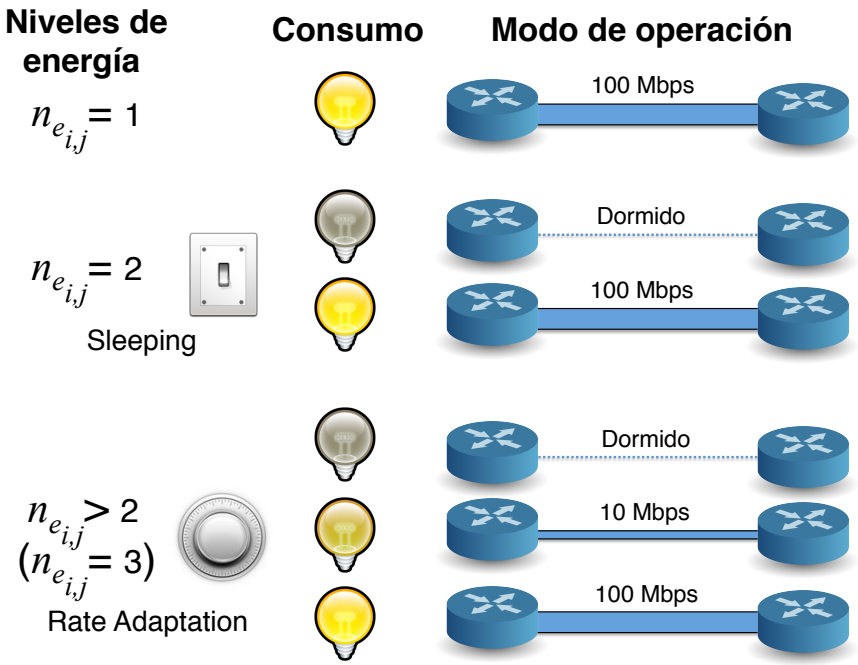


Figura 3.2: Esquema del concepto de nivel de energía asociado a un enlace.

3.2. Definición de Nivel de Energía

Dada una función de energía f, se considera nivel de energía al par (x, y), donde x corresponde a la velocidad de operación del enlace e y es el resultado de aplicar la función de energía, f, a x, con $f(x) = y$.

Un nivel de energía relaciona, por tanto, la velocidad de operación del enlace con el consumo energético asociado. La Figura 3.2 describe gráficamente el concepto de nivel de energía asociado a un enlace.

El número mínimo de niveles de energía que un enlace puede soportar es 1 (siempre activo), que hace referencia a la capacidad nominal del enlace y a su consumo de energía asociado ($n_{e_{i,j}} = 1$). Se trata por tanto de la situación en la que no existen características de eficiencia energética.

El método basado en hardware *Sleeping* [6], estudiado en el Capítulo 2, añade otro posible nivel de energía al que poder configurar una tarjeta de línea determinada ($n_{e_{i,j}} = 2$). En este caso, los enlaces o se encuentran dormidos u operan a su máxima velocidad.

Los enlaces que se encuentran dormidos permiten ahorrar energía al no transportar paquetes de datos, aunque permanecen operativos para ser despertados si es necesario. En este nivel de energía, los enlaces consumen un pequeño porcentaje, que suele ser entre el 5-10 % del consumo asociado a su nivel de energía máximo (capacidad nominal del enlace) [61].

Si por el contrario los enlaces pueden adaptar su velocidad a la variación de la carga de la red a lo largo del tiempo, estaríamos ante el caso de la aplicación de la técnica *Rate Adaptation* ($n_{e_{i,j}} > 2$) [6]. Además, los autores de [63] indican que

el hardware de red soportará probablemente en un futuro cercano características de ahorro de energía mediante la posibilidad de proporcionar un conjunto de interfaces que puedan operar a diferentes velocidades (Figura 2.2 del Capítulo 2).

En resumen, cada enlace $e_{i,j} \in E$ tiene asociado una función de energía $f_{e_{i,j}}$ y puede operar según un número discreto de niveles de energía, $n_{e_{i,j}} \in \mathbb{N}; n_{e_{i,j}} \geq 1$. La Tabla 3.1 muestra un ejemplo concreto en el que se aplica el concepto de nivel de energía definido en esta sección. Concretamente, se trata de un enlace con tecnología Ethernet que puede soportar hasta 5 niveles de energía distintos ($n_{e_{i,j}} = 5$).

Tabla 3.1: Ejemplo de enlace Ethernet con $n_{e_{i,j}} = 5$.

Nivel de Energía	**Velocidad de operación**
0	Dormido, *Sleeping* o *standby*
1	10 Mbps (10Base-T)
2	100 Mbps (100Base-TX)
3	1 Gbps (1000Base-T)
4	10 Gbps (10GBase-T)

En nuestra propuesta asumimos que un enlace puede soportar un número concreto de niveles de energía diferentes. De esta forma, se puede ahorrar energía en mayor o menor medida al aplicar la función de energía del enlace sobre la velocidad de operación correspondiente al nivel de energía al que éste se encuentra configurado. Asumimos también asimetría para los enlaces, es decir, los dos arcos unidireccionales que constituyen un enlace bidireccional pueden estar configurados con distintos niveles de energía.

3.3. Definición de Distribución de Energía

Sea $r_{e_{i,j}} \in R$, a lo que denominamos distribución de energía del enlace $e_{i,j} \in E$, el dominio de $f_{e_{i,j}} : r_{e_{i,j}} \longrightarrow w_{e_{i,j}}$. La distribución de energía $r_{e_{i,j}} \in R$ viene determinada por la sucesión de $n_{e_{i,j}} \in \mathbb{N}; n_{e_{i,j}} \geq 1$ niveles de energía, $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$, que corresponden al conjunto ordenado de posibles velocidades de operación a las que se puede configurar el enlace $e_{i,j} \in E$:

$$r_{e_{i,j}} = \{r^1_{e_{i,j}}, r^2_{e_{i,j}}, ..., r^q_{e_{i,j}}, ..., r^{n_{e_{i,j}}}_{e_{i,j}}\}, \forall r^q_{e_{i,j}} < r^{q+1}_{e_{i,j}} \in \mathbb{R} \tag{3.3}$$

Si denotamos $C_{e_{i,j}}$ a la capacidad nominal del enlace $e_{i,j} \in E$, los valores $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$ correspondientes a una distribución de energía lineal se calculan según la siguiente ecuación:

$$r^q_{e_{i,j}} = \begin{cases} C_{e_{i,j}}, & n_{e_{i,j}} = 1 \\ \frac{q-1}{n_{e_{i,j}}-1} \cdot C_{e_{i,j}}, & n_{e_{i,j}} > 1 \end{cases} \tag{3.4}$$

Es decir, un enlace con una distribución de energía lineal y un único nivel de energía ($n_{e_{i,j}} = 1$) únicamente puede operar a su máxima velocidad, $C_{e_{i,j}}$, ya que siempre está activo.

En el caso de que el enlace presente capacidades de *Sleeping* o *Rate Adaptation* ($n_{e_{i,j}} > 1$) y su distribución de energía sea lineal, el conjunto ordenado de posibles velocidades de operación a las que se puede configurar sigue una distribución de tipo uniforme, que varía desde su velocidad mínima (*Sleeping* o *standby*) hasta su velocidad máxima de operación, $C_{e_{i,j}}$.

Por otro lado, los valores $r^q_{e_{i,j}} \in r_{e_{i,j}}$ correspondientes a una distribución de energía exponencial se calculan según la siguiente ecuación:

$$r^q_{e_{i,j}} = \begin{cases} C_{e_{i,j}}, & n_{e_{i,j}} = 1 \\ 0, & n_{e_{i,j}} > 1 \wedge q = 1 \\ a^{q-n_{e_{i,j}}} \cdot C_{e_{i,j}}, & n_{e_{i,j}} > 1 \wedge 1 < q \leq n_{e_{i,j}} \end{cases} \tag{3.5}$$

donde a es la base de la distribución de energía exponencial.

En este caso, el conjunto ordenado de posibles velocidades de operación para un determinado enlace sigue una distribución de valores de tipo exponencial que varía también desde la velocidad mínima considerada (*Sleeping* o *standby*) hasta la capacidad nominal del enlace, $C_{e_{i,j}}$.

La Tabla 3.2 muestra los conjuntos de valores de los dos tipos de distribuciones de energía, $r_{e_{i,j}}$, consideradas (lineal y exponencial) en función del número de niveles de energía utilizados, $n_{e_{i,j}}$, y de la capacidad nominal del enlace, $C_{e_{i,j}}$. En ella se puede comprobar que el conjunto de valores para ambas distribuciones de energía coincide si se establece un número de niveles de energía igual a 1 ó a 2 ($n_{e_{i,j}} = 1$ y $n_{e_{i,j}} = 2$). Es a partir de $n_{e_{i,j}} > 2$ cuando la naturaleza específica de la distribución en cuestión hace que los valores intermedios del conjunto de velocidades de operación del enlace sea diferente.

Tabla 3.2: Valores de las distribuciones de energía en función del número de niveles de energía.

Valor de $n_{e_{i,j}}$	**Distribución de Energía ($r_{e_{i,j}}$)**	
	Lineal	**Exponencial**
1	$\{C_{e_{i,j}}\}$	$\{C_{e_{i,j}}\}$
2	$\{sleeping, C_{e_{i,j}}\}$	$\{sleeping, C_{e_{i,j}}\}$
3	$\{sleeping, \frac{1}{2}C_{e_{i,j}}, C_{e_{i,j}}\}$	$\{sleeping, a^{-1} \cdot C_{e_{i,j}}, C_{e_{i,j}}\}$
4	$\{sleeping, \frac{1}{3}C_{e_{i,j}}, \frac{2}{3}C_{e_{i,j}}, C_{e_{i,j}}\}$	$\{sleeping, a^{-2} \cdot C_{e_{i,j}}, a^{-1} \cdot C_{e_{i,j}}, C_{e_{i,j}}\}$

3.4. Definición de Función de Energía

De acuerdo con las dos definiciones anteriores, la función de energía $f_{e_{i,j}}$ se define como:

$$f_{e_{i,j}} : r_{e_{i,j}} \longrightarrow w_{e_{i,j}} \Longleftrightarrow \forall x \in r_{e_{i,j}} \exists y \in w_{e_{i,j}} \setminus (x, y) \in f_{e_{i,j}} \tag{3.6}$$

donde $w_{e_{i,j}} \in W$ es la imagen de $f_{e_{i,j}}$, es decir, el conjunto ordenado de valores de consumo instantáneo correspondientes a la distribución de energía $r_{e_{i,j}} \in R$:

$$w_{e_{i,j}} = \{w^1_{e_{i,j}}, w^2_{e_{i,j}}, ..., w^q_{e_{i,j}}, ..., w^{n_{e_{i,j}}}_{e_{i,j}}\}, \forall w^q_{e_{i,j}} < w^{q+1}_{e_{i,j}} \in \mathbb{R} \tag{3.7}$$

La Figura 3.3 muestra, de un vistazo, todos los conceptos definidos y utilizados en la Parte I de esta tesis. En concreto, describe un enlace unidireccional $e_{i,j}$ que puede operar según 3 niveles de energía diferentes ($n_{e_{i,j}} = 3$) y utiliza tanto una función como una distribución de energía lineales ($f_{e_{i,j}}$ lineal y $r_{e_{i,j}}$ lineal).

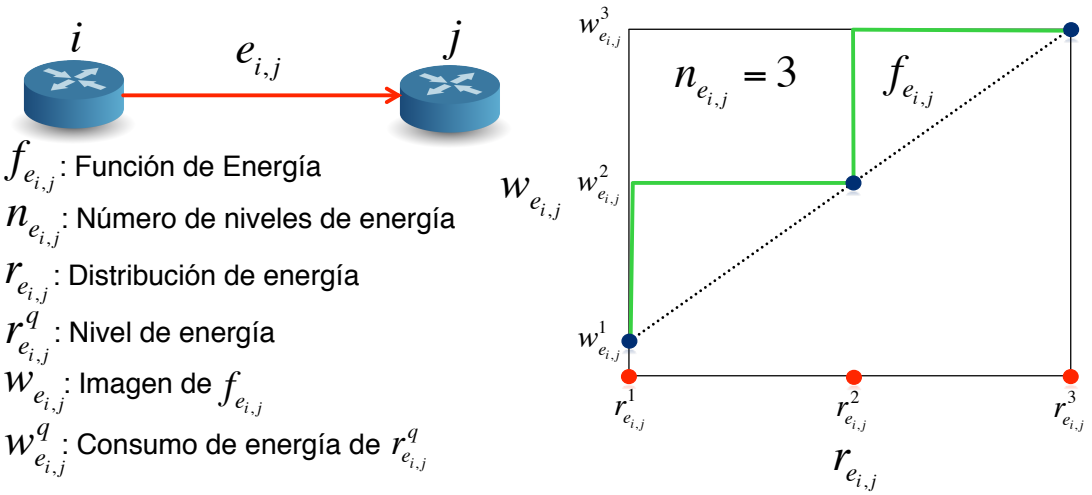
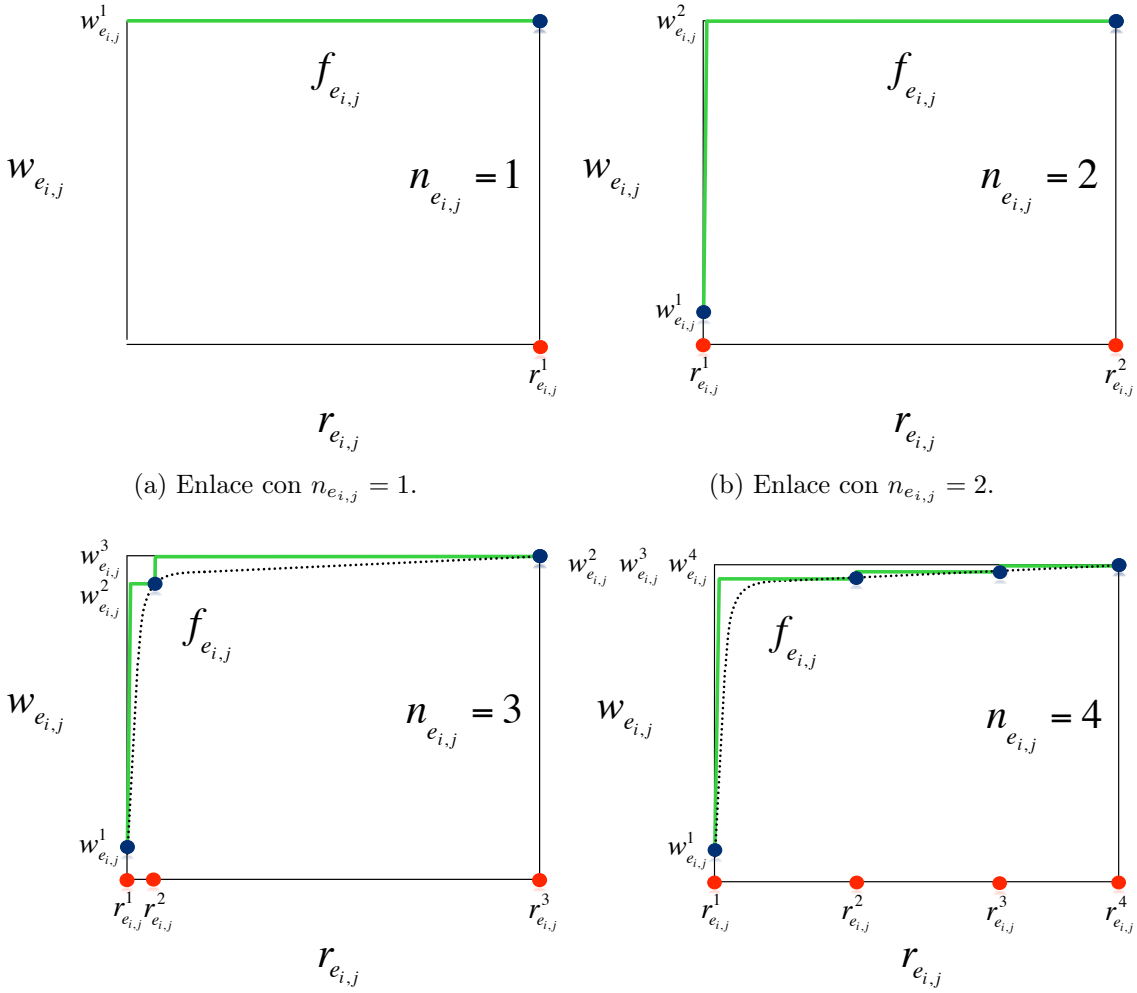


Figura 3.3: Descripción de un enlace unidireccional con tres niveles de energía, función de energía lineal y distribución de energía lineal.

Por su parte, la Figura 3.4 muestra una serie de ejemplos de enlaces con distintas características. Por un lado se describe un enlace que no soporta características de eficiencia energética, es decir, se encuentra continuamente activo operando a su máxima velocidad y el número de niveles de energía soportado es igual a 1 (Figura 3.4 (a)).

La Figura 3.4 (b) describe un enlace con dos niveles de energía (técnica *Sleeping*), para el cual la distribución de energía puede ser o bien de tipo lineal o bien de tipo exponencial, ya que no influye sobre la función de energía resultante.

Para el enlace descrito por la Figura 3.4 (c) se añade un nivel de energía más (tres niveles de energía, técnica *Rate Adaptation*) y se establece una función de energía logarítmica y una distribución de energía exponencial. Por último, la Figura 3.4 (d) muestra las características de un enlace que puede operar según cuatro niveles de energía distintos y sigue una función de energía logarítmica y una distribución de energía lineal.



(a) Enlace con $n_{e_{i,j}} = 1$.

(b) Enlace con $n_{e_{i,j}} = 2$.

(c) Enlace con $n_{e_{i,j}} = 3$, $f_{e_{i,j}}$ logarítmica y $r_{e_{i,j}}$ exponencial.

(d) Enlace con $n_{e_{i,j}} = 4$, $f_{e_{i,j}}$ logarítmica y $r_{e_{i,j}}$ lineal.

Figura 3.4: Ejemplos de enlaces con distintas características.

3.5. Caracterización de las Funciones de Energía

Para calcular el consumo de energía instantáneo de cada una de las tarjetas de línea asociadas a los enlaces de la red, es necesario seleccionar una función de energía similar a las estudiadas en el Capítulo 2. Sin embargo, la distinta naturaleza de las diferentes funciones de energía puede derivar en una comparación injusta a la hora de evaluar el ahorro de energía conseguido cuando se aplica una u otra función de energía sobre los enlaces de la red.

La Figura 3.5 muestra un ejemplo de esta posible situación en la que se consideran dos tipos de funciones de energía concretas: lineal (consumo proporcional [74]) y logarítmica (Figura 2.2 del Capítulo 2 [12, 61]).

En ella se describe la relación existente entre la velocidad de operación del enlace $e_{i,j}$ y su consumo instantáneo considerando que el propio enlace pueda operar según

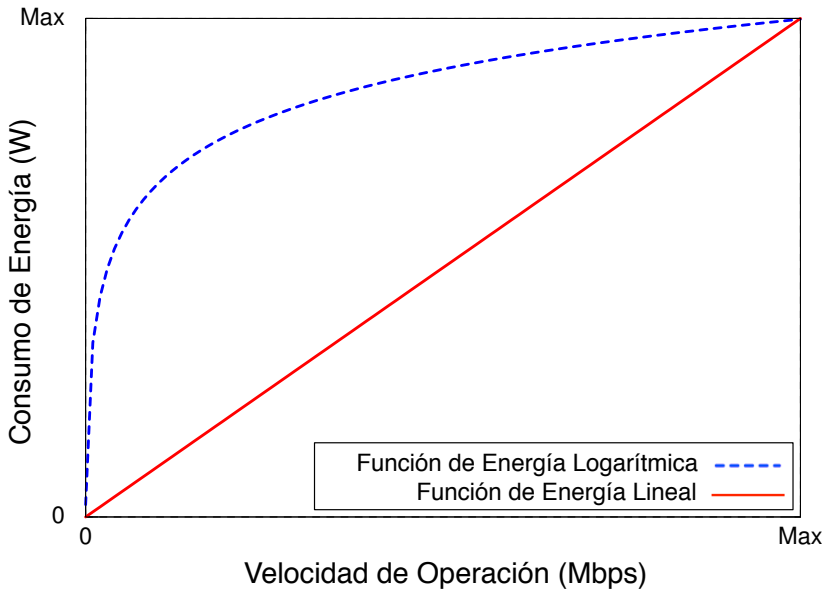


Figura 3.5: Funciones de energía lineal y logarítmica para ($n_{e_{i,j}} = \infty$).

un número infinito ($n_{e_{i,j}} = \infty$) de niveles de energía (situación ideal, aunque muy poco realista).

Se puede observar que a medida que la velocidad aumenta, se produce un incremento en el consumo de energía con distinta tendencia según el tipo de función de energía. Además, resulta obvio comprobar que en el caso de que los enlaces de la red utilicen una función de energía logarítmica, el consumo global de la misma será superior al obtenido en el caso de que utilicen una función de energía lineal.

Por ello, y para realizar una comparación justa y normalizada, se establece el siguiente criterio: el valor del área delimitada por cada tipo de función de energía con respecto al eje de abscisas debe ser el mismo. Con este objetivo, establecemos un *framework* de normalización que permite la comparación de funciones de energía por pares:

$$\int_{0}^{C_{e_{i,j}}} f^{a}_{e_{i,j}}(x)dx = \int_{0}^{C_{e_{i,j}}} f^{b}_{e_{i,j}}(x)dx \tag{3.8}$$

En lugar de centrarnos en una función de energía concreta, el *framework* permite comparar cualquier tipo de función de energía ($f^{a}_{e_{i,j}}$, $f^{b}_{e_{i,j}}$) que pueda seguir cualquier tipo de enlace. De este modo, se podría evaluar la cantidad de energía ahorrada en una red en función del tipo de los enlaces que la constituyen y su función de energía asociada.

Siguiendo con el ejemplo de la Figura 3.5, al aplicar el *framework* de normalización propuesto (ecuación 3.8) se obtiene como resultado la Figura 3.6, en la que se puede observar que el área delimitada por ambas funciones de energía con respecto al eje de abscisas es la misma.

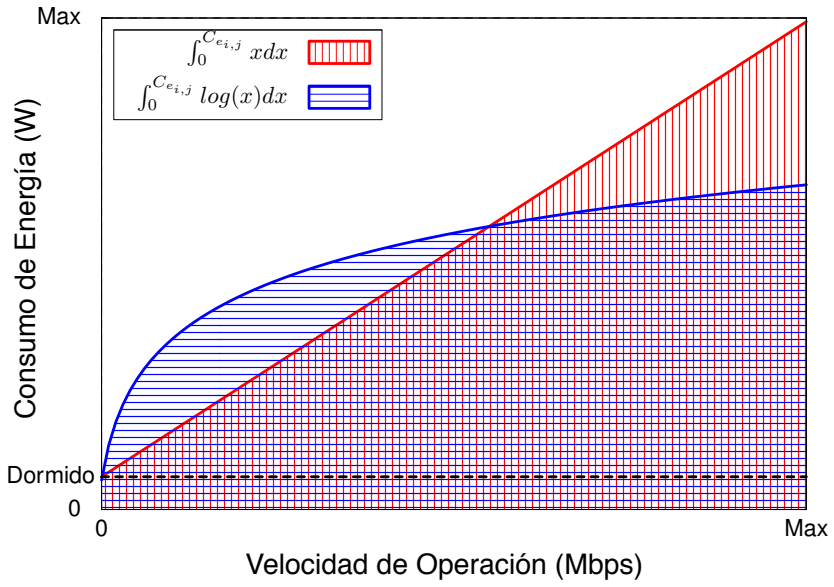


Figura 3.6: Adaptación de áreas de las funciones de energía para ($n_{e_{i,j}} = \infty$).

Para ampliar la explicación referente a la aplicación de esta comparación normalizada, la Figura 3.7 muestra un conjunto de ejemplos en los que se adapta el área de las funciones de energía lineal y logarítmica para distinto número de niveles de energía ($n_{e_{i,j}} = 2, 3, 4$) y distinto tipo de distribución de energía ($r_{e_{i,j}}$ lineal y exponencial).

3.6. Conclusiones

En este capítulo se ha definido formalmente el problema que se desea resolver en la Parte I de esta tesis, que consiste en minimizar el consumo de energía de una infraestructura de red en base a la propuesta de un diseño energéticamente eficiente de los componentes de la red en general y de las tarjetas de línea en particular.

Se han definido una serie de conceptos clave (nivel de energía, función de energía y distribución de energía) relacionados con las características de los enlaces sobre los que se pretende actuar para conseguir un significativo ahorro de energía global en la red. Además, se ha propuesto un *framework* de comparación de funciones de energía con el objetivo de poder evaluar el ahorro conseguido en la red según el tipo de función de energía de los enlaces que la constituyen.

Una vez que se aplica este marco comparativo, es posible calcular el consumo instantáneo de las tarjetas de línea de la red en función del número de niveles de energía, del tipo de función de energía y del tipo de distribución de energía seleccionados. En este punto, se está en disposición de aplicar los métodos de optimización propuestos que tratan de conseguir un ahorro de energía significativo y que se describen en el capítulo siguiente.

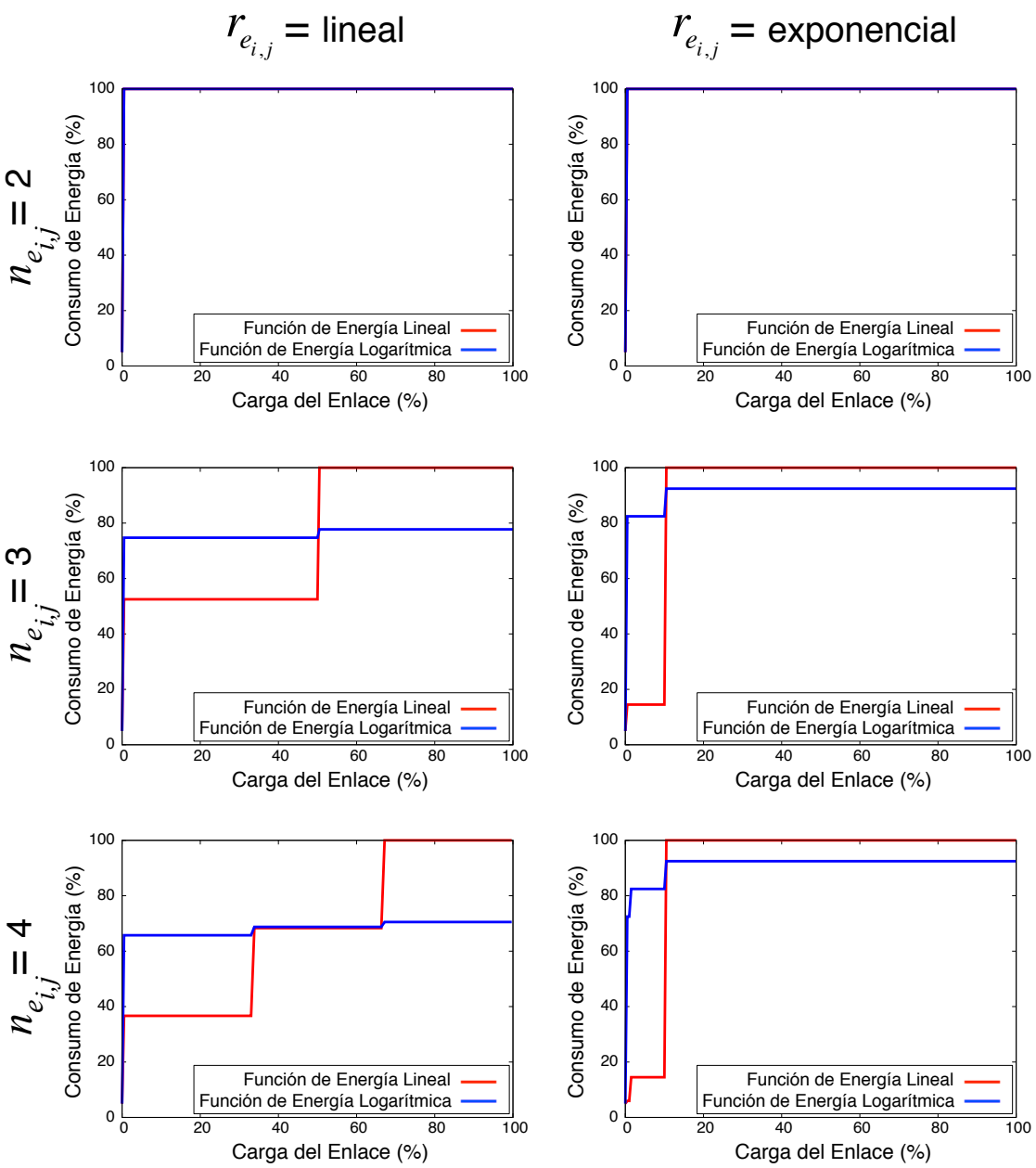


Figura 3.7: Ejemplos de adaptación de áreas para las funciones de energía lineal y logarítmica en función del número de niveles de energía y del tipo de distribución de energía.

Capítulo 4

Aplicación de Algoritmos Bio-inspirados para el Ahorro de Energía

> "En la larga historia de la humanidad (incluso de la especie animal), son aquellos que aprenden a colaborar y a improvisar los que tendrán más probabilidad de prevalecer."
>
> Charles Darwin

El problema de optimización descrito en el Capítulo 3, en el que se pretende minimizar el consumo instantáneo de la red mediante la búsqueda del mínimo conjunto de recursos que deben estar activos para poder satisfacer una demanda de tráfico dada, puede formularse mediante la utilización de Programación Lineal Entera o *Integer Linear Programming* (ILP) [66].

Sin embargo, al tratarse de un problema de tipo *Multi-Commodity Maximum Flow* (MCMF) [75] perteneciente a la clase de problemas *NP-hard*, en el que se deben encaminar múltiples demandas entre nodos origen y destino diferentes sobre un grafo con restricciones de capacidad, hace que su resolución mediante ILP sea únicamente viable para redes de tamaño pequeño y para resolver ciertos casos triviales [76].

En una aproximación inicial, el problema se formuló mediante ILP para determinar la configuración de red óptima en términos de ahorro energético para cada uno de los intervalos de tiempo pertenecientes al ciclo diario. Sin embargo, al igual que en [66, 77], únicamente se obtenían resultados para redes pequeñas (14 nodos), ya que para redes más grandes no se conseguía que el problema convergiera hacia la solución óptima.

Afortunadamente, existen métodos que se apoyan en heurísticas para la resolución de este tipo de problemas dentro de un tiempo dado, limitando drásticamente el volumen de datos a utilizar y el número de comprobaciones a realizar, aunque para ello se sacrifique la garantía de obtención de soluciones óptimas.

En nuestro trabajo hemos optado por utilizar diferentes métodos pertenecientes a la denominada computación bio-inspirada [78, 79, 80]. Este tipo de métodos replican la forma en que la naturaleza se enfrenta a un problema de optimización determinado. Principalmente, tratan de emular la evolución natural de las especies y la respuesta de los sistemas sociales ante desafíos concretos.

En las siguientes secciones se presentan las dos metodologías basadas en algoritmos bio-inspirados propuestas para resolver el problema de minimización del consumo de energía en redes cableadas. En primer lugar se utilizan los denominados Algoritmos Genéticos o GA y posteriormente se aplica la Optimización por Enjambre de Partículas o PSO.

4.1. Algoritmos Genéticos

Los GA son métodos adaptativos utilizados normalmente para dar solución a complejos problemas de optimización. Se basan en los mecanismos de la evolución natural, donde los individuos se reproducen y únicamente los más aptos sobreviven [81].

Más formalmente, en [82] se definen del siguiente modo: *Genetic algorithms are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. They combine survival of the fittest among string structures with a structured yet randomized information exchange to form a search algorithm with some of the innovative flair of human search.*

Los GA están constituidos por un conjunto de soluciones potenciales o cromosomas (población) [83] y una serie de operadores que se inspiran en la biología (selección, cruzamiento y mutación). Cada cromosoma tiene un valor de aptitud (*fitness*) que indica el grado de bondad con respecto a la solución que representa. Los operadores anteriormente mencionados se aplican sobre la población para intentar conseguir mejores soluciones potenciales y originar nuevas generaciones. De acuerdo con la Teoría de la Evolución, los individuos de la población que mejor se adaptan al entorno en el que viven son los que tienden a sobrevivir, transmitiendo su información genética a las nuevas generaciones [81].

El Algoritmo 4.1 describe el GA clásico. Primeramente se inicializan tanto el iterador (denominado *generación*) y la población, que está constituida por un grupo de individuos donde cada uno codifica una potencial solución al problema. A continuación comienza un proceso iterativo que tiene como objetivo encontrar el mejor individuo de la población. Para ello, es necesaria una función de evaluación ($funcionFitness$) que asigna un valor de aptitud (v) a cada individuo, el cual indica su idoneidad para resolver el problema.

La población se va modificando de forma iterativa gracias a la aplicación de diferentes tipos de funciones relacionadas con el cruzamiento y la mutación de los individuos (operadores de variación). A su vez, es necesario ejecutar una función de selección para obtener soluciones parciales de mayor calidad a lo largo de las distintas generaciones.

Algoritmo 4.1 Descripción en pseudocódigo del GA clásico.

```
generacion ← 0
poblacion(generacion) ← inicializarPoblacion()
while criterioParadaSatisfecho == falso do
  v ← funcionFitness(poblacion(generacion))
  padres ← funcionSeleccion(poblacion(generacion))
  hijo ← operadoresVariacion(padres)
  nuevapoblacion ← funcionReemplazo(hijo,poblacion(generacion))
  generacion ← generacion + 1
  poblacion(generacion) ← nuevapoblacion
end while
return mejor v encontrado
```

El proceso finaliza cuando se satisface el criterio de parada seleccionado, que puede ser un número de generaciones fijado previamente, un determinado tiempo de ejecución o incluso un umbral asociado al mejor valor de aptitud de un individuo, el cual es finalmente retornado como salida del proceso.

4.1.1. Aplicación de Algoritmos Genéticos para el Ahorro de Energía

Volviendo al problema que se desea resolver en la Parte I de esta tesis, utilizamos un GA con el objetivo de encontrar configuraciones de red (casi) óptimas que minimicen la energía consumida en función de la demanda de tráfico requerida entre cada par origen-destino.

El objetivo principal es, tal y como se ha introducido en capítulos anteriores, minimizar el consumo instantáneo de la red mediante la búsqueda del mínimo conjunto de recursos que deben estar activos para poder satisfacer una demanda de tráfico dada.

En el caso de que no sea necesario que los enlaces de la red continúen operando con un nivel de energía alto, pasarán a configurarse con un nivel de energía más bajo, es decir, a una velocidad de operación menor que origine un consumo asociado inferior. Esto implica que algunos enlaces pasarán a estar más cargados para que otros puedan cambiar su nivel de energía y consigan así poder ahorrar energía.

4.1.2. Codificación del Cromosoma

Un cromosoma, c, está constituido por una sucesión de valores (genes, g_i) que representan la velocidad de operación correspondiente al nivel de energía en el que se encuentran configurados cada uno de los enlaces unidireccionales de la red durante un intervalo de tiempo dado:

$$c = \{g_0, g_1, g_2, ..., g_N\}, \forall g_i \in [0, 1] \in \mathbb{R} \tag{4.1}$$

Así pues, dada una configuración de red determinada para una red específica, se puede crear el cromosoma correspondiente al ejecutar el Algoritmo 4.2. Primeramente

se inicializa el iterador necesario para ejecutar el proceso iterativo que comienza a continuación. Este proceso iterativo comprueba, para cada par de nodos de la red (u, v), si existe un enlace unidireccional que los conecta. En tal caso, se obtiene la velocidad de operación del enlace, que pasa a convertirse en el gen i-ésimo (g_i) del cromosoma resultante. Una vez que el algoritmo termina, se dispone del cromosoma correspondiente a la configuración de red para la cual se desea evaluar su consumo energético.

Algoritmo 4.2 Descripción en pseudocódigo del algoritmo utilizado para crear un cromosoma correspondiente a una configuración de red determinada.

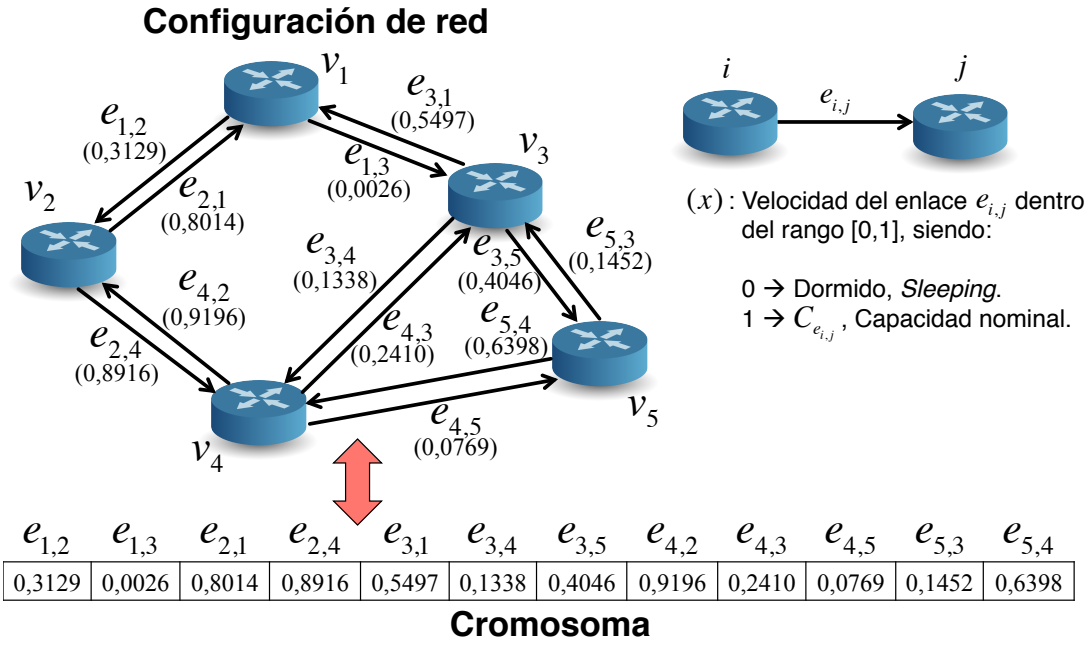
```
i ← 0
for all node u do
  for all node v tal que v ≠ u do
    Para cada par (u,v), comprobar si existe enlace entre ellos
    if existeEnlace(u, v) == verdadero then
      g_i = obtenerVelocidad(u,v)
      i ← i + 1
    end if
  end for
end for
```

El rango de valores que puede tomar un gen, g_i, coincide con el eje de abscisas de la función de energía del enlace en cuestión, $f_{e_{i,j}}$, es decir, el valor del gen g_i va a pertenecer a la distribución de energía, $r_{e_{i,j}}$, del enlace. Cada cromosoma representa, por tanto, una configuración de red en base a un conjunto de enlaces que se encuentran configurados con una velocidad de operación concreta durante un intervalo de tiempo determinado.

Para determinar si la configuración de red codificada por un cromosoma satisface la correspondiente demanda de tráfico para un intervalo de tiempo dado, se utiliza el algoritmo de encaminamiento del camino más corto o SPF. Cada demanda de tráfico desde cada nodo origen hacia cada nodo destino debe ser encaminada de forma correcta por la configuración de red en cuestión para que su cromosoma asociado pueda ser considerado como una solución potencial por el GA.

De esta forma, si la configuración de red es capaz de encaminar el tráfico con la restricción de no superar la capacidad efectiva de cada enlace unidireccional, el cromosoma en cuestión se convierte en una solución para dicho intervalo de tiempo. Si por el contrario la configuración de red no puede satisfacer la demanda de tráfico, esta solución potencial no es válida y no puede ser evaluada por la función de *fitness*. En el caso de que una solución sea considerada como no válida, el GA la descarta. Para comprobar la viabilidad de las soluciones, se ha desarrollado un algoritmo que presenta una complejidad $O(n^4)$ para cada cromosoma evaluado por el GA.

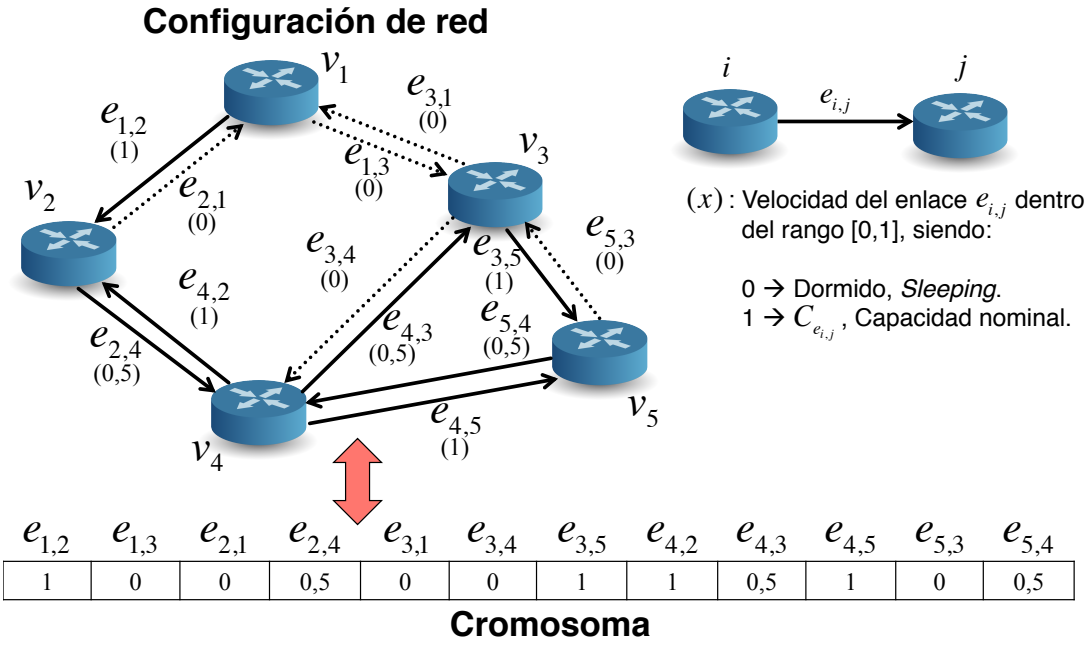
La Figura 4.1 muestra dos ejemplos de dos configuraciones de red diferentes que hacen referencia a la misma topología de red y se han codificado a través de sus correspondientes cromosomas. La distribución de energía utilizada por los enlaces en ambas configuraciones es de tipo lineal.



$e_{1,2}$	$e_{1,3}$	$e_{2,1}$	$e_{2,4}$	$e_{3,1}$	$e_{3,4}$	$e_{3,5}$	$e_{4,2}$	$e_{4,3}$	$e_{4,5}$	$e_{5,3}$	$e_{5,4}$
0,3129	0,0026	0,8014	0,8916	0,5497	0,1338	0,4046	0,9196	0,2410	0,0769	0,1452	0,6398

Cromosoma

(a) Infinitos niveles de energía ($n_{e_{i,j}} = \infty$).



$e_{1,2}$	$e_{1,3}$	$e_{2,1}$	$e_{2,4}$	$e_{3,1}$	$e_{3,4}$	$e_{3,5}$	$e_{4,2}$	$e_{4,3}$	$e_{4,5}$	$e_{5,3}$	$e_{5,4}$
1	0	0	0,5	0	0	1	1	0,5	1	0	0,5

Cromosoma

(b) 3 niveles de energía ($n_{e_{i,j}} = 3$).

Figura 4.1: Ejemplos de codificación de cromosomas para una distribución de energía lineal y distinto número de niveles de energía.

La Figura 4.1 (a) hace referencia a una configuración de red donde los enlaces pueden operar según un número infinito de niveles de energía ($n_{e_{i,j}} = \infty$). El cromosoma resultante está compuesto por genes cuyos valores pueden pertenecer al rango completo del intervalo cerrado $[0, 1]$, siendo 0 la velocidad de operación del nivel de energía más bajo (dormido, *Sleeping*) y 1 la velocidad máxima de operación del enlace (capacidad nominal).

Si asumimos por el contrario un número discreto de niveles de energía, por ejemplo 3 ($n_{e_{i,j}} = 3$), se obtiene otra configuración de red diferente (Figura 4.1 (b)). En este caso, los valores de los genes del cromosoma pertenecen al conjunto de valores $r_{e_{i,j}} = \{0; 0,5; 1\}$ (3 niveles de energía). Como se puede observar, varios de los enlaces se encuentran dormidos, otros operan a la mitad de la velocidad máxima de operación del enlace y el resto se encuentran configurados a su velocidad de operación máxima.

En este ejemplo, ambas configuraciones de red son soluciones potenciales que deben ser evaluadas inicialmente por el algoritmo de comprobación de viabilidad anteriormente indicado. En caso de que se traten de configuraciones de red válidas, se han de evaluar también por la función de *fitness* que se describe en la siguiente sección.

4.1.3. Función de *Fitness*

Una vez que se ha obtenido una solución (configuración de red válida), se evalúa su calidad a través de la función de *fitness*. Puesto que lo que finalmente se pretende obtener es la configuración de red válida que presente un menor consumo de energía para un intervalo de tiempo concreto, se debe encontrar un compromiso entre minimizar el número de enlaces activos y activar una serie de enlaces configurados con bajos niveles de energía de forma que el consumo global sea el menor posible.

En definitiva, el cromosoma que presente un mejor *fitness* será aquél que incluya genes con valores más cercanos a 0 (dormido) que a 1 (velocidad máxima de operación del enlace), además de satisfacer los requisitos de demanda de tráfico y capacidad efectiva de cada uno de los enlaces que componen la red.

La función de *fitness* utilizada para evaluar la bondad un determinado cromosoma que hace referencia a una configuración de red durante un intervalo de tiempo concreto viene dada por la ecuación 3.1, descrita en la Sección 3.1 del Capítulo 3, que calcula el consumo de energía instantáneo de la propia configuración de red para dicho intervalo.

El GA realiza una serie de iteraciones mediante la aplicación de los dos operadores genéticos básicos: cruzamiento y mutación. De este modo, evalúa las soluciones obtenidas y trata de encontrar otras mejores mediante la minimización del valor obtenido por la función de *fitness*. Este proceso, como ya se ha introducido anteriormente, se repite para un número de iteraciones (generaciones) previamente definido o hasta que se cumpla la condición de terminación. En la siguiente sección se describen estos operadores y los valores seleccionados para la ejecución del GA.

4.1.4. Parámetros del Algoritmo Genético

En esta sección se establecen los parámetros y los valores utilizados para que el GA de solución al problema (Tabla 4.1). Además de los parámeros relacionados con las funciones de cruzamiento, mutación y selección, que son iguales para cada ejecución del GA, se han utilizado diferentes combinaciones de tamaño de población y máximo número de generaciones con el objetivo de conocer cuáles son los mejores parámetros en relación a los resultados obtenidos por la función de *fitness* y al tiempo de ejecución requerido para la resolución del problema.

Tabla 4.1: Valores de los parámetros utilizados para el GA.

Parámetro GA	**Valor**
Tamaño de la población	20, 200
Número de generaciones	100, 1000
Tipo de cruzamiento	Un punto
Probabilidad de cruzamiento	10 %
Probabilidad de mutación	5 %
Método de selección	Torneo

Los parámetros invariantes, como son los relacionados con la probabilidad de cruzamiento y de mutación, se establecen normalmente a 10 % y 5 % respectivamente, mientras que para combinar dos individuos de la generación actual y formar un hijo para la siguiente generación se ha seleccionado el denominado cruzamiento en un punto (*one-point crossover*).

Además, se aplica la función de selección por torneo para escoger los individuos que van a sobrevivir y formar parte de la siguiente generación. Esta función selecciona dos individuos de la población de forma aleatoria y compara sus valores de *fitness,* de modo que el individuo con valor más alto pasa a la siguiente generación.

En relación a los valores elegidos para el tamaño de la población y el número de generaciones, se ha realizado un barrido paramétrico en el que se han utilizado distintos pares de valores, del tipo GA_{Cx} = *(tamaño de población, generaciones)*. Concretamente, se han utilizado dos configuraciones de parámetros diferentes: $GA_{C1} = (20, 100)$ y $GA_{C2} = (200, 1000)$. De este modo, el GA se puede ejecutar utilizando estas dos configuraciones diferentes con el objetivo de obtener resultados que nos permitan decidir cuáles son los mejores parámetros de configuración del GA en relación con el compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo.

Por último se determina la finalización del GA si no existe mejora en la función de *fitness* a lo largo de 10 ó 100 generaciones consecutivas respectivamente.

4.2. Optimización por Enjambre de Partículas

Con el objetivo de comparar el rendimiento obtenido al aplicar distintos algoritmos bio-inspirados sobre el problema de ahorro de energía en redes de comunicaciones cableadas, se ha decidido utilizar también el método de optimización por enjambre de partículas (PSO).

PSO es otra forma de computación basada en la biología que se inspira en el comportamiento de las bandadas de pájaros y de los bancos de peces, cuya naturaleza estocástica es parecida a la de los GA [84]. El objetivo principal que persigue es imitar el proceso natural de comunicación y de conocimiento individual dentro de un grupo, donde la opinión de un individuo tiende a converger hacia la opinión del grupo.

Más formalmente, PSO es una meta-heurística basada en población que utiliza un conjunto de soluciones potenciales para resolver un problema de optimización. La población está constituida por un grupo de partículas (soluciones potenciales) que vuelan sobre un espacio de búsqueda multidimensional. La agregación de estas partículas en cada iteración del algoritmo forma lo que se denomina enjambre. Cada partícula del enjambre representa un punto en el espacio de búsqueda del problema y tiene asociado, al igual que los genes en los GA, un valor de *fitness*.

El principal objetivo es, por tanto, explorar este espacio de búsqueda multidimensional de forma eficiente haciendo que el enjambre se mueva hacia la mejor solución encontrada en las iteraciones anteriores (mejor valor de *fitness*) para poder obtener mejores soluciones en cada iteración hasta converger finalmente en una solución con un error mínimo.

Para ello, cada partícula del enjambre conoce tanto la mejor posición que ha encontrado de forma individual ($localbest, p_i$) como la mejor posición que el resto de partículas del enjambre ha encontrado ($globalbest, G$) desde el inicio del algoritmo. La velocidad de la partícula, v_i, y su posición, x_i, se actualizan en cada iteración (tiempo $k+1$) por medio de las ecuaciones 4.2 y 4.3, en las que α_1 y α_2 son constantes de aceleración. La primera constante asocia la propia experiencia de la partícula con su posición actual, mientras que la segunda hace referencia a la interacción social entre las partículas del vecindario. La función de inercia se representa por φ, mientras que γ_{1i} y γ_{2i} son números aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 1 aplicados a la partícula i-ésima.

$$v_i(k+1) = \varphi(k)v_i(k) + \alpha_1[\gamma_{1i}(p_i - x_i(k))] + \alpha_2[\gamma_{2i}(G - x_i(k))] \tag{4.2}$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \tag{4.3}$$

El algoritmo de PSO clásico se muestra en el Algoritmo 4.3. Primeramente se inicializan tanto el iterador como el enjambre de partículas. A continuación, se analizan todas las partículas que pertenecen al enjambre para comparar su valor de *fitness* con los valores de *fitness* de *localbest* y *globalbest*. Se actualizan sus posiciones y velocidades y se repite todo el proceso hasta que se cumple la condición de terminación. Finalmente se devuelve, como salida del algoritmo, la mejor solución encontrada.

Algoritmo 4.3 Descripción en pseudocódigo del algoritmo de PSO clásico.

```
t ← 0
enjambre ← inicializarEnjambre()
while criterioParadaSatisfecho == falso do
  t ← t + 1
  for all particula i en enjambre do
    f ← funcionFitness(i)
    if f < funcionFitness(localbest) then
      localbest = i
      fitnesslocalbest = f
    end if
    if funcionFitness(localbest) < funcionFitness(globalbest) then
      globalbest = localbest
      fitnessglobalbest = fitnesslocalbest
    end if
  end for
  for all particula i en enjambre do
    v ← actualizarVelocidad(i,localbest,globalbest)
    x ← actualizarPosicion(i,v)
  end for
end while
return mejor fitnessglobalbest encontrado
```

El objetivo al utilizar PSO es el mismo que el perseguido al utilizar los GA en la Sección 4.1 del presente capítulo: encontrar configuraciones de red (casi) óptimas que minimicen la energía consumida en función de la demanda de tráfico requerida entre cada par origen-destino.

Por ello, en la siguiente sección se explica la aplicación de PSO para resolver el problema, haciendo hincapié en la descripción de la codificación de las partículas que conforman el enjambre, el modo de operación de la función de *fitness* y los parámetros y valores utilizados para su ejecución.

4.2.1. Codificación de las Partículas

Una topología de red compuesta por n enlaces unidireccionales se representa como un espacio de búsqueda n-dimensional a través del cual el enjambre de partículas se va moviendo en dirección a la solución a encontrar. Una partícula, i, está constituida por una sucesión de n valores (D_j), uno por cada dimensión, que representan la velocidad de operación correspondiente al nivel de energía en el que se encuentran configurados cada uno de los enlaces unidireccionales de la red durante un intervalo de tiempo dado:

$$i = \{D_0, D_1, D_2, ..., D_n\}, \forall D_j \in [0, 1] \in \mathbb{R} \tag{4.4}$$

De hecho, en nuestra propuesta, una partícula (PSO) es equivalente a un cromosoma (GA), ya que ambos elementos representan una configuración de red concreta durante un intervalo de tiempo determinado. Los genes de los cromosomas en el GA son ahora concebidos como valores de las dimensiones del espacio de búsqueda en PSO.

Tal es así, que el Algoritmo 4.2 del presente capítulo puede adaptarse ligeramente para crear una partícula a partir una configuración de red determinada. Además, las partículas pueden representar configuraciones de red con enlaces que soporten un número finito o infinito de niveles de energía, de forma similar a lo descrito en la Sección 4.1.2 del presente capítulo para GA.

4.2.2. Función de *Fitness*

Con el objetivo de determinar si la configuración de red representada por una partícula satisface la correspondiente demanda de tráfico para un intervalo de tiempo concreto, se utiliza de nuevo el algoritmo de encaminamiento SPF.

Si la configuración de red es capaz de encaminar el tráfico con la restricción de no exceder la capacidad efectiva de ningún enlace unidireccional, la partícula asociada se convierte en solución. Del mismo modo que en GA, el algoritmo utilizado para esta comprobación de viabilidad de soluciones presenta una complejidad algorítmica $O(n^4)$ para cada partícula evaluada.

PSO lleva a cabo una serie de iteraciones para encontrar la mejor solución dentro del espacio de búsqueda multidimensional al aplicar la misma función de *fitness* que la utilizada en GA (ecuación 3.1 de la Sección 3.1 del Capítulo 3).

Esta función de *fitness* calcula el consumo de energía instantáneo de la configuración de red representada por la partícula en cuestión durante un intervalo de tiempo concreto. Una vez encontrada la mejor solución para el intervalo de tiempo actual, se repite el proceso para todos los intervalos de tiempo que componen el ciclo diario con el objetivo de obtener las configuraciones de red más apropiadas en términos de ahorro de energía a lo largo del día.

4.2.3. Parámetros de la Optimización por Enjambre de Partículas

La Tabla 4.2 muestra los parámetros y valores utilizados en la implementación PSO de para dar solución al problema. Como en los GA, se han establecido dos conjuntos de parámetros claramente diferenciados: un conjunto de parámetros que toma un valor fijo y se repite para todas las pruebas y otro grupo de parámetros cuyos valores van cambiando según se van realizando diferentes tipos de pruebas. Esta metodología permite, tras una serie de ejecuciones, conocer qué valores de parámetros de configuración de PSO son los mejores en relación con el compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo.

Así pues, se utilizan dos configuraciones de parámetros del tipo PSO_{Cx} = *(tamaño de población del enjambre, número máximo de iteraciones)*: $PSO_{C1} = (5, 100)$ y $PSO_{C2} = (10, 200)$. Los parámetros invariantes son las constantes de aceleración

Tabla 4.2: Valores de los parámetros utilizados para PSO.

Parámetro PSO	**Valor**
Tamaño de la población del enjambre	5, 10
Número máximo de iteraciones	100, 200
Constantes de aceleración	$\alpha_1 = 2{,}1; \alpha_2 = 2{,}1$
Pesos de inercia	$w_{inicial} = 0{,}9; w_{final} = 0{,}6$
Número máximo de iteraciones sin mejora	50, 100

($\alpha_1 = \alpha_2 = 2{,}1$) y los pesos de la función de inercia ($w_{inicial} = 0{,}9; w_{final} = 0{,}6$), mientras que el número máximo de iteraciones sin mejora en la función de *fitness* se establece a un valor de 50 y de 100 iteraciones respectivamente.

Estos valores de parámetros de PSO fueron los que produjeron unos mejores resultados para el problema al que queremos dar solución, tal y como se discutirá en el Capítulo 5 de resultados experimentales.

4.3. Consideraciones sobre la Aplicación de los Algoritmos Bio-inspirados

En esta sección se explican las consideraciones necesarias para una correcta ejecución de los algoritmos bio-inspirados. Inicialmente se indican los recursos y las herramientas que se han utilizado para su implementación y posterior ejecución. Seguidamente, se explica el problema relacionado con el coste computacional que supone la evaluación de la función de *fitness* en ambos algoritmos. Para dar solución a este problema, se ha propuesto una metodología que permite reducir en gran medida el número de estas evaluaciones y el consiguiente tiempo de computación empleado.

4.3.1. Recursos y Herramientas Utilizados

La implementación de ambas meta-heurísticas se ha realizado en un entorno de Matlab sobre el sistema operativo Linux y su ejecución se ha llevado a cabo en una máquina Intel de 8 núcleos (E5530 @ 2,4 GHz) con 12 GB de RAM.

Se ha utilizado la herramienta Matlab Global Optimization ToolboxTM para implementar el GA a través de la función *ga*, que calcula el mínimo de una función mediante la utilización de un algoritmo genético creado por la función *gaoptimset* [85]. Por su parte, PSO se ha implementado mediante el uso de PSOt, una herramienta específica de optimización por enjambre de partículas para ser utilizada también con Matlab [86].

4.3.2. Coste Computacional de la Evaluación de la Función de *Fitness*

Para poder conseguir una reducción significativa del consumo energético de la red mediante la explotación de la variación de la carga de tráfico a lo largo del día, las ejecuciones de ambos algoritmos bio-inspirados se realizan de forma individual sobre cada uno de los intervalos de tiempo que constituyen el ciclo diario.

Por otro lado, se ha comentado anteriormente que para que el algoritmo en cuestión pueda llegar a la solución, es necesario que realice una serie de evaluaciones de la función de *fitness* con el objetivo de comprobar la bondad tanto de los cromosomas como de las partículas involucradas. Sin embargo, el número de estas evaluaciones puede llegar a ser elevado, lo que derivaría en un incremento en el tiempo de cómputo que podría llegar a ser prohibitivo para topologías de gran tamaño.

Como ejemplo, se ejecuta el GA sobre la topología de red más simple de las consideradas en los resultados experimentales (42 enlaces unidireccionales con funciones y distribuciones de energía lineales). La configuración de parámetros considerada para ser utilizada por el GA en este ejemplo es aquélla que supone un espacio de búsqueda más sencillo, es decir, $GA_{C1} = (20, 100)$. Con estas características, el GA necesita realizar un total de 2.004 evaluaciones de la función de *fitness* para poder llegar a la solución sobre el primer intervalo del ciclo diario, es decir, el correspondiente a las 14:00 horas. En total se necesitan 15 segundos y 1.288 evaluaciones de media por intervalo, lo que se traduce en un total de 72 minutos y 370.944 evaluaciones para poder evaluar el día completo.

Si se aplica ahora la configuración $GA_{C2} = (200, 1000)$ sobre la topología más compleja de las evaluadas en el trabajo (367 enlaces), el número medio de evaluaciones por intervalo aumenta hasta 19.246 y el tiempo de cómputo se incrementa hasta 724 segundos. En total, se necesitan casi 58 horas (en torno a 2 días y medio) y más de 5 millones y medio de evaluaciones de la función de *fitness* para poder dar solución al ciclo diario completo.

Por ello, es necesario proponer una metodología que permita reducir el número de evaluaciones de la función de *fitness* y, en consecuencia, el tiempo necesario para la ejecución de ambos algoritmos sin que la calidad de las soluciones se vea afectada.

4.3.3. Reducción del Número de Evaluaciones de la Función de *Fitness*

Para conseguir una reducción en el número de evaluaciones de la función de *fitness*, la metodología propuesta intenta aprovechar los resultados obtenidos en las ejecuciones de los intervalos previos con el objetivo de mejorar los resultados a obtener sobre el intervalo actual. Esta acción se realiza debido a la fuerte correlación entre las matrices de tráfico de los intervalos adyacentes a lo largo del día [87]. La Figura 4.2 describe el conjunto de pasos seguidos por esta metodología.

Inicialmente se calculan los resultados sobre el primer intervalo de tiempo (que se corresponde con las 14:00 horas) para obtener la mejor configuración de red en términos de ahorro de energía (1). Para ello, es necesario evaluar la función de *fitness*

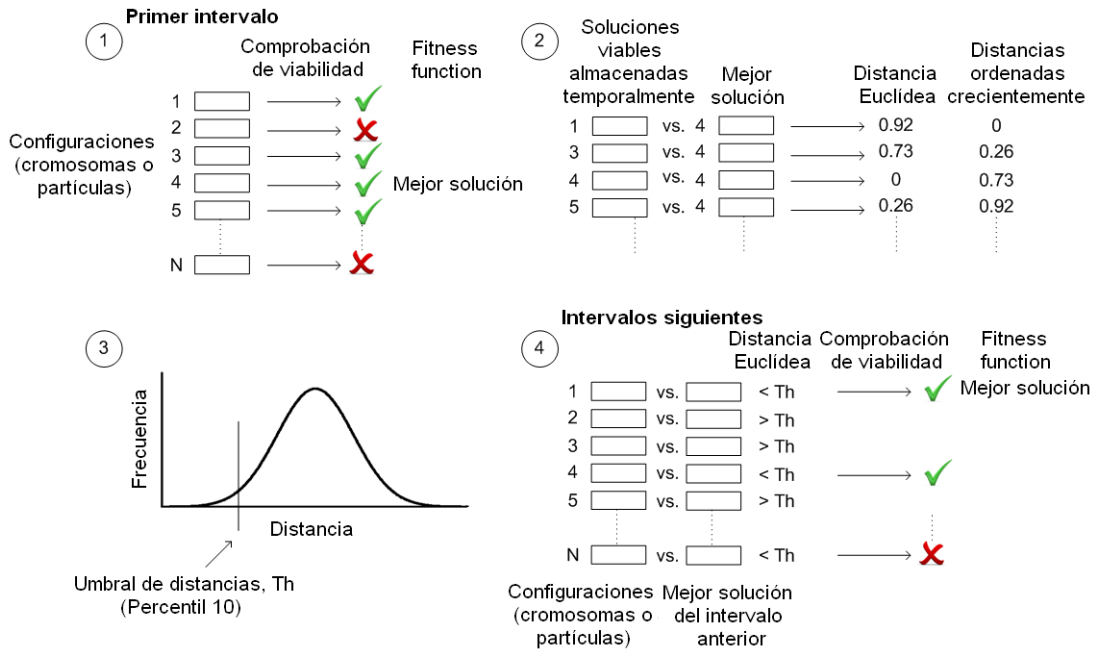


Figura 4.2: Esquema de la metodología utilizada para reducir el número de evaluaciones de la función de *fitness*.

un conjunto de veces, mientras que todas las configuraciones de red que satisfacen la demanda de tráfico actual (soluciones potenciales) se almacenan momentáneamente con la finalidad de ser utilizadas en pasos futuros.

Una vez que se dispone del conjunto de soluciones del primer intervalo (incluida la mejor solución), se procede al cálculo de la distancia existente entre cada solución y la mejor solución (2). Para ello, tanto los cromosomas como las partículas son concebidos como arrays n-dimensionales cuyo índice hace referencia a una dimensión del espacio de búsqueda n-dimensional. A continuación, se ordenan las distancias calculadas y se asume que siguen una distribución normal (3).

Por último, se selecciona el percentil 10 como umbral de distancias para el resto de intervalos de tiempo a evaluar. Con esto, se evita evaluar aquellas configuraciones de red (cromosomas o partículas) que se encuentren localizadas muy lejos de la mejor solución encontrada en el intervalo previo (4). Este umbral de distancias descarta una gran cantidad de individuos que nunca llegarán a convertirse en la mejor solución para el intervalo actual. Cuando el proceso completo finaliza, se obtienen las configuraciones de red más apropiadas en términos de ahorro de energía a lo largo del día.

De esta forma, el número de configuraciones de red y en consecuencia de funciones de *fitness* a evaluar se ve reducido notablemente, lo que se traduce en una mejora en el tiempo de cómputo empleado. Concretamente, para el caso más simple de los expuestos en el punto anterior, se consigue reducir el número de evaluaciones en un 35 % y el tiempo de cómputo en un 76 %, mientras que para el caso más complejo el porcentaje de reducción alcanza el 41 % en el número de evaluaciones y el 80 % en el tiempo de cómputo. Este beneficio obtenido gracias a la reducción del número de

evaluaciones de la función de *fitness* se traduce en una ligera penalización de un 1,4 % sobre la bondad de los resultados.

4.4. Análisis del Compromiso Ahorro de Energía-Tiempo de Cómputo

Tras explicar las consideraciones necesarias para la correcta ejecución de ambas meta-heurísticas, en esta sección se pretende cuantificar el coste computacional de la resolución del problema. Para realizar este análisis, se ha asignado un amplio conjunto de valores a los parámetros de configuración variables tanto en GA como en PSO (Secciones 4.1.4 y 4.2.3 del presente capítulo respectivamente).

Una vez conocido el tiempo de cómputo necesario por ambos métodos para alcanzar la solución, se pretende buscar un compromiso entre la cantidad de energía que se puede ahorrar y el tiempo empleado para ello. En definitiva, se trata de responder a la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los mejores valores de los parámetros de los algoritmos bio-inspirados para obtener la mejor solución en términos de ahorro de energía y tiempo de cómputo?.

Con el objetivo de conocer el impacto que produce el valor del criterio de parada (número de generaciones en GA y número máximo de iteraciones en PSO) y el tamaño de la población sobre el ahorro de energía y el tiempo de cómputo en ambos algoritmos, se ha realizado un análisis cuyos resultados se reflejan en las figuras que se explican a continuación.

La Figura 4.3 muestra los resultados del análisis donde se puede observar la influencia de las dos variables independientes a comparar (número de generaciones y tamaño de la población) sobre las variables dependientes (ahorro de energía y tiempo de cómputo) si el algoritmo bio-inspirado utilizado es el GA. Es deseable que las dos líneas sean lo más verticales posibles, ya que, en ese caso, el ahorro de energía aumentaría en gran medida mientras que únicamente se emplearía un tiempo mínimo para conseguirlo.

Por tanto, el hecho de incrementar el valor del número de generaciones en GA es más interesante que incrementar el tamaño de la población desde el punto de vista del compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo. Con esta información, se puede elegir la bondad de los resultados y estimar el tiempo para realizar los cálculos.

Para el caso de PSO, el criterio de parada correspondiente (número máximo de iteraciones) muestra mejores resultados para dicho compromiso que la variable correspondiente a la población (Figura 4.4). Finalmente y como resumen, la Figura 4.5 indica que es mejor incrementar el valor del criterio de parada que incrementar el tamaño de la población en ambos algoritmos. Además, PSO proporciona mejores resultados que GA para dicho compromiso, mientras que si únicamente consideramos la cantidad de energía ahorrada, GA presenta los mejores resultados.

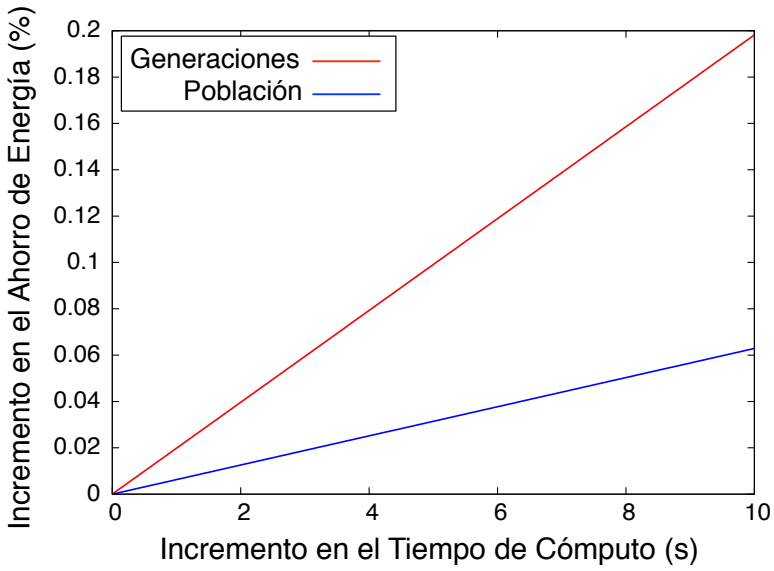


Figura 4.3: Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo en GA.

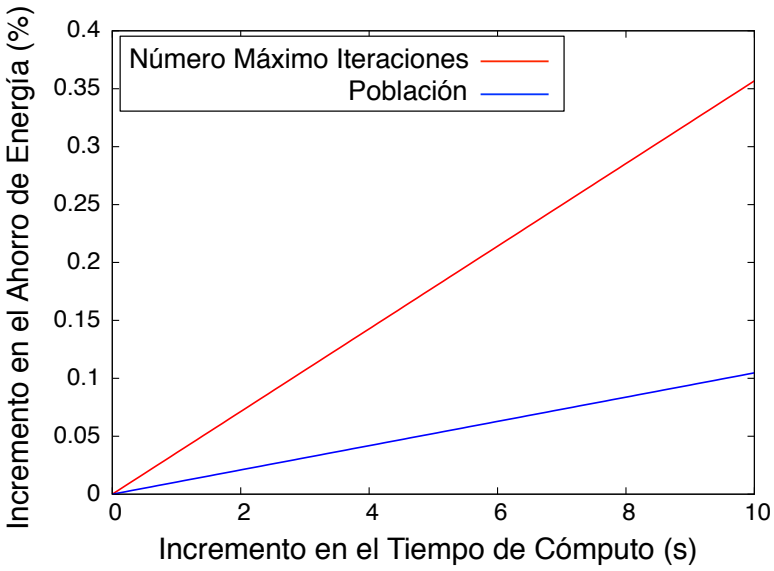


Figura 4.4: Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo en PSO.

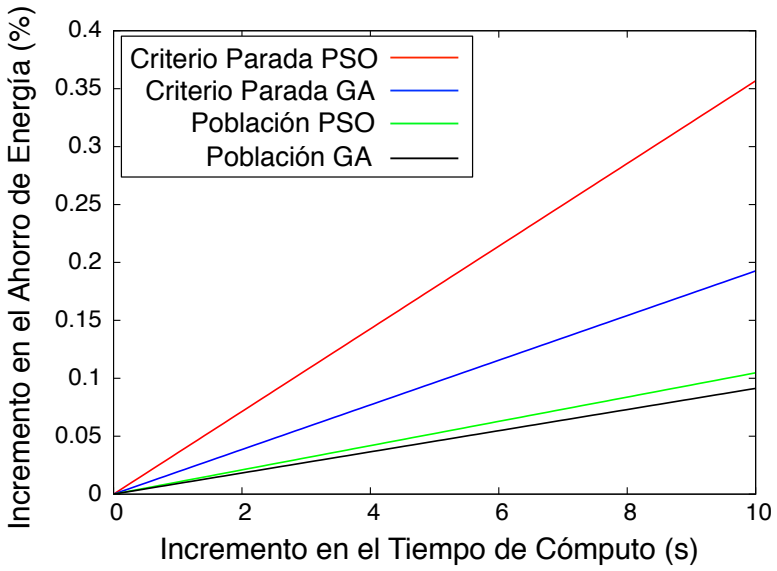


Figura 4.5: Compromiso ahorro de energía-tiempo de cómputo para ambos algoritmos bio-inspirados.

4.5. Conclusiones

Una vez definido el problema en el capítulo anterior, se evalúan las distintas técnicas de optimización que se pueden utilizar para resolverlo. Debido a la propia naturaleza del problema (de tipo *NP-hard*), su resolución mediante ILP únicamente obtuvo resultados para redes de tamaño pequeño [76]. Esta situación nos ha llevado a utilizar meta-heurísticas basadas en la computación bio-inspirada (GA y PSO) aunque con ello se pierda la garantía de obtención de soluciones óptimas proporcionada por ILP.

Con el objetivo de evaluar el compromiso entre la cantidad de energía que se puede ahorrar mediante la aplicación de estas meta-heurísticas y el tiempo de cómputo necesario para su ejecución, se ha realizado un análisis cuyos resultados indican que de los parámetros de configuración necesarios para la ejecución de ambos algoritmos bio-inspirados, el hecho de incrementar el criterio de parada es más interesante que incrementar el tamaño de la población. Además, aunque PSO proporciona mejores resultados que GA en este ámbito, si se considera únicamente la cantidad de energía ahorrada, son los GA los que presentan los mejores resultados.

Una vez explicados los métodos utilizados para resolver el problema definido en el capítulo anterior, en el siguiente capítulo se analizan y discuten los resultados experimentales obtenidos tras su ejecución.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

> "Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo."
>
> Albert Einstein

Con el objetivo de identificar las oportunidades de ahorro de energía y poder proporcionar una respuesta práctica al número de niveles de energía que son suficientes para conseguir un ahorro significativo de energía en redes cableadas, se ha seguido una metodología de obtención de resultados basada en la ejecución de simulaciones sobre diferentes escenarios de red.

Inicialmente se especifica tanto el tipo de tráfico que se inyecta en la red como las redes utilizadas. A continuación se describe la metodología seguida para realizar estos experimentos, cuyos resultados se analizan y discuten para poder extraer una serie de conclusiones. Finalmente se incluye una comparación con otras propuestas existentes en la literatura que tratan de dar respuesta al problema de la eficiencia energética en redes cableadas.

5.1. Carga de Tráfico

Para evaluar la propuesta presentada en capítulos anteriores, se ha utilizado un conjunto de datos correspondientes a una serie de matrices de tráfico para las redes Géant [88], NSFNet [89] y AT&T [90].

Para la primera red, Géant, se han utilizado una serie de matrices de tráfico reales tomadas a intervalos de 15 minutos durante cuatro meses de observación. Para NSFNet y AT&T se ha aplicado, sin embargo, una carga de tráfico sintética en base a la función de escalado de [66], donde se establece una duración para los intervalos de 5 minutos.

La Figura 5.1 describe la variación de tráfico agregada a lo largo del día para cada una de las tres topologías de red utilizadas. En ella se puede observar que existe un predominio de la componente diurna sobre la nocturna, patrón que se repite día tras día [87].

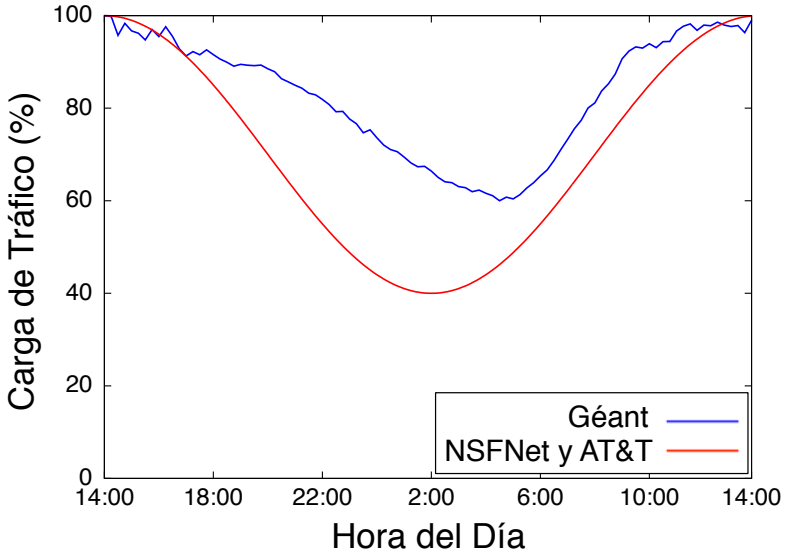


Figura 5.1: Porcentaje de carga de tráfico agregado a lo largo del día para las redes NSFNet, Géant y AT&T.

En cuanto a las características topológicas, la Tabla 5.1 muestra el número de nodos, el número de enlaces y la distribución de velocidades por número de enlaces para cada una de las redes consideradas.

Tabla 5.1: Características de los enlaces de las tres redes evaluadas.

Topología	**Número de nodos**	**Número de enlaces**	**Número de enlaces por velocidad de operación**
NSFNet	14	42	42 enlaces a 155 Mbps
Géant	23	74	32 enlaces a 10 Gbps
			34 enlaces a 2,4 Gbps
			8 enlaces a 155 Mbps
AT&T	154	367	10 enlaces a 9,6 Gbps
			90 enlaces a 2,5 Gbps
			261 enlaces a 622 Mbps
			6 enlaces a 45 Mbps

5.2. Metodología

Asumiendo el consumo de energía del equipamiento de red de [12], los escenarios están constituidos por un conjunto de *routers* conectados entre sí por una serie de enlaces unidireccionales que se encuentran configurados con un nivel de energía concreto. Estos enlaces unidireccionales pueden cambiar de nivel de energía de forma independiente para adaptar su velocidad de operación a la carga de la red. El consumo de energía de un enlace se calcula en función del nivel de energía con el que se encuentra configurado y de la función de energía utilizada (lineal o logarítmica, Figura 3.6 del Capítulo 3).

Con el objetivo de conocer el impacto que supone el hecho de utilizar enlaces que dispongan de la posibilidad de operar según un determinado número niveles de energía, se realizan un conjunto de pruebas en las que se ejecutan ambos métodos bio-inspirados una serie de veces variando para ello el número de niveles de energía, el tipo de función y de distribución de energía de los enlaces y los parámetros de configuración de los algoritmos.

Concretamente, para realizar un análisis estadístico completo, se han realizado 50 ejecuciones independientes para cada tupla del tipo $(T, r_{e_{i,j}}, f_{e_{i,j}}, CA)$ con T: Topología, $r_{e_{i,j}}$: Distribución de Energía, $f_{e_{i,j}}$: Función de Energía, CA: Configuración del Algoritmo. En la Tabla 5.2 se muestran los posibles valores que pueden tomar cada uno de los componentes de la tupla que caracteriza a un tipo de prueba concreto.

Tabla 5.2: Posibles valores para los componentes de la tupla $(T, r_{e_{i,j}}, f_{e_{i,j}}, CA)$.

Elemento de la tupla $(T, r_{e_{i,j}}, f_{e_{i,j}}, CA)$	**Descripción**	**Posibles valores**
T	Topología	NSFNet, Géant, AT&T
$r_{e_{i,j}}$	Tipo de distribución de energía	lineal, exponencial
$f_{e_{i,j}}$	Tipo de función de energía	lineal, logarítmica
CA	Configuración del algoritmo	GA_{C1}, GA_{C2}, PSO_{C1}, PSO_{C2}

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se comparan con el caso en el que se asume un número infinito de niveles de energía por enlace ($n_{e_{i,j}} = \infty$), es decir, el caso en el que los enlaces de la red pueden configurarse con el nivel de energía más apropiado en cada momento. Este sería el caso ideal (aunque muy poco realista) en el que la red consumiría la menor cantidad de energía posible y se obtendrían las mayores posibilidades de ahorro energético.

Por último, se realiza un análisis multivariante (regresión de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)) para conocer cuál es el impacto que tiene cada variable identificada sobre la cantidad de energía que se puede ahorrar con esta aproximación.

5.3. Análisis y Discusión de Resultados

En esta sección se procede a explicar el análisis de los resultados experimentales obtenidos al aplicar la metodología expuesta en la sección anterior.

Inicialmente se muestra la Figura 5.2 (a), que describe el porcentaje de ahorro de energía instantáneo obtenido por el GA a lo largo del día para el siguiente escenario en el que los enlaces pueden soportar distinto número de niveles de energía: (NSFNet, Lineal, Lineal, GA_{C2})[1].

Se puede observar que para ahorrar una cantidad de energía significativa (alrededor de un 22 %), basta con utilizar un número de niveles de energía igual a 4, ya que un número mayor de niveles de energía apenas supone grandes ahorros si lo comparamos con el caso en el que se asume un número infinito de niveles de energía.

Si por el contrario se utiliza una función de energía logarítmica (NSFNet, Lineal, Logarítmica, GA_{C2}), el ahorro de energía conseguido es ligeramente inferior (en torno a un 18 %), tal y como se puede observar en la Figura 5.2 (b). En este caso, la diferencia de utilizar un número de niveles de energía mayor a 4 es similar a la obtenida para el caso en que se utiliza una función de energía lineal.

Al aplicar las mismas tuplas anteriores sobre Géant se consigue un ligero incremento en el ahorro energético en comparación con NSFNet, tal y como se puede observar en las Figuras 5.3 (a) y 5.3 (b). Sin embargo, el hecho de utilizar más de 4 niveles de energía tampoco resulta en beneficios notables con respecto a establecer un límite superior igual a 4. La aplicación del resto de posibles combinaciones de tuplas con los valores descritos en la Tabla 5.2 da como resultado un conjunto de gráficas muy similares.

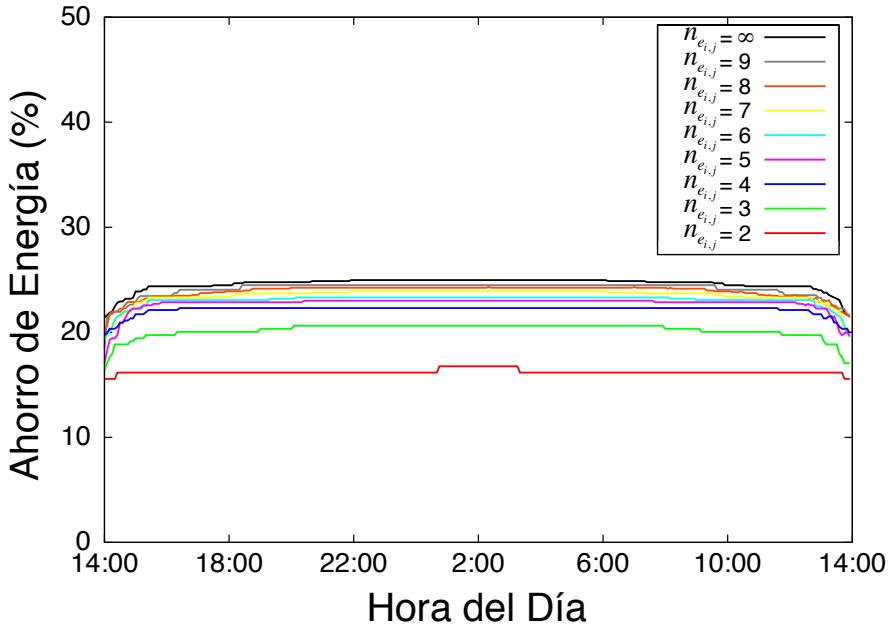
La Tabla 5.3 muestra la media, la desviación estándar relativa y los mejores valores de porcentaje de ahorro de energía tras 50 ejecuciones independientes realizadas en las mismas condiciones que las pruebas llevadas a cabo para obtener la Figura 5.2 (a), en las que se pretende reducir el consumo de la red NSFNet.

Tabla 5.3: Resultados experimentales para NSFNet, con una distribución de energía lineal, una función de energía lineal y la configuración GA_{C2}.

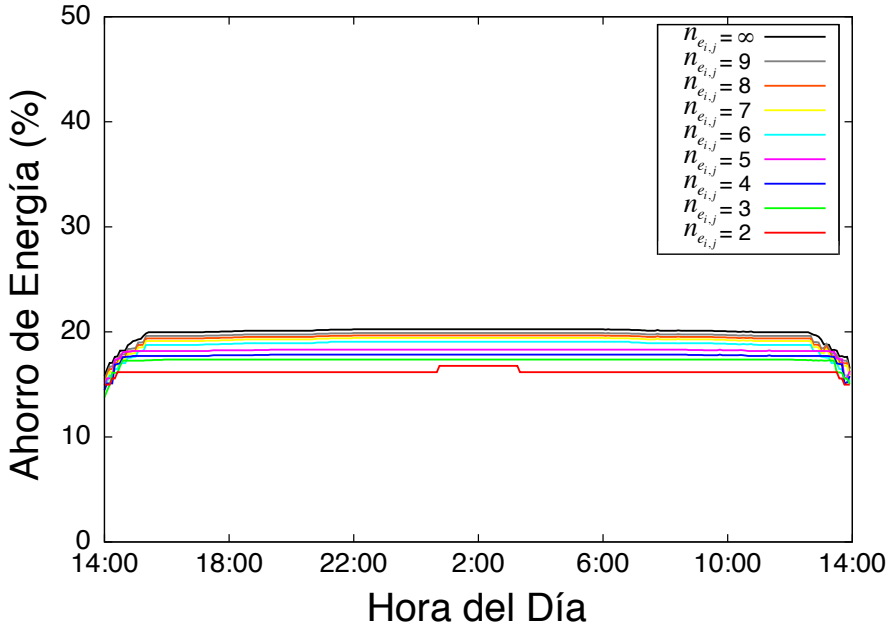
Número de niveles de energía ($n_{e_{i,j}}$)	**Porcentaje de ahorro de energía (%)**		
	Media	**Desv. estándar**	**Mejor valor**
2	16,247	0,31	16,251
3	20,251	0,17	20,254
4	22,213	0,14	22,217
5	22,73	0,24	22,733
6	22,846	0,39	22,851
7	23,296	0,5	23,301
8	23,982	0,19	23,985
9	24,047	0,27	24,054
∞	24,598	0,35	24,608

Una vez que se conocen los valores de ahorro de energía obtenidos al utilizar diferente número de niveles de energía para una tupla concreta, se procede a calcular los

[1]Utilizamos este ejemplo ya que, según los datos de la Tabla 5.4, se trata de la tupla que mejor resultados produce para esta topología de red.

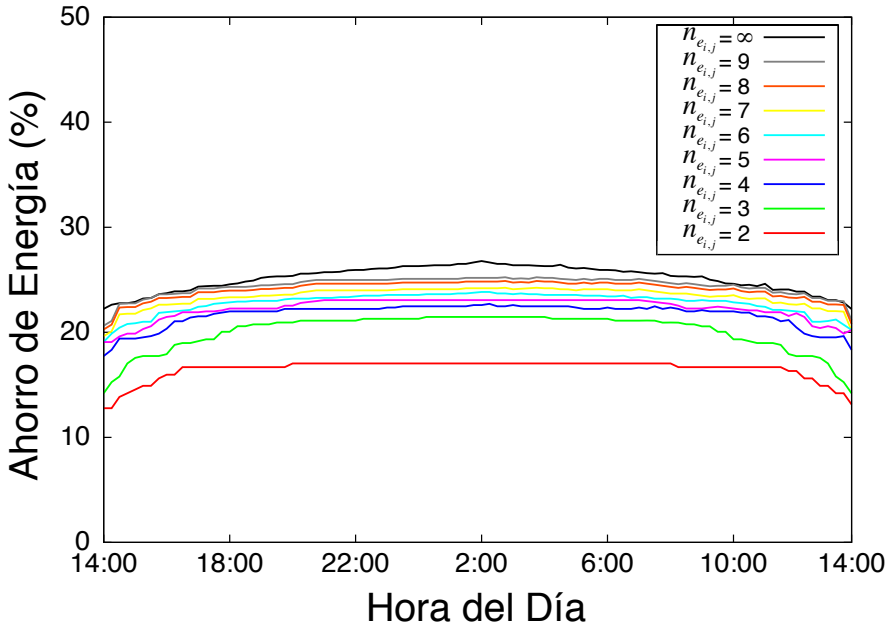


(a) Función de energía lineal.

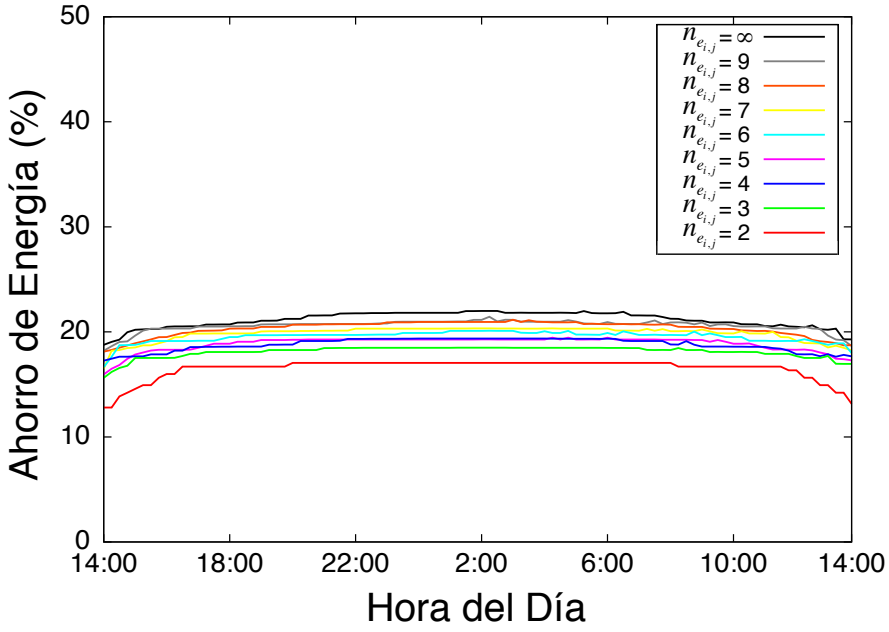


(b) Función de energía logarítmica.

Figura 5.2: Porcentaje de ahorro de energía instantáneo para NSFNet utilizando una distribución de energía lineal y la configuración GA_{C2}.



(a) Función de energía lineal.



(b) Función de energía logarítmica.

Figura 5.3: Porcentaje de ahorro de energía instantáneo para Géant utilizando una distribución de energía lineal y la configuración GA_{C2}.

resultados para cada una de las posibles tuplas en las que NSFNet actúa como topología utilizada. La Tabla 5.4 muestra los resultados de estas tuplas, donde los valores de las celdas hacen referencia al porcentaje de ahorro de energía medio conseguido por cada número de niveles de energía (columna *Media* de la Tabla 5.3).

Tabla 5.4: Resultados experimentales: evaluación del GA para la red NSFNet.

$r_{e_{i,j}}$	$f_{e_{i,j}}$	CA	**Porcentaje de ahorro de energía (%) en función de $n_{e_{i,j}}$**								
			2	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	∞
Lin	Lin	GA_{C1}	15,522	19,526	21,465	22,032	22,187	22,776	23,174	23,322	24,008
		GA_{C2}	16,247	**20,251**	**22,213**	**22,73**	**22,846**	**23,296**	**23,982**	**24,047**	**24,598**
	Log	GA_{C1}	15,521	16,585	17,021	17,408	17,988	18,598	18,583	18,756	20,262
		GA_{C2}	16,246	17,374	17,744	18,133	18,711	19,334	19,359	19,823	20,923
Exp	Lin	GA_{C1}	14,209	14,883	16,701	17,119	17,534	18,057	18,295	18,724	19,261
		GA_{C2}	14,956	15,534	17,498	17,912	18,214	18,812	18,998	19,456	19,949
	Log	GA_{C1}	17,422	17,959	19,093	19,572	19,999	20,182	20,501	20,684	21,139
		GA_{C2}	**18,178**	18,678	19,845	20,238	20,621	20,902	21,267	21,397	21,879

Se ha aplicado la prueba de Kolmogorov-Smirnov sobre cada tupla para comprobar si los valores de los resultados obtenidos siguen una distribución normal o no. Los pequeños valores de p resultantes ($< 0{,}05$ en todos los casos) indican que los resultados obtenidos pueden considerarse como estadísticamente significativos.

De la Tabla 5.4 se extrae también que la tupla (NSFNet, Lineal, Lineal, GA_{C2}) es la que produce mejores resultados en términos de ahorro de energía para la topología NSFNet cuando se aplica el método basado en GA. En este punto hay que indicar que este análisis se ha repetido para cada una de las tres topologías (NSFNet, Géant y AT&T) y los dos algoritmos bio-inspirados considerados (GA y PSO).

5.3.1. Validación de los Resultados

Considerando la naturaleza no determinística de los dos algoritmos bio-inspirados utilizados, se ha llevado a cabo un análisis estadístico con el objetivo de realizar una comparación entre ambos métodos.

Para ello, se ha aplicado la prueba no paramétrica de los rangos con signo de Wilcoxon, que permite comparar la media de dos muestras relacionadas y determinar si existen diferencias entre ellas. En nuestro caso se pretenden evaluar las diferencias por pares del ahorro de energía obtenido para todas las posibles combinaciones (tuplas) de GA y PSO. En otras palabras, la prueba de Wilcoxon primero realiza una comparación de los resultados obtenidos para la tupla (NSFNet, Lineal, Lineal, GA_{C1}) con los obtenidos para la tupla (NSFNet, Lineal, Lineal, PSO_{C1}) asumiendo 2 niveles de energía. A continuación se lleva a cabo otra prueba de Wilcoxon para comparar los resultados de (NSFNet, Lineal, Lineal, GA_{C1}) con los de (NSFNet, Lineal, Lineal, PSO_{C2}) para 2 niveles de energía y así sucesivamente.

Por tanto, se han realizado una gran cantidad de pruebas no direccionales bilaterales (o de dos colas) para comparar los resultados obtenidos por todas las posibles

combinaciones existentes entre los dos algoritmos. La Figura 5.4 muestra un diagrama de frecuencias en el que se representa el número de veces que se obtiene un nivel de significación determinado para una prueba concreta. Para obtener el valor del nivel de significación se ha calculado previamente el valor de $z - ratio$ para cada prueba de Wilcoxon.

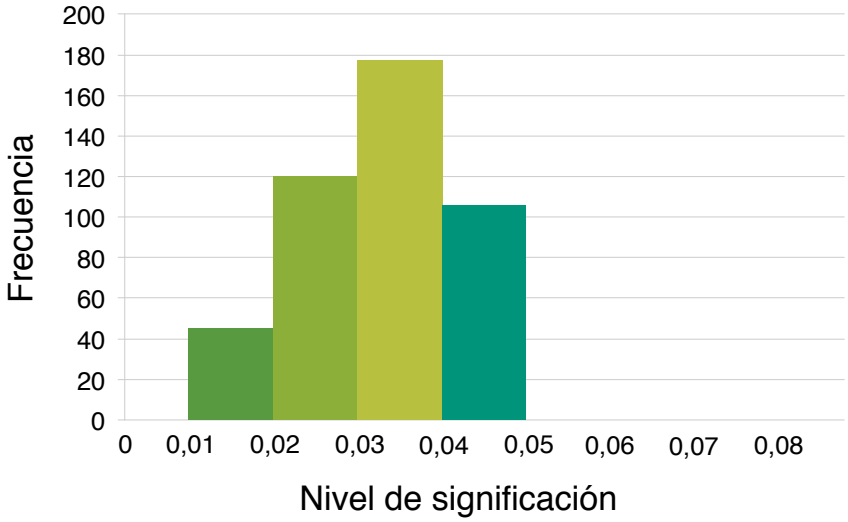


Figura 5.4: Diagrama de frecuencias de los niveles de significación en las pruebas de Wilcoxon.

Se puede observar que todos los valores del diagrama de frecuencias se encuentran por debajo del nivel de significación de 0,05, lo que nos lleva a afirmar que todos los resultados de las pruebas de Wilcoxon son estadísticamente significativos. De hecho, la preponderancia de signos positivos entre los resultados de rangos con signo para cada prueba sugiere que el GA tiende a proporcionar mejores resultados que PSO en términos de ahorro de energía.

La Figura 5.5 muestra un gráfico acumulativo que relaciona el número de niveles de energía utilizados, $n_{e_{i,j}}$, con el porcentaje de ahorro de energía logrado por las distintas tuplas. Los resultados indican que el porcentaje de ahorro de energía para 2, 3 y 4 niveles de energía crece de manera cuasi-uniforme para cada caso. Sin embargo, se puede comprobar que si se utilizan más de 4 niveles de energía se obtiene una mínima mejora en el ahorro energético.

Para confirmar estadísticamente esta observación, se ha realizado un análisis multivariante (regresión de MCO) con los resultados de ambos algoritmos de forma que podamos conocer el impacto de cada variable independiente: grado de conectividad, distribución de energía, función de energía y número de niveles de energía sobre la variable dependiente: ahorro de energía.

La Tabla 5.5 recoge los resultados obtenidos para la regresión de MCO realizada, con un valor de R^2 igual a 0,944. Todas las variables independientes del análisis son categóricas excepto el grado de conectividad, que es continuo.

Los coeficientes no estandarizados (columna B) indican que un incremento en una unidad en el grado de conectividad está asociado de forma significativa con un

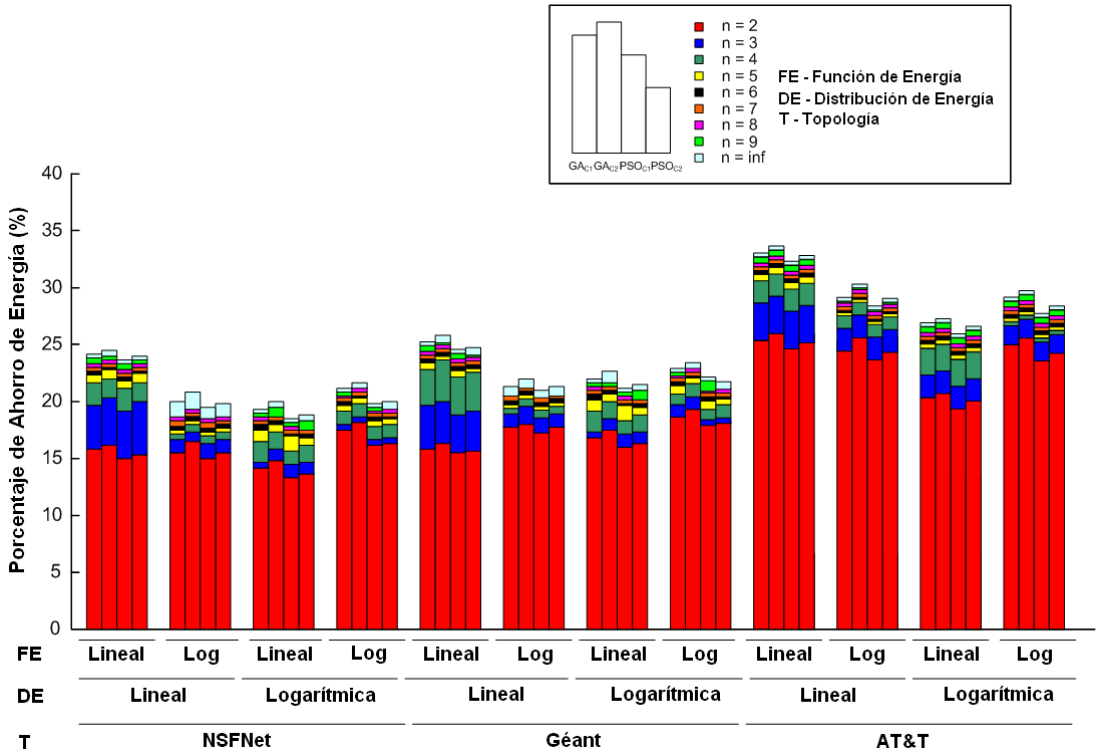


Figura 5.5: Porcentaje de ahorro de energía de las distintas combinaciones de tuplas en función del número de niveles de energía.

Tabla 5.5: Resultados de la regresión[A]

Modelo	Tipo de Variable	Coefs. no Estandarizados B	Coefs. no Estandarizados Error Est.	Coefs. Estand. Beta	t	Sig.
1 (Constante)		-22,283	2,303		-9,677	0,000
GradoConectividad	Continua	7,387	0,735	0,121	10,045	0,000
DistribuciónEnergíaExp	Categórica	-0,843	0,160	-0,064	-5,286	0,000
FunciónEnergíaLog	Categórica	-0,514	0,160	-0,039	-3,224	0,001
NivelesEnergía2	Categórica	16,969	0,357	0,768	47,556	0,000
NivelesEnergía3	Categórica	18,701	0,357	0,846	52,409	0,000
NivelesEnergía4	Categórica	20,201	0,357	0,914	56,611	0,000
NivelesEnergía5	Categórica	20,684	0,357	0,936	57,965	0,000
NivelesEnergía6	Categórica	21,030	0,357	0,951	58,936	0,000
NivelesEnergía7	Categórica	21,458	0,357	0,971	60,136	0,000
NivelesEnergía8	Categórica	21,692	0,357	0,981	60,790	0,000
NivelesEnergía9	Categórica	21,886	0,357	0,990	61,336	0,000
NivelesEnergíaInf	Categórica	22,664	0,357	1,025	63,515	0,000

[A] Variable Dependiente: AhorroEnergía

Variables de Referencia: DistribuciónEnergíaLineal, FunciónEnergíaLineal, NivelesEnergía1

incremento de más del 7 % en el ahorro de energía. Este valor supone una relación directamente proporcional entre el grado de conectividad y la cantidad de ahorro de energía, es decir, a mayor grado de conectividad, mayor ahorro de energía respecto al consumo de energía global de la red.

Además, tanto la distribución de energía exponencial como la función de energía logarítmica tienen una influencia pequeña y negativa, aunque estadísticamente significativa, sobre el ahorro de energía con respecto a la distribución y función de energía lineales.

Se puede observar también el porcentaje de ahorro de energía obtenido cuando se utiliza un número determinado de niveles de energía. Estos valores se comparan con el caso en el que no se utilizan mecanismos de ahorro energético por parte de la red, es decir, el caso en el que únicamente existe un nivel de energía (variable *NivelesEnergía1*, enlace 100 % activo).

El uso de dos niveles de energía supone alrededor del 17 % de ahorro con respecto a la situación en la que no se utilizan técnicas de ahorro de energía. Además, se puede observar que las mayores mejoras en términos de ahorro entre dos niveles adyacentes se logran cuando el número de niveles es inferior a 4. Por ello, podemos afirmar que el incremento de niveles de energía por encima de este número no supone grandes beneficios en relación a la reducción del consumo energético global de la red.

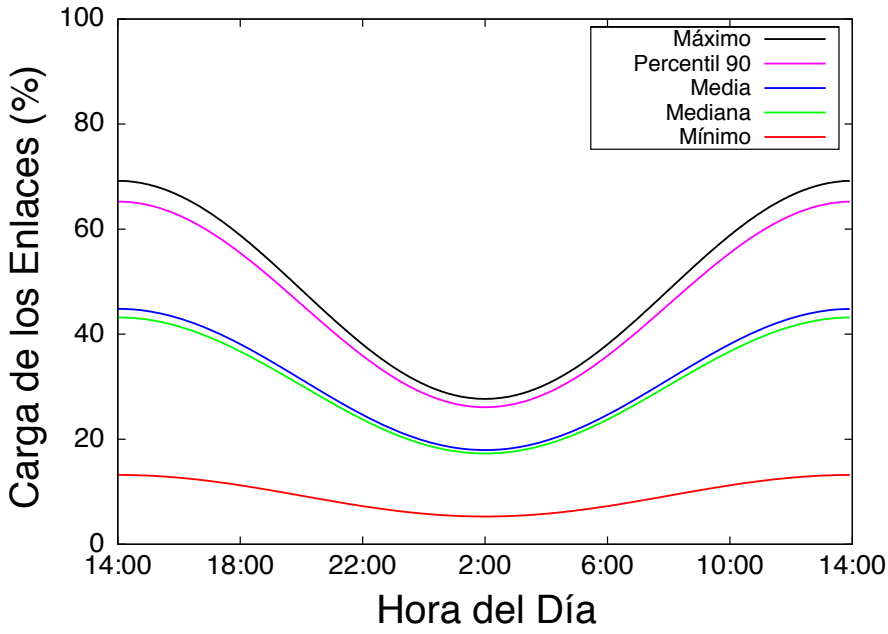
5.3.2. Variación en la Carga de los Enlaces tras Aplicar los Mecanismos de Reducción de Consumo Energético

La implementación de los algoritmos bio-inspirados utilizados proporciona también la carga de tráfico de cada enlace de la red tanto antes como después de aplicar los mecanismos de reducción del consumo de energía en redes cableadas.

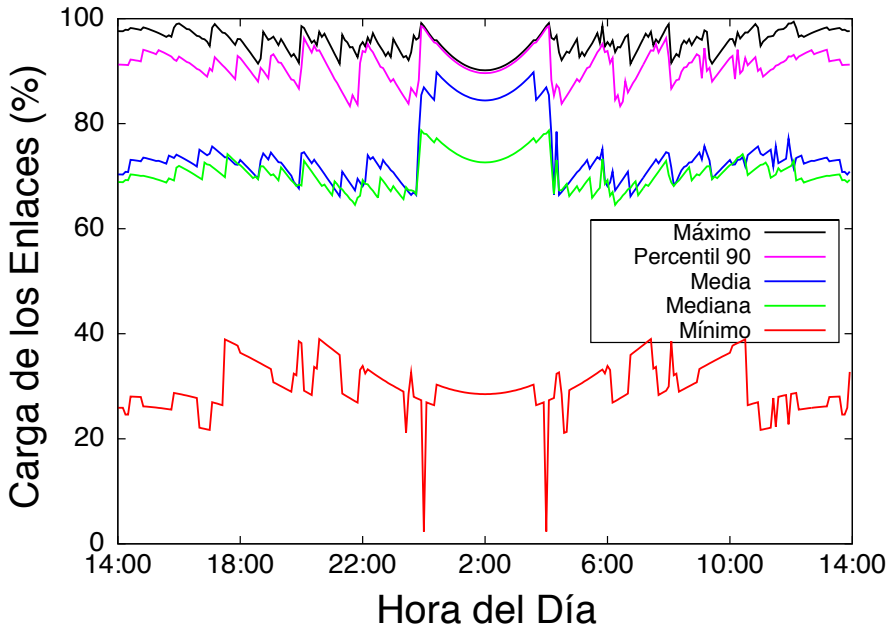
Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran una serie de estadísticos descriptivos que permiten dar a conocer la diferencia existente entre la carga de los enlaces antes y después de ejecutar estos mecanismos para las redes NSFNet y Géant respectivamente.

Las demandas de tráfico entre cada par origen-destino son encaminadas por el algoritmo SPF antes y después de realizar la optimización, de forma que cada enlace se encuentra cargado con un determinado porcentaje. Si únicamente consideramos los valores correspondientes a la media y a la mediana, ocurre que algunos enlaces de la red se cargan en gran medida mientras que el resto de enlaces son propensos a estar ligeramente cargados.

Son los valores correspondientes al máximo y al percentil 90 los que hacen referencia a los enlaces más cargados. Tal y como se puede observar en las distintas figuras, ninguno de los enlaces entra en condición de saturación y por consiguiente no se superan sus capacidades máximas.

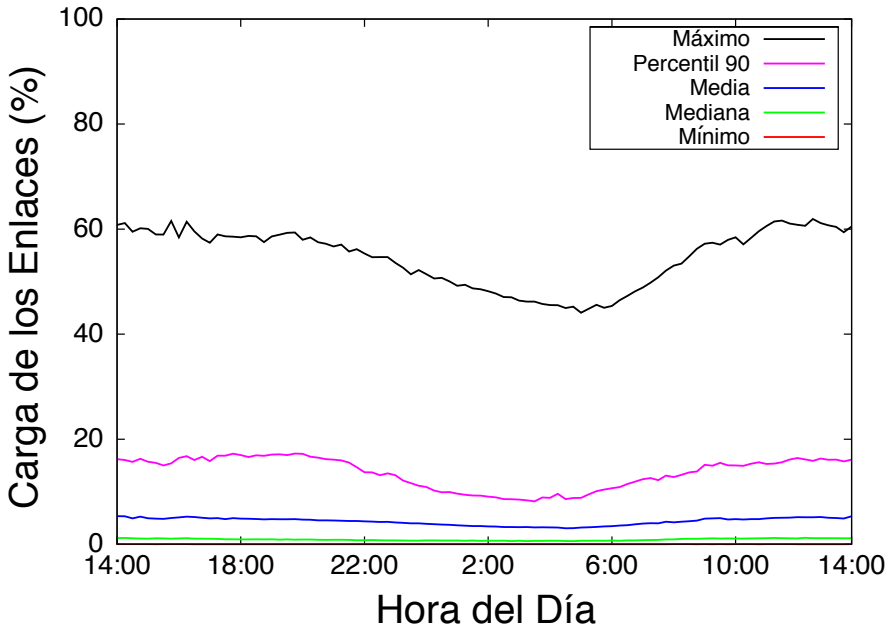


(a) Antes de aplicar los mecanismos de reducción de consumo energético.

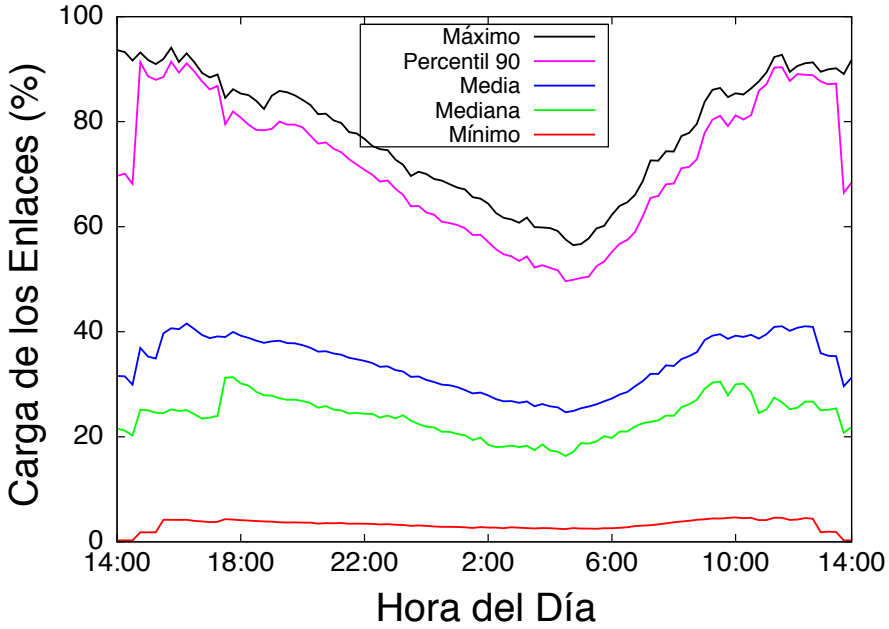


(b) Después de aplicar los mecanismos de reducción de consumo energético.

Figura 5.6: Carga de los enlaces a lo largo del día para la red NSFNet.



(a) Antes de aplicar los mecanismos de reducción de consumo energético.



(b) Después de aplicar los mecanismos de reducción de consumo energético.

Figura 5.7: Carga de los enlaces a lo largo del día para la red Géant.

5.4. Comparación con Otras Propuestas de Eficiencia Energética

En esta sección se realiza una comparación entre la propuesta descrita en la Parte I de esta tesis y el conjunto de trabajos relacionados con la eficiencia energética en redes de comunicaciones identificados y descritos en el Capítulo 2.

La Tabla 5.6 presenta, de un vistazo, las características principales y los resultados obtenidos en términos de ahorro de energía para la revisión literaria realizada en el Capítulo 2. Cada fila de la tabla hace referencia a una propuesta concreta mientras que las columnas se corresponden con las características que se han identificado para realizar la comparación.

A continuación se indica la información que contiene cada una de las columnas de la tabla: trabajo en cuestión, método utilizado para dar solución al problema, número de niveles de energía (definidos en la Sección 3.2 del Capítulo 3), funciones de energía (Secciones 3.4 y 3.5 del Capítulo 3) y distribuciones de energía utilizadas (Sección 3.3 del Capítulo 3), topologías consideradas, demanda de tráfico y resultados en términos de porcentaje de ahorro de energía.

El presente trabajo también se incluye al final de la tabla, donde se puede observar un nuevo punto de vista relacionado con el número de niveles de energía utilizados por los enlaces. Con el objetivo de calcular el porcentaje de ahorro de energía bajo unas condiciones determinadas, el rango de valores para el número de niveles de energía va desde 2 (técnica *Sleeping*) hasta ∞ (técnica *Rate Adaptation*). Los resultados obtenidos se evalúan con el ánimo de encontrar el número de niveles de energía más apropiado en términos de ahorro energético para poder ser implementados por las tarjetas de línea.

Tabla 5.6: Comparación entre nuestra propuesta y otras soluciones existentes en la literatura relacionada.

Referencia	**Solución**	**Niveles de Energía ($n_{e_{i,j}}$)**	**Funciones de Energía ($f_{e_{i,j}}$)**	**Distribuciones de Energía ($r_{e_{i,j}}$)**	**Topologías consideradas (N=nodos, L=enlaces)**	**Demanda de tráfico**	**Ahorro de Energía (%)**
S. Nedevschi et al. [6]	Simulador a nivel de paquete ns-2	2, 4 y 10	Lineal	Lineal y exponencial	Abilene (11 N, 15 L) e Intel Enterprise Network (300 N, 600 L aprox.).	Demanda de tráfico determinada por mediciones tanto para Abilene como para Intel Enterprise Network.	Decremento del ahorro de energía en función de la utilización de un 62% a un 35% para la distribución de energía lineal y de un 62% a un 11% para la exponencial cuando se usa escalado de frecuencia, mientras que permanece estable (alrededor del 60%) cuando se utiliza DVS.
N. Vasic y D. Kostic [63]	Simulador a nivel de paquete ns-2	2 y 4	Función escalonada discreta (no convexa ni doblemente diferenciable).	Lineal	Abovenet (19 N, 68 L), AT&T (115 N, 296 L), Genuity (42 N, 110 L), Sprint (52 N, 168 L) y Tiscali (41 N, 174 L)	11 matrices de tráfico diferentes para cada una de las 5 topologías basadas en el código TRUMP [64].	El 21% de los enlaces (de media) pasan a dormir para 2 niveles de energía, mientras que se logra un ahorro del 8% (de media) para 4 niveles de energía.
J. Chabarek et al. [12]	MILP	2: *Sleeping*	La función de energía toma valores discretos y puede asumirse como logarítmica.	N/D	Telstra (7 N, 18 L), Ebone (18 N, 66 L), Exodus (21 N, 72 L), Abovenet (17 N, 74 L) y tres grafos de Waxman simples (todos con 12 N y 24, 48 y 134 L respectivamente).	Matriz de tráfico sintética generada como en [66].	Ahorro de energía del 2% para las dos tarjetas de línea consideradas (OC-48 y OC-12 del *router* Cisco GSR 12008) en la topología de 24 enlaces. Incremento hasta el 19% para OC-48 en la topología de 48 enlaces, mientras que permanece en un 2% para OC-12. La topología de 134 enlaces consigue el mayor ahorro (hasta un 65% y un 11% respectivamente).
L. Chiaraviglio et al. [66]	ILP y heurísticas voraces	2: *Sleeping*	N/D	N/D	Topologías jerárquicas aleatorias con ratio constante entre nodos *core*, nodos *edge* y nodos de agregación del tipo: N = x + 3x + 12x, con x como número de nodos *core*.	Función sinusoidal con periodicidad diaria, en la cual el tráfico en horas valle es el 20% de la demanda en horas pico.	Alrededor del 30% de los enlaces son apagados. Dependencia de los valores absolutos correspondientes al escenario elegido.
A.P. Bianzino et al. [68]	MILP	2: *Sleeping*	Lineal (completamente proporcional) [74] e *Idle Energy* [62]	Lineal	Géant (23 N, 74 L)	Conjunto de matrices de tráfico reales con variaciones en el tráfico correspondientes a un día laborable estándar.	Alrededor de un 34% de ahorro de energía para *Idle Energy* y un 53% para la función de energía lineal si solamente se consideran los enlaces. Si se consideran también los nodos, este ahorro se reduce a un 0,2% y un 8,3% respectivamente.
G. Shen y R.S. Tucker [69]	MILP y heurísticas	Redes ópticas	Redes ópticas. El consumo de energía sigue una relación aproximadamente lineal con la demanda de tráfico.	Redes ópticas	NSFNet (15 N, 21 L), USANET (24 N, 43 L) y una red de 6 nodos y 8 enlaces.	Demanda de tráfico aleatoria con distribución uniforme.	Hasta un 40% de ahorro de energía para NSFNet y más de un 45% para USANET. Alrededor de un 25% de ahorro para la red de 6 nodos y 8 enlaces. Incremento del ahorro de energía con el aumento del tamaño de la red.
M. Hasan et al. [70]	Heurísticas	Redes ópticas. Los módulos de los nodos pasan a dormirse (similar a 2 niveles de energía).	Redes ópticas. Consumo de energía de los elementos (chasis, módulos y puertos) en función de su nivel de energía (activo e *idle*).	Redes ópticas	Red de 14 nodos (2 chasis, 2 módulos por chasis y 2 puertos por módulo) y red de 24 nodos (3 chasis, 4 módulos por chasis y 4 puertos por módulo).	Las demandas de tráfico se distribuyen de manera uniforme entre los nodos.	Alrededor de un 30% de ahorro de energía en horas valle.
W. Hou et al. [72]	Heurísticas	Redes ópticas	Redes ópticas. Consumo de energía de los puertos, transpondedores y transceptores.	Redes ópticas	NSFNet (14 N, 21 L), USANET (24 N, 43 L), RedIRIS (16 N, 27 L) y Géant (26 N, 40 L).	Las matrices de tráfico se generan de forma aleatoria para los tres niveles de granularidad asumidos (OC-1, OC-3 y OC-12). Se utilizan tanto matrices de tráfico simétricas como asimétricas para comparar los resultados.	Hasta un 68% de ahorro de energía y hasta un 19% de ahorro en puertos.
J. Galán y A. Gazo	GA y PSO	De 2 a ∞	Lineal [74] y logarítmica [12].	Lineal y exponencial	NSFNet (14 N, 42 L), Géant (23 N, 74 L) y AT&T (154 N, 367 L).	Matrices de tráfico reales obtenidas durante 4 meses para Géant y función sinusoidal [66] para NSFNet y AT&T.	Análisis multivariante en la Tabla 5.5, que incluye las tres redes consideradas.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y se extraen las principales conclusiones tras aplicar las meta-heurísticas descritas en el capítulo anterior para resolver el problema de reducción del consumo de energía global de una red en base al diseño energéticamente eficiente de las tarjetas de línea.

Se realiza además una comparación con un conjunto de trabajos existentes en la literatura que también tratan de resolver el problema de la eficiencia energética en redes cableadas.

Los resultados demuestran que se puede mejorar en gran medida la eficiencia energética de una red mediante la utilización de un reducido número de niveles de energía. Concretamente, no es necesario que los fabricantes construyan tarjetas de línea que soporten un gran número de niveles de energía diferentes, ya que un número igual a 4 es suficiente para lograr una reducción significativa del consumo de la red.

Por otro lado, si no es posible utilizar la técnica *Rate Adaptation* de adaptación de velocidad en las tarjetas de línea, se podría usar la técnica denominada *Sleeping* (activo-dormido) dependiendo del perfil energético de la red. Los resultados indican también que a mayor grado de conectividad se consigue un mayor ahorro de energía respecto del consumo global de la red y, además, ni el tipo de distribución de energía ni el tipo de función de energía tienen un gran impacto sobre el ahorro energético.

Parte II

Diseño de Grupos de Agregación de Enlaces Energéticamente Eficientes

Capítulo 6

Grupos de Agregación de Enlaces: Protocolos y Eficiencia Energética

> "Cualquier poder si no se basa en la unión, es débil."
>
> Jean de la Fountaine

La técnica basada en la combinación de añadir más tarjetas de línea a los dispositivos de red y utilizar agregación de enlaces se emplea tradicionalmente para conseguir un incremento del ancho de banda y para proporcionar redundancia, balanceo de carga y alta disponibilidad en la red.

La idea básica de la agregación de enlaces consiste en agregar un conjunto de enlaces que conectan dos dispositivos concretos para formar un único enlace lógico conocido como LAG, *bond*, *trunk*, *bundle, port channel* o *EtherChannel*. La Figura 6.1 describe la técnica de agregación de enlaces mediante la formación de un LAG.

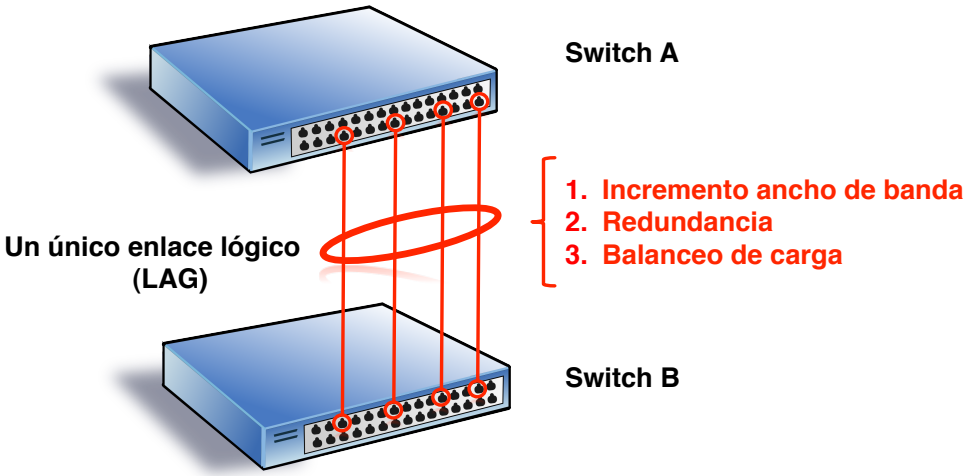


Figura 6.1: Ejemplo de grupo de agregación de enlaces o LAG.

Para realizar esta tarea, se han desarrollado tanto protocolos propietarios como protocolos basados en estándares. Entre los propietarios destaca *Port Aggregation Control Protocol* (PAgP) [91], utilizado para conectar dispositivos Cisco, mientras que *Link Aggregation Control Protocol* (LACP) es el protocolo de agregación de enlaces definido en el estándar IEEE 802.1ax [92].

En el caso de que uno de los enlaces que pertenecen al LAG fallase, la carga de tráfico pasaría a redistribuirse entre el conjunto de enlaces individuales restantes (redundancia a nivel de enlace). Sin embargo, en el caso de que uno de los dos dispositivos (*switches* o *routers*) que actúan como extremos del LAG fallase, se produciría una pérdida completa de conectividad. Para prevenir esta posible situación, existe otra técnica que, en combinación con la anterior, se centra en la provisión de redundancia a nivel de dispositivo.

La Figura 6.2 muestra un ejemplo de esta técnica. En ella se puede observar la existencia de cuatro dispositivos que se encuentran conectados entre sí mediante LAG con la finalidad de proporcionar redundancia a nivel de dispositivo, agregación de capacidad, balanceo de carga y dotar de alta disponibilidad a la red.

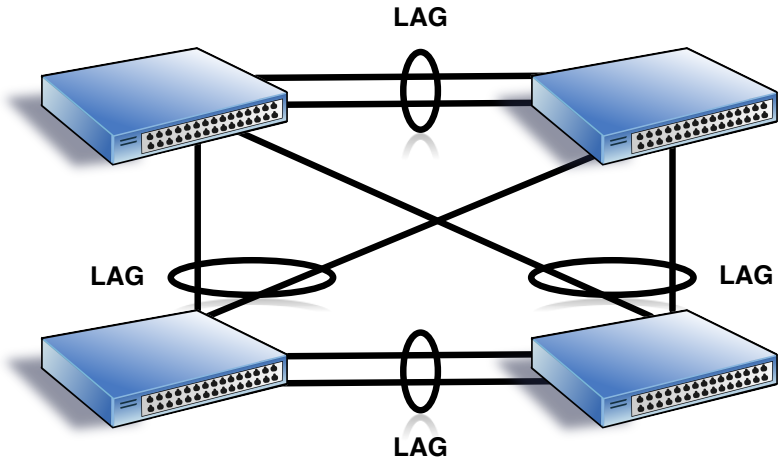


Figura 6.2: Ejemplo de topología con agregación de capacidad y alta disponibilidad.

Con el objetivo de añadir redundancia a nivel de dispositivo, se han propuesto una serie de protocolos como *Virtual Router Redundancy Protocol* (VRRP) [93], *Spanning Tree Protocol* (STP), definido en el estándar IEEE 802.1D [94], o la tecnología propietaria *Multi-Chassis Link Aggregation Group* (MC-LAG) [95].

Sin embargo, es reciente el interés que existe por parte de los fabricantes de electrónica de red en incorporar mecanismos alternativos que resuelvan algunos de los problemas que se han identificado al utilizar estas técnicas, como la potencial reducción del ancho de banda disponible derivado del bloqueo de puertos por parte de STP.

El protocolo *Internet Engineering Task Force* (IETF) *Transparent Interconnection of Lots of Links* (TRILL) [96] o el protocolo *Shortest Path Bridging* (SPB), que se encuentra especificado en el estándar IEEE 802.1aq [97], son dos claros ejemplos que

a pesar de su juventud ya han sido incorporados por la mayoría de fabricantes de electrónica de red.

Sin embargo, estas técnicas pueden considerarse como ineficientes desde el punto de vista energético en situaciones donde la carga de la red es baja o en ausencia de fallos. Esto es debido a que cada uno de los enlaces individuales que forman un determinado LAG consumen energía en mayor o menor medida según lo estudiado en la Parte II de esta tesis.

Para mejorar la eficiencia energética en este tipo de entornos, se podrían aplicar las técnicas propuestas por los investigadores que se basan en la actuación sobre los enlaces individuales de la red para conseguir ahorrar energía en redes cableadas (Sección 2.3). De esta forma, los LAG podrían incorporar extensiones de eficiencia energética y, al mismo tiempo, proporcionar las características propias de las técnicas de agregación de enlaces.

Un enfoque inicial para realizar un diseño de LAG energéticamente eficientes se sustenta en la idea de que los enlaces que lo constituyen puedan ser capaces de dormirse y de despertarse de manera individualizada, mientras que otra opción se basa en la adaptación individual de la velocidad de operación de los enlaces del LAG en función de la carga de tráfico de éste.

Para el primer caso, se puede aplicar el estándar EEE [55] (técnica *Sleeping*) y para el segundo caso se puede utilizar la técnica basada en hardware de adaptación de velocidad (*Rate Adaptation*) [6], mediante la posibilidad de configurar cada enlace del LAG con un número discreto de niveles de energía (Capítulo 3).

A continuación se realiza una revisión del estado del arte en dos planos distintos. Por un lado se profundiza en los protocolos de agregación de enlaces anteriormente mencionados tanto desde el punto de vista de la redundancia a nivel de enlace como desde el punto de vista de la redundancia a nivel de dispositivo. Para ambos casos, se presenta su modo de funcionamiento y una serie de situaciones problemáticas que han surgido y se han solucionado con la aparición de nuevos mecanismos a lo largo del tiempo.

Una vez conocidas los protocolos que permiten realizar la agregación de enlaces, se analiza el trabajo existente en la literatura centrado en la búsqueda de mecanismos que permitan mejorar la eficiencia energética de las redes cableadas mediante la actuación sobre los LAG.

6.1. Protocolos de Agregación de Enlaces

En esta sección se describen los distintos protocolos de agregación de enlaces, comenzando por aquéllos que proporcionan agregación de capacidad entre dos dispositivos determinados y redundancia a nivel de enlace. Posteriormente se presenta el problema de pérdida de conectividad ligado a la posible caída de uno de los dos dispositivos que actúan como extremos del LAG para finalmente profundizar en aquellos protocolos que tratan de dar solución a este problema.

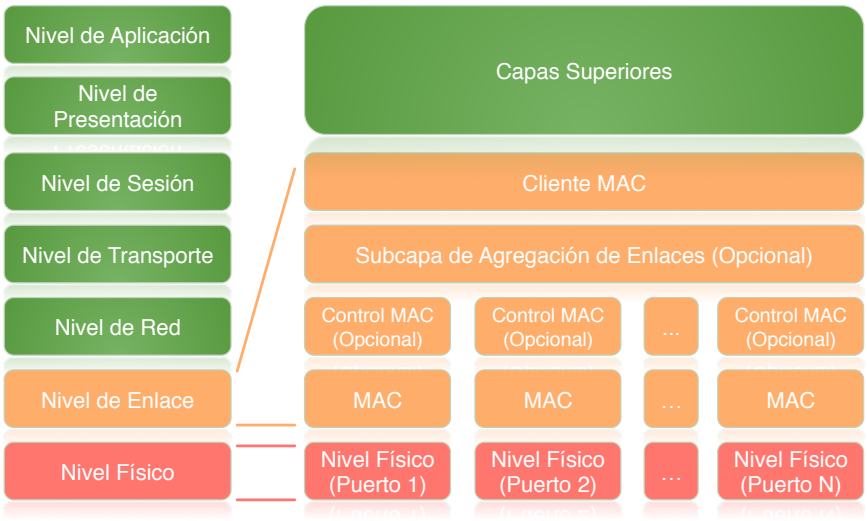


Figura 6.3: Agregación de enlaces en el modelo de referencia OSI.

6.1.1. El Estándar IEEE 802.3ad - IEEE 802.1ax

La agregación de enlaces en Ethernet se estandarizó en IEEE 802.3ad, que más tarde se renombró como IEEE 802.1ax por consistencia con otros estándares IEEE 802.3 [92]. Este estándar permite la agregación de un conjunto de enlaces Ethernet en un único LAG.

La agregación de enlaces se realiza en la Subcapa de Agregación de Enlaces, sobre la capa de control de acceso al medio o *Media Access Control* (MAC), mediante el envío de tramas completas a la capa MAC de uno de los enlaces agregados. De esta forma, un cliente MAC puede tratar el LAG como si se tratara de un único enlace individual (Figura 6.3).

Entre las ventajas de la agregación de enlaces [98] destaca el incremento del ancho de banda disponible entre dispositivos, ya que la capacidad teórica del LAG es la suma de las capacidades de cada uno de los enlaces individuales que lo conforman. Esto permite un incremento escalado de la capacidad del enlace inferior al factor multiplicativo x10 característico de la tecnología Ethernet.

Además, puede usarse para suministrar mayor capacidad que la que puede proporcionar la más reciente de las tecnologías de capa física (PHY), así como para balancear la carga de tráfico entre las distintas interfaces físicas. Otra importante ventaja de la agregación de enlaces es el incremento de la disponibilidad del enlace. El LAG únicamente dejará de estar disponible cuando todos los enlaces pertenecientes al grupo se encuentren como no disponibles, es decir, cuando todos los puertos estén caídos.

A continuación se procede a explicar de forma genérica el funcionamiento del estándar IEEE 802.1ax. La explicación se basa en la Figura 6.4, que muestra el diagrama de bloques de la Subcapa de Agregación de Enlaces definida en dicho estándar.

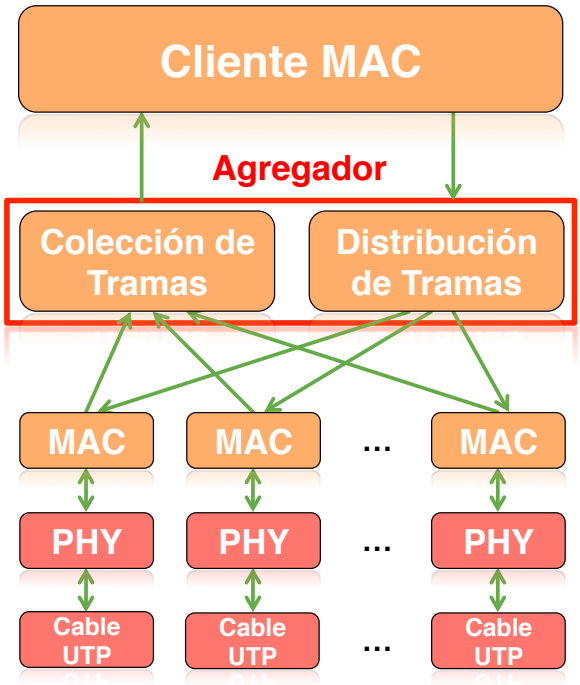


Figura 6.4: Diagrama de bloques de la Subcapa de Agregación de Enlaces.

Un cliente MAC se comunica con un conjunto de puertos a través de un elemento agregador, que muestra una interfaz IEEE 802.3 al cliente MAC. Este elemento agregador se une a uno o más puertos dentro de un sistema y es el responsable tanto de distribuir las tramas desde el cliente MAC a los diferentes puertos como de recoger las tramas recibidas de los puertos y pasárselas al cliente MAC de forma transparente. Un determinado sistema puede contener varios agregadores que sirvan a varios clientes MAC, aunque un cliente MAC es servido por un único agregador al mismo tiempo.

El agregador está constituido por dos bloques: el bloque de distribución de tramas y el bloque de colección de tramas. A continuación se describen las funciones principales que ambos bloques llevan a cabo:

El bloque de distribución de tramas se encarga de asignar tramas a los enlaces para su transmisión y debe asegurar que todas las tramas que pertenecen a una conversación se transmitan sobre el mismo enlace.

El bloque de colección de tramas recibe tramas procedentes de los diferentes puertos y se las entrega al cliente MAC. Este bloque únicamente necesita asegurar que las tramas procedentes del mismo puerto se pasen en orden al cliente MAC, lo que permite una independencia del algoritmo utilizado por el bloque de distribución de tramas. Se evita así la necesidad de aplicar técnicas de buffering y reordenación, además de

la fragmentación y el reensamblado. En lo referente a los puertos, un determinado puerto se puede unir como máximo a un único agregador al mismo tiempo.

La unión de puertos a los agregadores dentro de un sistema es gestionada por la función de control de agregación de enlaces para ese sistema concreto, que es la encargada de determinar qué enlaces pueden agregarse, realizar la agregación, unir los puertos del propio sistema al agregador correcto y monitorizar su estado para determinar cuándo es necesario un cambio en la agregación.

El administrador de red puede controlar esta función y actuar en consecuencia mediante la manipulación de variables de estado de agregación de enlaces. En este punto hay que mencionar que el protocolo LACP (que se describe en la Sección 6.1.2) proporciona el máximo nivel disponible de agregación de capacidad entre dos sistemas determinados.

En relación al direccionamiento, cada puerto se asigna a una única dirección MAC administrada globalmente. Esta dirección MAC se utiliza como dirección origen para el intercambio de tramas entre entidades dentro de la propia Subcapa de Agregación de Enlaces. Cada agregador se asigna a una única dirección MAC administrada globalmente, que se usa como dirección MAC de la agregación desde la perspectiva del cliente MAC. Esta dirección MAC del agregador puede ser una de las direcciones MAC de los puertos del LAG y se usa como dirección origen en las tramas enviadas y como dirección destino en las recibidas.

6.1.2. *Link Aggregation Control Protocol*

El protocolo LACP, definido en el estándar IEEE 802.1ax, permite que un determinado dispositivo pueda conocer mediante el intercambio de información tanto la presencia como las capacidades concretas de otro dispositivo remoto con el que poder formar un LAG.

Si ambos dispositivos son compatibles con LACP, uno de ellos puede enviar una solicitud de agregación al otro, de modo que éste último puede aceptar o rechazar dicha solicitud puerto a puerto de manera individual.

Para ello, LACP establece una negociación entre los dos dispositivos candidatos a formar uno o varios LAG mediante el intercambio de las unidades de datos LACP, o *Link Aggregation Control Protocol Data Unit* (LACPDU). En este punto cabe destacar que los puertos de un determinado dispositivo pueden encontrarse en uno de los cuatro siguientes estados o modos de operación: *On*, *Off*, Pasivo o Activo.

On: La agregación de enlaces se constituye de manera forzosa sin que exista una negociación LACP previa, es decir, el dispositivo en cuestión no envía ni procesa ninguna LACPDU recibida.

Off: No existe agregación de enlaces. El dispositivo no envía ni entiende las posibles LACPDU recibidas.

Pasivo: El puerto en cuestión se encuentra en un estado de negociación pasivo. En este estado, el puerto responde a las LACPDU recibidas desde el otro extremo para formar el LAG pero no inicia ninguna negociación. Es el dispositivo remoto (en estado activo) el que inicia la negociación enviando LACPDU. Éste es el modo por defecto y es similar al modo de operación *Auto* en PAgP.

Activo: El puerto en cuestión se encuentra en un estado de negociación activo. En este estado, el puerto inicia las negociaciones mediante el envío de LACPDU al dispositivo remoto para crear el LAG. La formación del propio LAG está supeditada a que el otro extremo se encuentre en un modo de operación activo o pasivo. Es similar al modo de operación *Desirable* en PAgP.

En la Tabla 6.1 se describen las tres únicas combinaciones válidas existentes para la correcta ejecución del protocolo LACP:

Tabla 6.1: Combinaciones válidas en LACP.

Dispositivo 1	**Dispositivo 2**	**Comentarios**
Activo	*Activo*	Combinación recomendada.
Activo	*Pasivo*	El LAG se forma si la negociación es correcta.
On	*On*	El LAG se forma sin necesidad de LACP. Combinación no recomendada.

Cada puerto en estado activo envía una serie de LACPDU para notificar al dispositivo remoto acerca de la prioridad LACP del sistema, su dirección MAC, la prioridad LACP del puerto, el número de puerto y su clave operacional. Cuando el dispositivo remoto recibe una LACPDU, compara su información con la información recibida en otros puertos para determinar cuáles son los puertos que pertenecen al mismo enlace lógico o LAG.

En esta negociación se incluye, por tanto, información acerca de qué enlaces pueden ser agregables para ser asignados al LAG correspondiente. LACP se utiliza pues, mediante el intercambio de las LACPDU, para comprobar la disponibilidad de los enlaces, de los dispositivos y para establecer la negociación entre éstos últimos con el objetivo de crear los LAG.

La Figura 6.5 describe un ejemplo en el que se muestra la secuencia de pasos para el proceso de establecimiento de un LAG entre dos dispositivos determinados, denominados *switch* A (estado activo) y *switch* B (estado pasivo):

1. Los cables Ethernet conectan, por ejemplo, los puertos 1, 5, 9 y 13 del *switch* A con los puertos 1, 5, 9 y 13 del *switch* B.

2. Los puertos del *switch* A (en estado activo) inician las negociaciones con los otros puertos mediante el envío de las LACPDU.

3. Los puertos del *switch* B (en estado pasivo) responden a las LACPDU recibidas pero no inician la negociación.

4. LACP asocia a cada dispositivo un Identificador de Sistema, que es único y se corresponde con la concatenación de su dirección MAC y la prioridad del sistema. En el ejemplo, el *switch* A posee el Identificador de Sistema 031020040010 y el *switch* B 031020040012.

5. Cada *switch* asigna un Identificador de Agregación, o número de puerto lógico, al grupo de puertos físicos. En el ejemplo, el *switch* A identifica el LAG como puerto 203 y el *switch* B lo identifica como puerto 512.

En el caso de tratarse de una configuración activo / activo, los dos dispositivos del esquema se encontrarían en modo de operación activo, por lo que sus puertos enviarían LACPDU al otro extremo para iniciar una negociación LACP y así formar el LAG correspondiente. La Figura 6.6 muestra un ejemplo de creación de LAG en el que los dos extremos se encuentran configurados en modo activo.

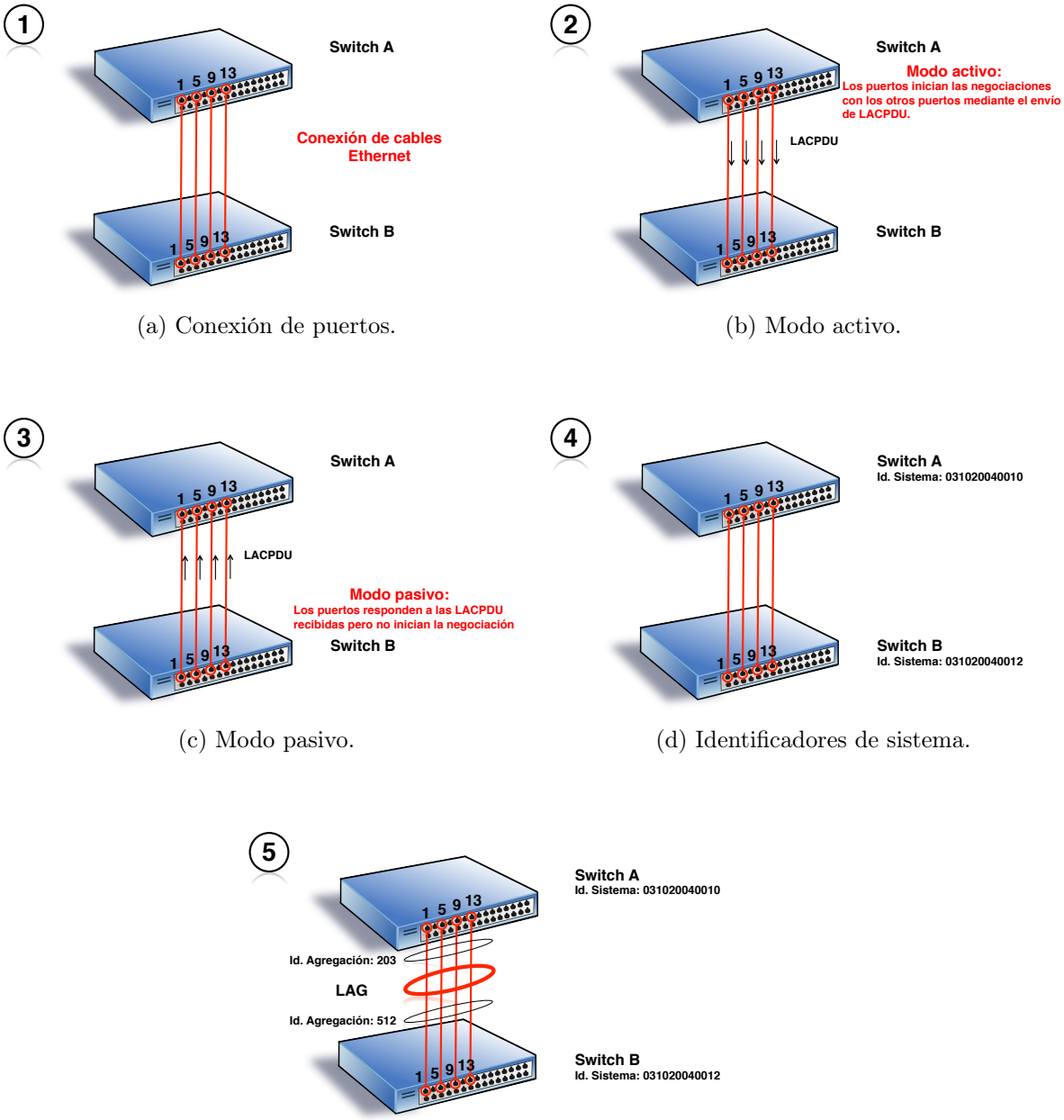
Cada LAG está constituido por tanto por un conjunto de puertos de la misma velocidad con modo de operación *full-duplex*. LACP puede añadir o eliminar puertos al LAG de forma dinámica en función del estado en el que se encuentren y de su disponibilidad puntual. En el caso de que un enlace concreto no pudiera unirse al LAG, seguiría operando como enlace individual. En la mayoría de los casos, se constituye un único LAG con todos los puertos disponibles aunque, como se ha comentado anteriormente, el mecanismo de agregación de enlaces está desactivado por defecto en cada uno de estos puertos.

Una vez que se ha establecido el canal lógico, el tráfico se distribuye a través de los enlaces que forman parte del LAG mediante la aplicación de un algoritmo de *hashing*. Este algoritmo puede estar basado en algunas de las diferentes propiedades del tráfico a enviar, de forma que pueda distribuirse por todos los enlaces que constituyen el LAG. Si uno de los enlaces falla, se vuelve a ejecutar el algoritmo de *hashing* y el tráfico se redistribuye por el resto de enlaces del LAG (Figura 6.7). En el caso de que se dieran cambios en la conectividad física, LACP actuaría para converger hacia una nueva configuración.

Sin embargo, la agregación de enlaces puede presentar problemas relacionados con la reordenación de tramas cuando se utiliza una distribución arbitraria de tramas [98].

Si por ejemplo una trama grande que llega al LAG se transmite por un determinado enlace y una segunda trama más pequeña que llega justo a continuación de la primera se transmite sobre un enlace diferente, puede darse el caso de que esta segunda trama llegue antes que la primera. Por tanto, debido a que situaciones como ésta pueden causar problemas a los protocolos de las capas superiores, el estándar IEEE 802.1ax se diseñó de forma que se evitara la reordenación de tramas.

Para ello, los algoritmos que distribuyen tramas a través de los diferentes enlaces del LAG se aseguran de que las tramas que pertenecen a una misma conversación se envíen a través del mismo enlace para preservar el orden de las mismas [98]. Con este tipo de algoritmos se evita la necesidad de reordenar las tramas, aunque también se limita el ancho de banda máximo para una determinada conversación que es igual al ancho de banda del enlace por el que se envían las tramas pertenecientes a dicha conversación.



(a) Conexión de puertos.

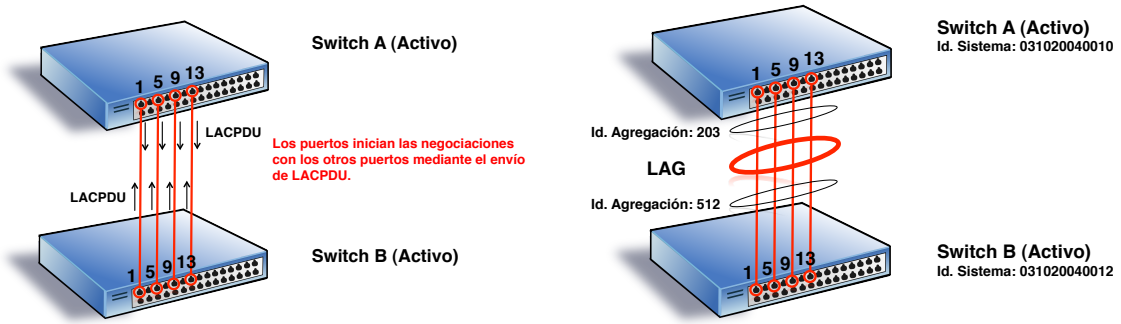
(b) Modo activo.

(c) Modo pasivo.

(d) Identificadores de sistema.

(e) Identificadores de agregación.

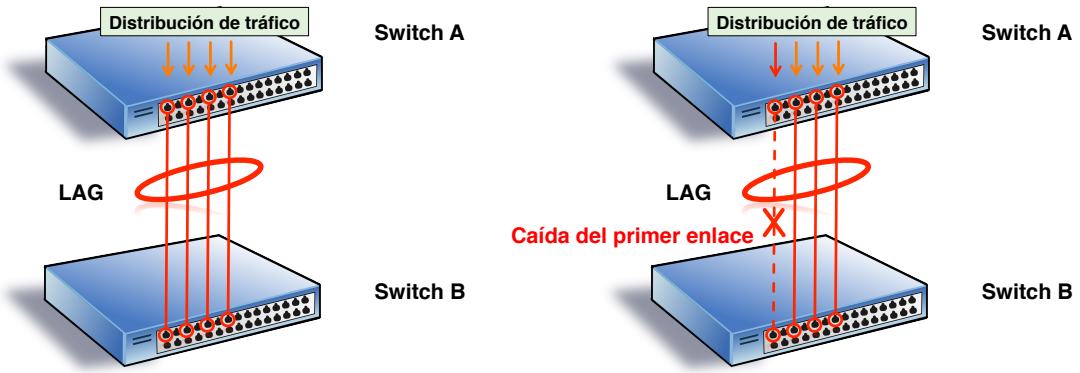
Figura 6.5: Secuencia de pasos para el establecimiento de un LAG con LACP en modo activo / pasivo.



(a) Inicio de la negociación por parte de los dos dispositivos.

(b) LAG creado con los identificadores de la agregación.

Figura 6.6: Establecimiento de LAG con LACP en modo activo / activo.



(a) Distribución de tráfico por los enlaces del LAG. (b) Distribución de tráfico ante la caída de un enlace.

Figura 6.7: Distribución de tráfico con LACP.

El término conversación puede definirse a diferentes niveles dependiendo de la topología de la red y de la carga de tráfico. En el Anexo A del estándar IEEE 802.1ax [92] se discuten diferentes opciones al respecto. Por ejemplo, se puede utilizar la dirección Ethernet origen y destino para identificar una conversación concreta. En otros casos, sin embargo, es más conveniente utilizar la información de protocolos de capas superiores para definir una conversación (conexión *Transmission Control Protocol* (TCP)).

Para hacer un uso eficiente de la capacidad del LAG, los diferentes algoritmos de distribución de tramas intentan asignar conversaciones a los enlaces que forman parte del LAG de modo que la carga en cada uno de ellos sea similar. Esta técnica permite, por tanto, una alta utilización del LAG cuando el número de conversaciones es alto. El estándar también proporciona mecanismos para reasignar conversaciones a otro enlace diferente asegurando el orden en las tramas, lo cual es útil para balancear la carga de los enlaces de forma dinámica.

Existen otras alternativas que proponen utilizar la capa física para realizar la agregación de enlaces [99]. El envío de información se realiza fragmentando las tramas en segmentos que se distribuyen por los diferentes enlaces para su transmisión. En recepción, se reensamblan dichos fragmentos para reconstruir la trama original. Esta estrategia se ha utilizado ampliamente para la agregación de enlaces sobre redes de área extensa. En este caso, los fragmentos que corresponden a una conversación se transmiten por todos los enlaces disponibles de forma que se utilice toda la capacidad del enlace agregado. Sin embargo, este tipo de diseño complica los mecanismos de distribución de tramas y los procesos para la colección de las mismas, razones por las cuales no fue incluido en el estándar IEEE 802.1ax.

6.1.3. *Virtual Router Redundancy Protocol*

En las secciones anteriores se ha venido comentando que la función principal de la agregación de enlaces es la de conectar dos dispositivos (*switches* o *routers*) a través de un LAG. Aunque las técnicas de agregación de enlaces proporcionan redundancia a nivel de enlace, puede darse el caso en que uno de los dos extremos del LAG falle, lo que derivaría en una pérdida completa de conectividad.

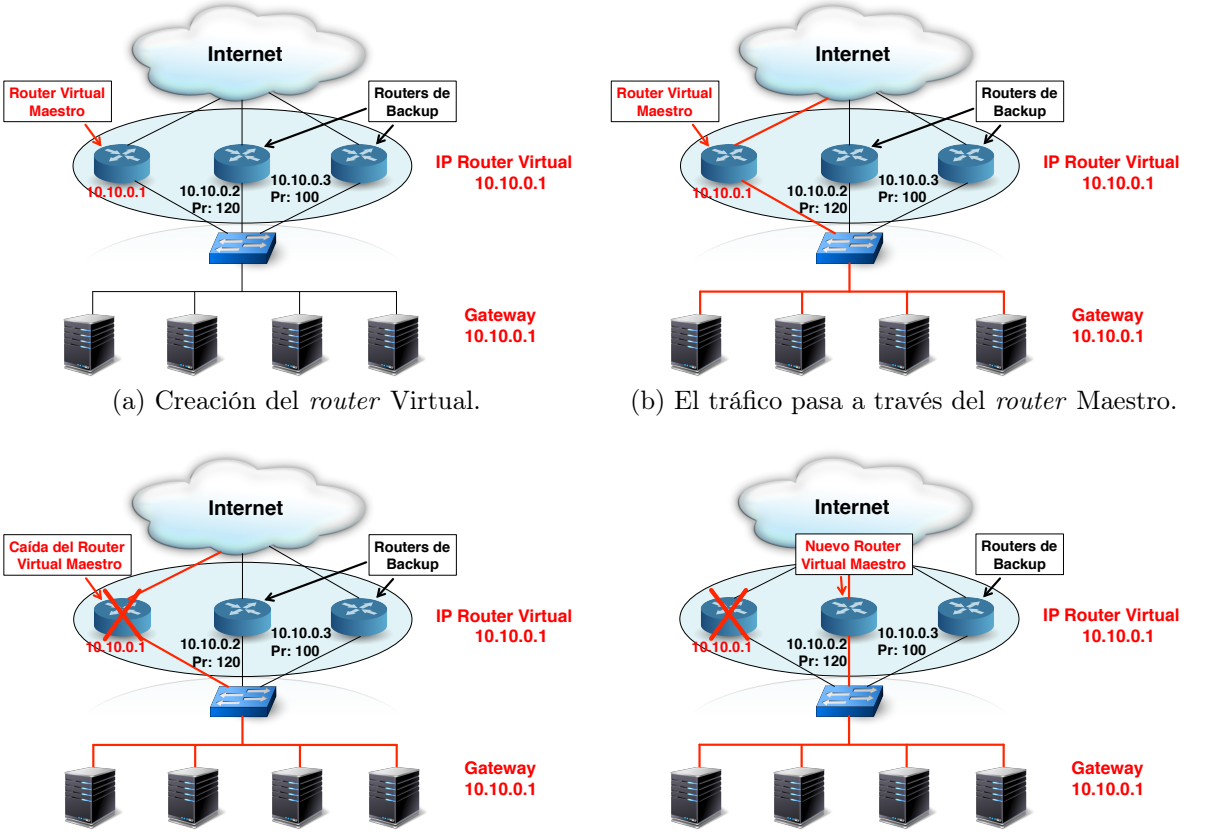
Con el objetivo de evitar este problema, se han propuesto una serie de mecanismos que proporcionan redundancia a nivel de dispositivo. Son los denominados protocolos de redundancia de *routers* como Cisco *Hot Standby Router Protocol* (HSRP) [100], *Gateway Load Balancing Protocol* (GLBP) [101] o VRRP [93] que, junto a protocolos inter-*Autonomous System* (AS) como OSPF, proporcionan redundancia, balanceo de carga y una adecuada resiliencia y tolerancia a fallos en la red.

VRRP realiza una agrupación de un conjunto de *routers* que se encuentran bajo una misma dirección IP/MAC Virtual. Estos *routers* forman un grupo que es totalmente transparente a la configuración del cliente. Es aquí cuando entra en juego el concepto de *router* Maestro. El grupo tiene un único *router* Maestro que es el encargado de encaminar aquellos paquetes cuya dirección MAC destino coincida con la dirección MAC del *router* Virtual. Además, es el encargado de responder a peticiones *Address Resolution Protocol* (ARP) que pregunten por la dirección IP Virtual, para asegurar que los clientes sepan cómo alcanzar el *router* Virtual.

El resto de *routers* del grupo son *routers* de *Backup* y monitorizan el estado del *router* Maestro para que, en caso de fallo, aquél *router* de *Backup* que tenga una mayor prioridad releve al Maestro proporcionando así redundancia con un *delay* mínimo (el tiempo de convergencia suele ser inferior a un segundo).

En [93] se establece un rango de prioridades de 1 a 254 para los *routers* de *Backup* con el objetivo de actuar conforme a estos valores cuando sea necesario reemplazar al *router* Maestro. El proceso de monitorización del estado del *router* Maestro por parte de los *routers* de *Backup* consiste en el envío periódico de mensajes de anuncio VRRP por parte del propio *router* Maestro, en los que se indica tanto su estado como su prioridad y son encapsulados en datagramas IP que se envían a la dirección multicast 224.0.0.18.

La Figura 6.8 muestra un ejemplo de operación del protocolo VRRP. En la Figura 6.8 (a) se puede observar que se ha formado un grupo de 3 *routers* cuya dirección IP



(a) Creación del *router* Virtual.

(b) El tráfico pasa a través del *router* Maestro.

(c) Fallo en el *router* Maestro.

(d) Relevo del *router* Maestro por parte de un *router* de *Backup*.

Figura 6.8: Ejemplo de operación del protocolo VRRP.

Virtual es 10.10.0.1. El *router* Maestro tiene como dirección IP 10.10.0.1 y existen otros 2 *routers* de *Backup* con direcciones IP 10.10.0.2 y 10.10.0.3, y prioridad 120 y 100, respectivamente.

Se puede observar también que todos los *hosts* tienen configurada su puerta de enlace por defecto con dirección IP 10.10.0.1, es decir, la dirección IP Virtual del grupo de *routers*. Esto hace que todo el tráfico que sale de los *hosts* pase por el *router* Maestro (Figura 6.8 (b)).

Si el *router* Maestro falla, como es el caso de la Figura 6.8 (c), el *router* de *Backup* con mayor prioridad lo sustituye. En el ejemplo, se trata del *router* de *Backup* con dirección IP 10.10.0.2, que automáticamente pasa a convertirse en Maestro (Figura 6.8 (d)). Sin embargo, el relevo ha sido transparente para los *hosts*, cuya pasarela por defecto sigue siendo la dirección IP 10.10.0.1 (dirección IP del grupo de *routers* o *router* Virtual). Aparte de proporcionar redundancia, VRRP se suele utilizar para proporcionar balanceo de la carga de tráfico entre varios *routers*. De esta forma se pueden establecer configuraciones de red activo / activo que permitan tanto redundancia ante fallos como balanceo de carga. Para ello, se configuran varios *routers* virtuales como *gateways* para diversos grupos de *hosts*.

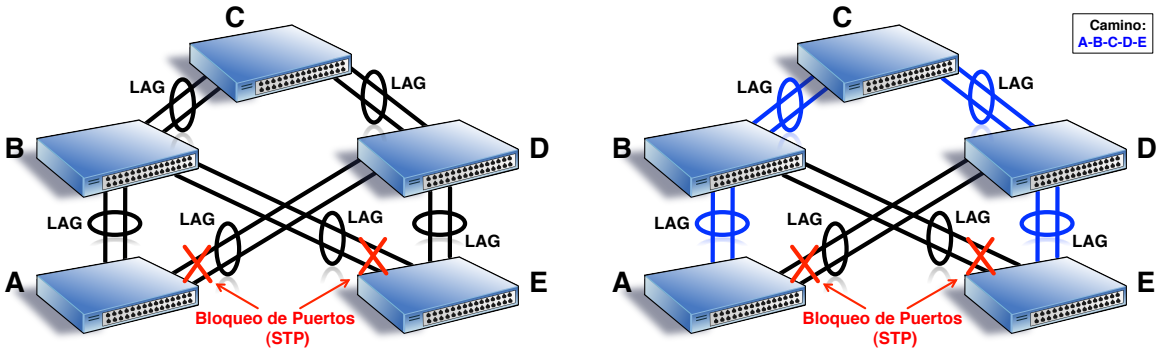
6.1.4. *Spanning Tree Protocol*

La cada vez más utilizada técnica de virtualización de topologías a nivel 2 (*data centers*) hace que sean necesarios protocolos como STP para que se proporcione redundancia ante fallos tanto para los enlaces como para los dispositivos de la red.

STP actúa bloqueando puertos en los caminos considerados como redundantes, de modo que todos los nodos de la red son alcanzables a través de un único camino. En el caso de que se produzca un fallo en un enlace o en un dispositivo de la red, se habilita un nuevo camino (que antes era redundante) para permitir el flujo del tráfico. Al mismo tiempo, se reduce la topología de la red a una estructura en árbol que previene la existencia de bucles.

STP puede utilizarse en combinación con agregación de enlaces del siguiente modo: un LAG se considera como un único puerto lógico para incluirlo en los cálculos correspondientes de modo que se consiga una topología de red libre de bucles.

La Figura 6.9 muestra un ejemplo característico de utilización de STP con agregación de enlaces. Se trata de una topología constituida por 5 *switches* y 6 LAG sobre la que STP considera que existen dos LAG redundantes, que son los que conectan los *switches* A-D y B-E. STP actúa en consecuencia y bloquea los puertos correspondientes (Figura 6.9 (a)), forzando a que el tráfico viaje por el árbol de expansión, tal y como puede observarse en la Figura 6.9 (b).



(a) Bloqueo de puertos (caminos redundantes) con STP.

(b) Camino que sigue el tráfico tras el bloqueo de puertos.

Figura 6.9: Ejemplo de utilización de STP con agregación de enlaces.

Sin embargo, STP presenta una serie de problemas que hacen que se estén estudiando nuevos métodos que puedan proporcionar redundancia tanto a nivel de enlace como a nivel de dispositivo en redes de *data centers* con un gran nivel de virtualización.

Uno de los inconvenientes de STP está directamente relacionado con la potencial reducción de ancho de banda disponible a la hora de identificar caminos redundantes y, por consiguiente, al bloquear puertos. El bloqueo de puertos en STP hace que el ancho de banda disponible de los caminos redundantes no se utilice hasta que suceda un fallo, derivando en una ineficiente utilización de la red.

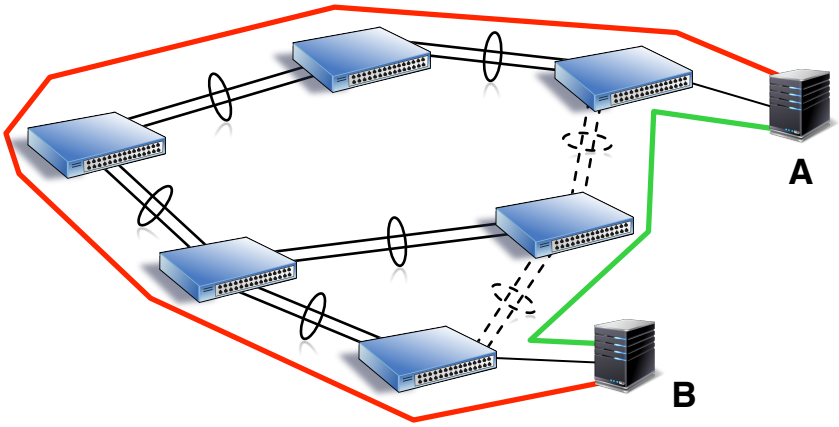


Figura 6.10: Utilización ineficiente de la red con STP.

La Figura 6.10 muestra un claro ejemplo de esta situación. En lugar de enviar el tráfico desde el *host* A hasta el *host* B por el camino más corto (línea verde), STP bloquea los puertos correspondientes a este camino para formar un árbol de expansión (línea roja) y forzar que el tráfico viaje a través de él (camino no óptimo). La utilización de esta técnica supone también que no se pueden utilizar al mismo tiempo los posibles caminos alternativos existentes entre dos nodos concretos, ya que podrían formarse bucles en la topología. Además, la convergencia tras un cambio topológico puede llevar varios segundos en el caso de *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP) y hasta 30 segundos en el caso de STP original en el peor de los casos [102, 103].

Por ello, aunque STP se ha utilizado durante muchos años como el principal protocolo de redundancia de red, los requisitos cambiantes de las redes de *data center* actuales, en las que se pretende disponer de configuraciones activo / activo que proporcionen tanto redundancia ante fallos como balanceo de carga, hacen que este campo de investigación se encuentre en continuo estudio para que se puedan proponer nuevos mecanismos que se adapten a dichos requisitos.

6.1.5. *Multi-Chassis Link Aggregation Group*

MC-LAG es una tecnología emergente que surge para dar solución a las deficiencias que presenta STP. Su potencialidad radica en que no se desperdicia el ancho de banda disponible de los caminos redundantes al mismo tiempo que proporciona redundancia tanto a nivel de enlace como a nivel de dispositivo (configuración activo / activo).

MC-LAG permite que varios *switches* se comporten como un único *switch* de cara al resto de componentes de la red, manteniendo la gestión de cada uno de ellos de forma independiente. Esto se puede conseguir mediante la extensión de las capacidades de redundancia del nivel de enlace proporcionadas por la agregación de enlaces y el soporte para dotar de redundancia a nivel de dispositivo.

MC-LAG posibilita que un extremo de un determinado LAG sea *dual-homed*, es decir, que tenga conexión con dos dispositivos diferentes, mientras que el otro extremo del LAG siga siendo *single-homed*, con conexión a un único dispositivo. La Figura 6.11 muestra un ejemplo de esquema con este tipo de aproximación.

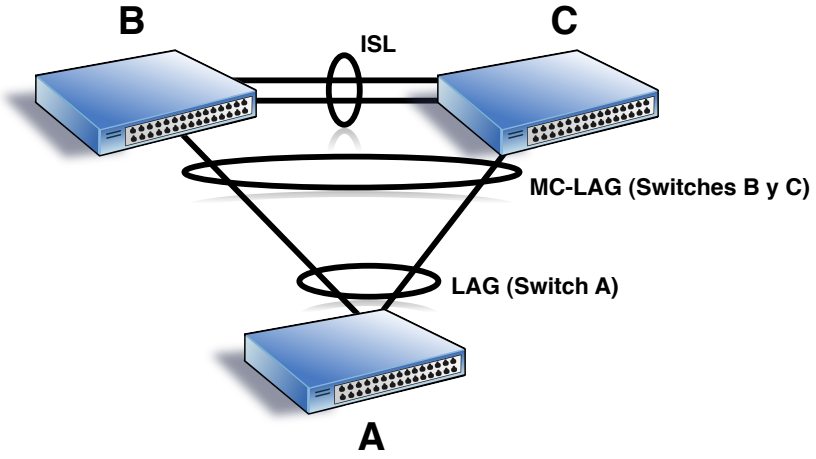


Figura 6.11: Esquema de ejemplo con MC-LAG.

El *switch* A trata los dos enlaces como si de un LAG normal se tratase, es decir, el tráfico procedente de este dispositivo se distribuye por los puertos del LAG mediante la utilización de técnicas de *hashing* por parte de los protocolos de agregación de enlaces tradicionales (LACP). En el caso de que uno de los enlaces caiga, el tráfico se redistribuye por el resto de enlaces del propio LAG.

Es en el otro extremo del LAG donde se introducen cambios para proporcionar redundancia a nivel de dispositivo. Los *switches* B y C trabajan de forma conjunta para crear la percepción de que constituyen un único elemento que está conectado en el otro extremo del LAG. De esta forma, el *switch* A no nota diferencias desde el punto de vista de la agregación, aunque los puertos se conectan realmente a través de los *switches* B y C.

Los *switches* que forman parte del MC-LAG se comunican sobre el *Inter Switch Link* (ISL). El ISL, que puede ser un LAG normal, permite un correcto reenvío de la información sin originar bucles. En el caso de que el enlace que conecta el *switch* B o el *switch* C con el *switch* A fallase, o si los propios *switches* B ó C dejaran de funcionar, el tráfico se reencaminaría a través del enlace o dispositivo restante, permitiendo redundancia tanto a nivel de enlace como a nivel de dispositivo. Esta tecnología permite por tanto que el tráfico viaje por todos los enlaces de la agregación (configuración activo / activo), en lugar de tener algunos enlaces activos y otros bloqueados (STP).

La inteligencia que permite a los puertos de los *switches* B y C mostrarse como un único LAG al *switch* A, se implementa hoy en día mediante la utilización de mecanismos propietarios. Los *switches* B y C pueden pertenecer, por ejemplo, al mismo fabricante. Por el contrario, el *switch* A, que no participa en la misma tecnología propietaria, puede pertenecer a otro fabricante distinto o tratarse incluso de un tipo de dispositivo diferente. Puede tratarse, por ejemplo, de un servidor con interfaces de red duales conjuntas, mientras que los *switches* B y C podrían ser *switches* Ethernet de un mismo fabricante.

6.1.6. *Transparent Interconnection of Lots of Links* y *Shortest Path Bridging*

MC-LAG es una de las diferentes propuestas que existen como alternativa a STP para construir redes de *data centers* permitiendo configuraciones de red que proporcionan redundancia a nivel de enlace y de dispositivo, recuperación rápida ante fallos y balanceo de la carga de tráfico (configuraciones activo / activo).

TRILL [96] y SPB [97] son otras dos nuevas propuestas que dan solución a los problemas asociados a la utilización de STP en este tipo de redes, como la necesidad de realizar sobreaprovisionamiento en los enlaces debido a las condiciones de bloqueo de puertos que hacen que el tráfico se vea restringido a un árbol libre de bucles. Se trata de dos propuestas competitivas muy similares que tienen el sello del IETF y el IEEE respectivamente. Ambas utilizan protocolos de encaminamiento de estado de enlace para el cálculo de caminos óptimos entre los nodos de la red, lo que permite una utilización completa efectiva del ancho de banda disponible para los múltiples caminos redundantes activos. Sin embargo, a diferencia de los protocolos de encaminamiento tradicionales que operan en el nivel de red, tanto TRILL como SPB operan en el nivel de enlace. El objetivo que se persigue por tanto es virtualizar una determinada red sin añadir complejidad, creando una topología de nivel 2 robusta que proporcione *bridging* multicamino y resolución ante fallos localizados.

TRILL

Los administradores de red que disponen de dispositivos que implementan TRILL pueden crear redes de malla completa en las que todos los enlaces se encuentren disponibles para su utilización (configuración activo / activo). Los dispositivos que soportan TRILL se denominan *RBridges* (*Routing Bridges*) y ejecutan el protocolo de encaminamiento de estado de enlace *Intermediate System to Intermediate System* (IS-IS) para calcular el mejor camino hacia el destino sin la necesidad de bloquear ningún puerto en la red [104]. Se utiliza IS-IS ya que se trata de un protocolo de encaminamiento de nivel de enlace que no requiere de IP para el transporte de tramas.

Para establecer la comunicación entre diferentes *RBridges*, se ha definido un formato de cabecera específico, que se sitúa a continuación de la cabecera MAC estándar. La cabecera TRILL incluye el identificador (o *nickname*) del *RBridge* origen, del *RBridge* destino y un contador de saltos (similar al campo *Time To Live* (TTL) de la cabecera IP) para el *bridging* multicamino. Este contador de saltos minimiza la probabilidad de ocurrencia de bucles en la red TRILL. Cada *RBridge* tiene una copia de la base de datos de estado de enlace global utilizada para el cálculo del siguiente salto considerado como óptimo hacia el *RBridge* destino (Figura 6.12).

En [105] se realiza un estudio en el que se mide la eficiencia de TRILL mediante su comparación con STP. De los resultados se extrae que aunque TRILL ofrece una serie de ventajas relacionadas con el despliegue de futuras redes de *data center*, presenta ciertas desventajas que podrían afectar al rendimiento de este tipo de redes.

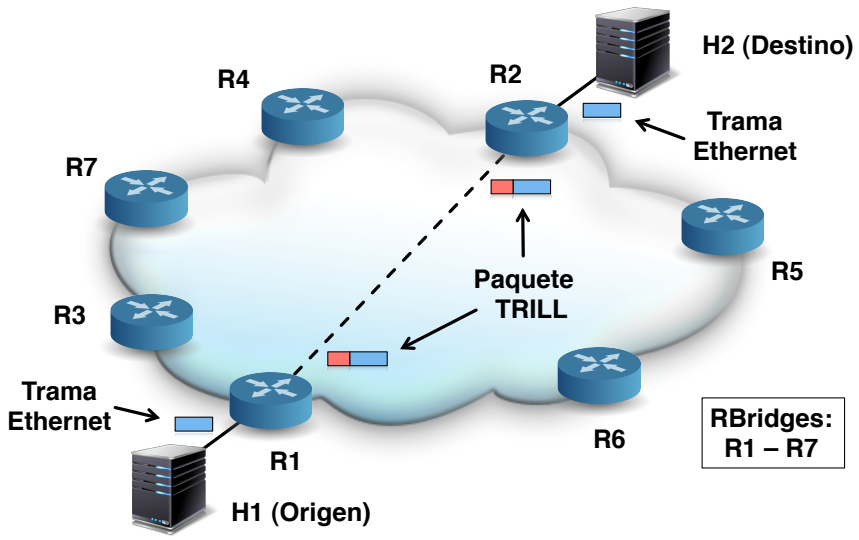


Figura 6.12: *RBridging*.

Por un lado, es menos eficiente en el reenvío de paquetes que STP (en torno a un 30 %), mientras que para grandes flujos de información, TRILL y STP son similares en términos de riesgo de congestión y pérdida de paquetes.

SPB

SPB [97] es un protocolo cuyo foco está dirigido a proporcionar soluciones para empresas y para operadores. En el entorno empresarial, su principal área de implantación son los entornos de *data center* y las redes de campus, mientras que desde el punto de vista referente a los operadores puede verse como una alternativa o una extensión a *Hierarchical Virtual Private LAN Service* (H-VPLS). Este protocolo cuenta con varios años de despliegue previo en el mercado de los operadores de red, lo que supone una ventaja inmediata con respecto a TRILL, ya que éste último es completamente nuevo.

SPB presenta dos variantes de *bridging* multicamino: *Shortest Path Bridging VLAN* (SPBV) y *Shortest Path Bridging Mac-in-Mac* (SPBM). Ambas variantes utilizan, al igual que TRILL, IS-IS como protocolo de estado de enlace para calcular los caminos mínimos entre nodos. SPBV utiliza un identificador *Shortest Path VLAN ID* (SPVID) para designar el alcance a los nodos, mientras que SPBM, por el contrario, utiliza una combinación de *Backbone MAC* (BMAC) y *Backbone VLAN ID* (BVID) para el mismo propósito. SPB construye automáticamente un camino mínimo a lo largo de la red para extender completamente la conectividad, requisito fundamental para el soporte de la virtualización en redes de *data center*.

Diferencias entre TRILL y SPB

La mayor diferencia que existe entre SPB y TRILL corresponde al modo en que ambos protocolos acometen el reenvío del tráfico. SPB utiliza un método que permite usar los múltiples caminos de la red: una vez que IS-IS descubre la topología de red, SPB crea los caminos mínimos en base a métricas de enlace para asignar el tráfico (*unicast* y *multicast*) a estos caminos.

A diferencia de SPB, TRILL utiliza dos mecanismos diferentes para reenviar paquetes en función al tipo de tráfico. Para tráfico *unicast*, donde el *RBridge* de salida es conocido, utiliza la base de datos de estado de enlace IS-IS para asignar el tráfico al camino óptimo (similar a SPB). Sin embargo, para tráfico *multicast*, *broadcast* y tráfico de tipo desconocido, TRILL utiliza árboles de distribución y un *RBridge* como *root* para el reenvío.

6.1.7. Comparación de los Protocolos que Permiten la Agregación de Enlaces

Una vez que se ha realizado una revisión de las distintas aproximaciones que permiten la agregación de enlaces en las redes de comunicaciones, se procede a realizar una comparación de sus características más importantes.

Esta revisión parte del estándar IEEE 802.1ax que, mediante el protocolo LACP, permite agregar un conjunto de enlaces individuales con el objetivo de formar un LAG entre dos dispositivos de la red. Debido a que el ámbito de aplicación de este protocolo se limita únicamente a la conexión de dos dispositivos, proporciona redundancia a nivel de enlace pero no garantiza redundancia a nivel de dispositivo.

Para dar solución al problema de pérdida de conectividad ligado a la posible caída de uno de los dos dispositivos que actúan como extremos del LAG, se han estudiado un conjunto de mecanismos como VRRP, STP, MC-LAG, TRILL y SPB que, además de proporcionar redundancia a nivel de enlace derivada del uso de LACP, también proporcionan redundancia a nivel de dispositivo.

Para todos los mecanismos estudiados se ha explicado el modo de funcionamiento desde el punto de vista de la agregación de enlaces haciendo hincapié en los componentes que son necesarios para su utilización. Se han descrito tanto sus características como una serie de posibles situaciones problemáticas en aspectos concretos que han requerido de la aparición de nuevos mecanismos para poder solventarlas.

La Tabla 6.2 permite comparar las características de las distintas tecnologías de agregación de enlaces estudiadas. Para cada tecnología se indica si produce un incremento en el ancho de banda disponible, si proporciona redundancia a nivel de enlace o a nivel de dispositivo, si añade resiliencia o balanceo de carga y las desventajas que se desprenden de su utilización.

Tabla 6.2: Comparación de las características de los distintos protocolos que permiten la agregación de enlaces.

Protocolo	**Incremento del ancho de banda**	**Redundancia a nivel de enlace**	**Redundancia a nivel de dispositivo**	**Resiliencia**	**Balanceo de carga**	**Desventajas**
LACP [92]	✓	✓	✗	✓	✓	Pérdida de conectividad ante la caída de uno de los dos dispositivos que son extremos del LAG. Problemas en la reordenación de tramas que pertenecen a una misma conversación. Limitación del ancho de banda para una determinada conversación.
VRRP [93]	✓	✓	✓	✓	✓	Reducción significativa del ancho de banda asociado a los enlaces que involucran a los *routers* de *Backup* si no se realiza balanceo de carga.
STP [94]	✗	✓	✓	✓	✗	El bloqueo de puertos y caminos hace que se reduzca significativamente el ancho de banda. Convergencia tras cambio topológico de varios segundos (RSTP) o en torno a 30 segundos (STP) en el peor de los casos [102, 103].
MC-LAG [95]	✓	✓	✓	✓	✓	Utilización de mecanismos propietarios en el extremo *dual-homed* del MC-LAG.
TRILL [96]	✓	✓	✓	✓	✓	Requiere de nueva infraestructura para soportar los mecanismos de encapsulación utilizados (cabecera TRILL, IS-IS). Menos eficiente que STP en el reenvío de paquetes. Para grandes flujos de información, TRILL y STP son similares en términos de riesgo de congestión y pérdida de paquetes [105].
SPB [97]	✓	✓	✓	✓	✓	Requiere de nueva infraestructura para soportar los mecanismos de encapsulación utilizados (Mac-in-Mac, IS-IS). El reenvío *multicast* puede requerir el cálculo de árboles *multicast* adicionales que añadan complejidad desde el punto de vista de la depuración y resolución de problemas.

6.2. Eficiencia Energética en Grupos de Agregación de Enlaces

La capacidad de las redes *backbone* está sobreaprovisionada para poder satisfacer en todo momento la demanda de tráfico requerida y permitir la posibilidad de reencaminar el tráfico ante situaciones de fallo en los enlaces. En este tipo de redes, los pares de *routers* se encuentran normalmente conectados por un conjunto de enlaces que constituyen un enlace lógico o LAG que participa en el protocolo de encaminamiento intradominio [106].

Sin embargo, se estima que la utilización media de los enlaces en las redes *backbone* de los *Internet Service Provider* (ISP) se encuentra en torno al 30-40 % del total de su capacidad [67]. Por esta razón, aunque cierto sobreaprovisionamiento es necesario, es posible reducir el consumo de energía de este tipo de redes mediante la posibilidad de ajustar dinámicamente la capacidad disponible al apagar un conjunto de enlaces cuando la carga de tráfico así lo permita y volviéndolos a activar cuando los requisitos del tráfico se incrementen.

La eficiencia energética en el ámbito de la agregación de enlaces ha recibido un gran interés recientemente debido a la gran cantidad de energía que es desperdiciada cuando el conjunto de enlaces que constituyen un LAG se encuentra activo y la carga del mismo es baja. Esta situación se origina debido a que aún no se ha conseguido independizar el consumo de energía de la capa física de los dispositivos (PHY) de la carga de tráfico una vez que un determinado enlace está activo.

Al igual que se ha realizado en la Sección 2.3, en la que se lleva a cabo una revisión de la literatura relacionada con los mecanismos que permiten mejorar la eficiencia energética de las redes cableadas, a continuación se identifican una serie de trabajos que persiguen el mismo objetivo pero que se centran concretamente en la posibilidad de ahorrar energía en LAG. Para ello, se focaliza en las dos técnicas basadas en hardware estudiadas y aplicadas durante el desarrollo de esta tesis: *Sleeping* y *Rate Adaptation*.

6.2.1. Aplicación de la Técnica *Sleeping* en Grupos de Agregación de Enlaces para el Ahorro de Energía

Con el objetivo principal de reducir la energía consumida por un grupo de enlaces Ethernet que se organizan en un LAG, existe una aproximación inicial en la patente propuesta por [107] en la que se propone que los *switches* que detecten una baja utilización de los múltiples enlaces que forman un LAG, negocien la transición de un subconjunto de estos enlaces hacia un estado de menor energía.

De esta forma, en situaciones de baja carga, varios enlaces permanecerán activos mientras que el resto pasarán a dormir (*Sleeping, standby*). En el caso de que los requisitos puntuales del tráfico se incrementen o se produzca un fallo en alguno de los enlaces activos, se producirá un reestablecimiento selectivo de los enlaces que se encuentran en modo de baja energía para que se pueda distribuir el tráfico por el conjunto de enlaces disponibles cuando sea necesario.

Esta idea se estudia también en [108] donde, tras realizar mediciones para obtener el consumo de energía de un conjunto de *switches* en función del número de enlaces que los conectan, proponen un esquema de control dinámico de la capacidad de transmisión entre estos dispositivos con el objetivo de reducir el consumo de energía en función de los cambios en el volumen de tráfico.

Para controlar dinámicamente y gradualmente la velocidad de transmisión, los autores realizan una modificación del protocolo LACP debido a que éste carece de funciones que permitan formar un LAG en base tanto a mediciones como a la estimación del tráfico entrante. La Figura 6.13 ilustra esta modificación del protocolo, que resulta en el proceso que se enumera a continuación:

1. Inicialmente, el *switch* mide el tráfico entrante.

2. A continuación, estima el número de enlaces que son necesarios para satisfacer la demanda de tráfico.

3. Seguidamente, envía una LACPDU hacia el *switch* que actúa como par para notificarle el número de enlaces que son necesarios para formar un nuevo LAG.

4. Por último, el *switch* par que recibe la LACPDU anterior hace que se constituya el nuevo LAG con el número de enlaces identificado.

Para realizar las simulaciones, consideran dos *switches* conectados por un LAG que contiene un máximo de 8 enlaces individuales a 1 Gbps y definen un modelo de tráfico en el que la velocidad media del tráfico entrante a los *switches* oscila entre 0 y 8 Gbps (capacidad máxima) de manera aleatoria.

Además, se consideran diferentes valores para los intervalos de control, es decir, los intervalos de tiempo tras los que se puede realizar una reconfiguración del LAG mediante la activación o la desactivación de enlaces.

A lo largo del tiempo que dura un intervalo de control, se realizan una serie de mediciones a intervalos regulares del *throughput* de entrada. Los valores máximos de *througput* para cada uno de estos (sub)intervalos pasan a formar parte de una distribución empírica (histograma de valores de *throughput*). Una vez que transcurre el tiempo correspondiente al intervalo de control, la capacidad del LAG se adapta si satisface un determinado percentil en dicha distribución.

Los resultados de simulación muestran que si el intervalo de control es pequeño (medio segundo), el número de enlaces del LAG que son necesarios para satisfacer la demanda de tráfico sigue un patrón que, aunque coincide relativamente con los cambios en el volumen de tráfico, hace que se produzcan cambios innecesarios en ciertos instantes de tiempo. Por el contrario, si los intervalos de control son demasiado grandes (5 segundos), el número de enlaces estimados no coincide con el patrón de variación de tráfico entrante y se traduce, además, en una degradación de la calidad del servicio o *Quality of Service* (QoS) (pérdida de paquetes e incremento del *delay*).

Por ello, los autores tratan de llegar a un compromiso entre la cantidad de energía que se puede ahorrar con su propuesta sin que ello repercuta negativamente sobre el rendimiento de la red. Concretamente, para intervalos de control en torno a 800

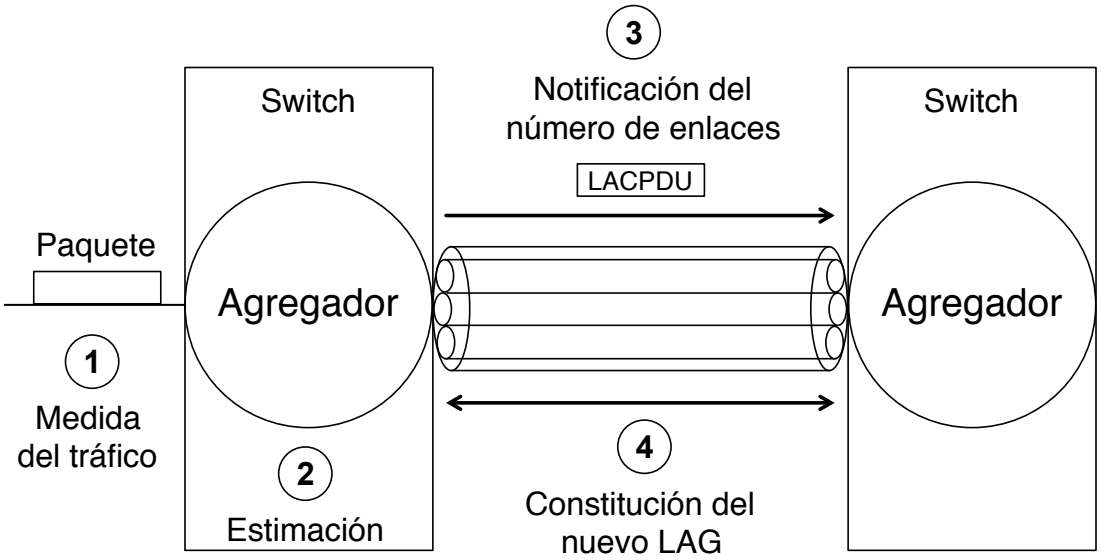


Figura 6.13: Modificación de LACP.

milisegundos, se obtiene un significativo ahorro de energía para los percentiles 50 y 90 de la distribución de valores de *throughput* medidos (en torno a un 40 % y un 30 % de ahorro de energía respectivamente).

Los autores de [109] siguen una aproximación similar a la de [108], ya que también proponen un mecanismo de ahorro de energía en LAG mediante la posibilidad de realizar una extensión sobre LACP en la que se permita la activación y desactivación de los enlaces que constituyen el LAG.

En este caso, los dos extremos del LAG monitorizan su tráfico saliente (en [108] se evaluaba el tráfico entrante) y realizan una propuesta al otro extremo con el número de enlaces activos que estiman necesarios para satisfacer la demanda de tráfico requerida. Para realizar esta negociación, se proponen dos mecanismos diferentes en los que se utilizan distintos tipos de mensajes de control.

El algoritmo de estimación que permite determinar el número de enlaces más apropiado para el LAG usa un umbral de utilización de *buffers* y un conjunto de trazas de tráfico reales con los que se determina el valor de velocidad medio para poder evitar un número elevado de cambios de configuración en los enlaces.

Mediante un conjunto de simulaciones, los autores evalúan una serie de parámetros relacionados tanto con la cantidad de energía que se puede ahorrar con esta aproximación (número de enlaces activos y dormidos en el LAG) como la penalización en el rendimiento derivada de su utilización (tasa de pérdida de paquetes e incremento del *delay* relacionado con el *buffering*).

Entre los parámetros de simulación destaca el escenario propuesto, constituido por un LAG de 8 enlaces individuales a 1 Gbps que conectan un PC con un *switch*. Las trazas de tráfico utilizadas contienen tráfico real de tipo unidireccional correspondiente a dos ISP distintos y fueron obtenidas en intervalos de dos horas para cada uno de los ISP (de 00:00 a 02:00 y de 15:00 a 17:00).

Los resultados muestran que con una frecuencia de muestreo frecuente, se requiere un menor número de enlaces activos en el LAG para satisfacer la demanda de tráfico requerida (ahorro de energía de un 25 % aproximadamente) sin pérdida de paquetes y con un razonable *delay* en términos de *buffering*.

Sin embargo, el número de eventos correspondientes a la activación y desactivación de los enlaces también se ve incrementado. Estas transiciones requieren de una coordinación entre los enlaces que utilizan el protocolo LACP que se traduce en un tiempo no precisamente pequeño (del orden de cientos de milisegundos) para poder llevarse a cabo [62].

En otra aproximación diferente, los autores de [67] proponen un esquema que explota la utilización de la técnica basada en hardware *Sleeping* sobre los enlaces individuales que constituyen los LAG de la red. Concretamente, invitan a los administradores de red a implantar un sistema de gestión de red que busca la oportunidad de apagar los enlaces individuales de los LAG en función de la carga de tráfico en cada instante de tiempo.

Este sistema de gestión de red resuelve un problema de optimización que toma como entradas la topología de la red sobre la que se desea reducir el consumo energético, la matriz de demanda de tráfico y el número enlaces individuales que constituyen cada uno de los LAG de la red. El objetivo concreto que se persigue con este trabajo es calcular la configuración de red óptima en términos de ahorro de energía mediante la minimización del número de enlaces individuales activos satisfaciendo en todo momento las restricciones de demanda de tráfico y de capacidad efectiva de cada uno de los enlaces individuales.

Inicialmente formulan el problema mediante ILP. Sin embargo, al pertenecer a la clase de problemas *NP-completos* verifican un coste polinominal en el tiempo necesario para obtener la solución óptima. Por ello, proponen un conjunto de heurísticas (*Fast Greedy Heuristic* (FGH), *Exhaustive Greedy Heuristic* (EGH) y *Bi-level Greedy Heuristic* (BGH)) con las que evaluar el rendimiento sobre entornos de red realistas. La idea principal que subyace de estas heurísticas consiste en ir "eliminando" enlaces hasta obtener el mínimo conjunto de enlaces individuales que permitan satisfacer la demanda de tráfico dada. Para ello, realizan el cálculo de la asignación de tráfico antes de suprimir cada uno de los enlaces con el objetivo de identificar el mejor enlace a eliminar en cada momento.

Para validar las tres heurísticas indicadas anteriormente, los autores realizan una serie de simulaciones sobre topologías de red con distintas características. Por un lado, aplican su propuesta sobre una topología de red real como Abilene y por otro lado utilizan dos topologías sintéticas correspondientes a un grafo jerárquico de dos niveles y al grafo de Waxman. Las matrices de demanda de tráfico utilizadas se han determinado tras la realización de mediciones para Abilene y mediante la utilización de un modelo de entropía clásico para tráfico urbano [110] para las topologías sintéticas.

La Figura 6.14 muestra los resultados de simulación obtenidos sobre Abilene. Se puede observar que el ahorro de energía obtenido por cada una de las heurísticas consideradas se incrementa de manera muy pronunciada para LAG con 2, 3 y 4 enlaces agregados. Sin embargo, el hecho de disponer de LAG con un número mayor de enlaces agregados no supone grandes beneficios en términos de ahorro de energía.

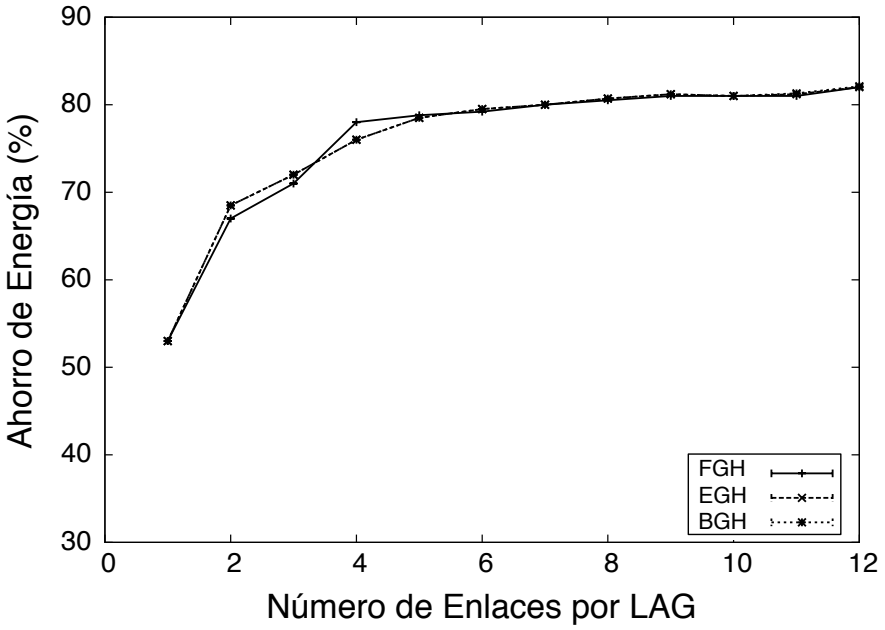


Figura 6.14: Ahorro de energía sobre la topología Abilene en función del tamaño del LAG.

Se puede comprobar también que la forma que describen los resultados para cada una de las heurísticas puede aproximarse a una función de tipo logarítmico. Los resultados para las dos topologías sintéticas resultan en gráficas muy similares y por este motivo no se incluyen en esta sección.

Puesto que el ahorro de energía obtenido por las tres heurísticas es similar, los autores proponen a los administradores de red utilizar el método menos complejo (FGH) de modo que los cálculos necesarios en caso de reoptimizar la solución cuando la carga de tráfico varíe se realicen en el menor tiempo posible.

A diferencia de [67], donde se requieren cambios en la topología de la red que permitan la inclusión de un sistema de gestión encargado de optimizar el consumo de energía de la red en función de la carga de tráfico puntual, el trabajo de [111] propone un método basado en heurísticas que permite a los *routers* actuar a partir de los valores de utilización de sus enlaces en cada momento.

Para ello, se establecen umbrales de utilización en los enlaces con el objetivo de determinar el número de enlaces activos y dormidos por LAG en cada instante de tiempo. En el caso de que la utilización del último enlace que se activó en el LAG supere un determinado umbral, el *router* se encarga de activar otro (sólo uno) de los enlaces del LAG para dar soporte al incremento del tráfico. Por el contrario, si la utilización de un enlace es igual a 0, éste pasa a dormir para poder ahorrar energía.

La topología de red sobre la que se realizan los experimentos es una topología sintética idéntica a la red académica y de investigación estadounidense Internet2,

exceptuando que cada enlace individual a 10 Gbps de Internet2 se convierte en un LAG de 10 enlaces individuales a 1 Gbps en la topología sintética.

Mediante la utilización de trazas de tráfico reales tomadas cada 5 minutos durante 30 días consecutivos y el establecimiento de un 90 % para el umbral de utilización de los enlaces en cada LAG, se obtiene un ahorro de energía del 86 % pero también se produce una superación de la capacidad efectiva en alguno de los enlaces en el 2,7 % de los intervalos de tiempo evaluados.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento del método anterior, los autores de [111] proponen otra solución [112] que considera, además del umbral de utilización de los enlaces indicado anteriormente, la posibilidad de activar más de un enlace en el LAG (desde 1 hasta 3) cuando dicho umbral es superado debido al incremento del tráfico.

Así pues, en lugar de establecer un umbral fijo al 90 % de utilización en los enlaces y aplicar la estrategia de despertar un único enlace cuando se supere este umbral, en este trabajo se propone la posibilidad de realizar diferentes pruebas mediante la combinación de pares "umbral de utilización del enlace-número de enlaces a despertar" con el objetivo de establecer un compromiso entre la cantidad de energía ahorrada y el riesgo de superar la capacidad de los enlaces (*overflow* de tráfico).

Los resultados de simulación indican que para valores de umbrales de utilización diferentes (60 %, 80 % y 90 %), la diferencia en el ahorro de energía es apenas de un 2,3 % entre el valor de ahorro más alto y el más bajo. Por otro lado, se comprueba que el riesgo de *overflow* se reduce en gran medida según el par "umbral de utilización del enlace-número de enlaces a despertar" seleccionado. Si se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo y los de [111], se puede comprobar que el número de situaciones de congestión se reduce drásticamente (en torno a un 75 % de media) aunque para ello se produzca una pequeña penalización en el ahorro de energía conseguido (3,2 %).

Para finalizar esta sección, se presenta el trabajo de [113] en el que se persigue el objetivo de minimizar el consumo de la red de forma global mediante la posibilidad de apagar tanto los chasis de los *routers* y como las tarjetas de línea de los enlaces individuales que constituyen los LAG de manera independiente. Para ello, proponen una heurística basada en la heurística FGH de [67] pero aplican el modelo de consumo que se explica a continuación para cada uno de los componentes que constituyen el tipo de *router* considerado en los experimentos:

Chasis. Consumo constante si está activo y 0 W si está apagado.

Tarjetas de línea. Consumo constante si están activas y 0 W si están apagadas.

Procesador del router. Consumo que depende de la carga de tráfico del *router* en un modo no lineal [114].

Asumiendo que los LAG están constituidos por un conjunto de tarjetas de línea a 38,486 Gbps y que al igual que los *routers*, cada una de ellas se puede apagar de manera independiente, los autores realizan un conjunto de experimentos sobre distintas topologías de red reales (ver Tabla 8.5) constituidas por el conjunto de *routers* y LAG correspondientes a cada una de ellas. Utilizan tráfico real para la

topología *nobel-eu* mientras que crean matrices de tráfico siguiendo una distribución uniforme para el resto de topologías.

Los resultados indican que el ahorro de energía depende en gran medida del tamaño de la red (número de nodos y enlaces) del siguiente modo: para topologías grandes, la heurística propuesta en este trabajo obtiene mejores resultados que FGH [67] mientras que para topologías pequeñas, FGH permite alcanzar un ahorro de energía cercano al óptimo. En todas las simulaciones realizadas se garantiza la QoS alcanzando un valor de 0,52 ns para el *delay* medio.

6.2.2. Aplicación de la Técnica *Rate Adaptation* en Grupos de Agregación de Enlaces para el Ahorro de Energía

Tras haber realizado un estudio de la literatura relacionada con la mejora de la eficiencia energética en redes cabledas constituidas por un conjunto de nodos que se encuentran conectados entre sí a través de un conjunto de LAG, se extrae la principal conclusión de que todos los trabajos identificados aplican el método *Sleeping* para apagar componentes de la red (enlaces individuales de los LAG o *routers*) si la demanda de tráfico así lo permite.

Sin embargo, no se ha identificado ningún trabajo que evalúe la posibilidad de aplicar la técnica *Rate Adaptation* sobre los enlaces individuales que constituyen un LAG y así minimizar el consumo de energía de los enlaces agregados.

Nuestro trabajo se centra, por tanto, en minimizar el consumo de energía en LAG constituidos por un conjunto de enlaces individuales que puedan poseer tanto capacidades de *Sleeping* como de *Rate Adaptation*. Una vez que se obtengan los resultados de ahorro de energía conseguidos por ambos métodos, se pretende realizar una comparación con los resultados obtenidos por los trabajos estudiados en la sección anterior para poder determinar el interés de utilizar la técnica *Rate Adaptation* en los enlaces que componen los LAG, ya que desde nuestro conocimiento podemos decir que esta comparación no se ha realizado con anterioridad en el ámbito investigador relacionado con la eficiencia energética en enlaces agregados.

6.3. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un estudio del estado del arte en el ámbito de la agregación de enlaces. Inicialmente se ha profundizado en las tecnologías que permiten la formación de LAG entre dos dispositivos de red (IEEE 802.1ax, LACP). A continuación se ha expuesto el problema de pérdida de conectividad ligado a una posible situación de fallo en uno de los dos extremos del LAG y un conjunto de tecnologías que tratan de reducir el impacto sobre el rendimiento de la red derivado de la ocurrencia de este tipo de casos (VRRP, STP, MC-LAG, TRILL y SPB).

Una vez conocidas las tecnologías que permiten realizar la agregación de enlaces individuales en LAG, se ha realizado una comparación entre ellas en la que se han considerado diferentes características como el incremento del ancho de banda, la redundancia a nivel de enlace y a nivel de dispositivo, la resiliencia y las principales

desventajas derivadas de su uso. Además, se ha revisado la literatura relacionada con la propuesta de mecanismos que permitan mejorar la eficiencia energética de las redes cableadas mediante la actuación sobre LAG. Aunque se ha podido comprobar la existencia de una gran cantidad de propuestas en este ámbito, todas ellas tratan de maximizar el ahorro de energía mediante la aplicación de la ténica *Sleeping* sobre los enlaces individuales que constituyen los LAG. Sin embargo, no se ha identificado ningún trabajo que aplique la técnica *Rate Adaptation* para conseguir el mismo objetivo.

Por ello, con el trabajo realizado en la Parte I de esta tesis se pretende minimizar el consumo de energía de un LAG aplicando sobre el conjunto de enlaces individuales que lo forman las técnicas basadas en hardware *Sleeping* y *Rate Adaptation*, así como el conjunto de conclusiones obtenidas en dicha parte.

En los siguientes capítulos se define el concepto de función de energía equivalente de un LAG, el problema que se desea resolver y se realizan una serie de experimentos que arrojan un conjunto de resultados de modo que podamos extraer una serie de conclusiones en relación a las características deseables que debe tener un LAG para que se maximice la cantidad de energía ahorrada en la red.

6. GRUPOS DE AGREGACIÓN DE ENLACES: PROTOCOLOS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Capítulo 7

Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces

> "Todas las verdades son fáciles de entender, una vez descubiertas. El caso es descubrirlas."
>
> Galileo Galilei

Una vez conocidas las tecnologías que permiten agregar enlaces y los trabajos existentes en la literatura que tienen como objetivo reducir el consumo de energía de las redes cableadas en base a la actuación sobre los LAG que las componen, en la Parte II de esta tesis se pretende proponer un diseño energéticamente eficiente de este tipo de componentes mediante la optimización de su consumo de energía.

Partiendo de las definiciones de nivel de energía, distribución de energía y función de energía de un enlace individual descritas en el Capítulo 3, en este capítulo se define formalmente el concepto de Función de Energía Equivalente (FEE) de un LAG con el objetivo de minimizar su consumo energético asociado. Esta FEE caracteriza el consumo energético de un LAG del mismo modo que una función de energía concreta caracteriza el consumo energético de un determinado enlace.

Una vez definido este concepto, se procede a realizar su cálculo mediante la utilización de técnicas de optimización. Por último, se incluyen una serie de ejemplos que permiten conocer cuál es la secuencia de pasos seguidos por estas técnicas para obtener la FEE de una serie de LAG con distintas características.

7.1. Definición de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces

Sea un LAG $b_{i,j} \in B$, el cual conecta el *router* $i \in V$ con el *router* $j \in V$, una agregación de un número discreto $p \in \mathbb{N}; p \geq 2$ de enlaces individuales $e_{i,j} \in E$:

$$b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, ..., e^k_{i,j}, ..., e^p_{i,j}\}, \forall e^k_{i,j} \in b_{i,j}, \forall k \in [1, p] \in \mathbb{N} \tag{7.1}$$

la FEE, $f_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$ se define como:

$$f_{b_{i,j}} : r_{b_{i,j}} \longrightarrow w_{b_{i,j}} \Longleftrightarrow \forall x \in r_{b_{i,j}} \exists y \in w_{b_{i,j}} \setminus (x, y) \in f_{b_{i,j}} \tag{7.2}$$

donde

$$r_{b_{i,j}} = \{r^1_{b_{i,j}}, r^2_{b_{i,j}}, ..., r^q_{b_{i,j}}, ..., r^{n_{b_{i,j}}}_{b_{i,j}}\}, \forall r^q_{b_{i,j}} < r^{q+1}_{b_{i,j}} \in \mathbb{R} \tag{7.3}$$

$$w_{b_{i,j}} = \{w^1_{b_{i,j}}, w^2_{b_{i,j}}, ..., w^q_{b_{i,j}}, ..., w^{n_{b_{i,j}}}_{b_{i,j}}\}, \forall w^q_{b_{i,j}} < w^{q+1}_{b_{i,j}} \in \mathbb{R} \tag{7.4}$$

siendo $r_{b_{i,j}} \in L$ la distribución de energía del LAG y $w_{b_{i,j}} \in M$ la imagen de $f_{b_{i,j}}$, es decir, el conjunto ordenado de valores de consumo instantáneo correspondientes a $r_{b_{i,j}} \in R$.

La Figura 7.1 muestra la descripción de un LAG genérico, $b_{i,j} \in B$, junto con los conceptos necesarios para definir su FEE. Como se puede comprobar, al igual que los enlaces individuales en la Parte I, los LAG pueden operar según un número discreto de niveles de energía, $n_{b_{i,j}} \in \mathbb{N}; n_{b_{i,j}} \geq 1$.

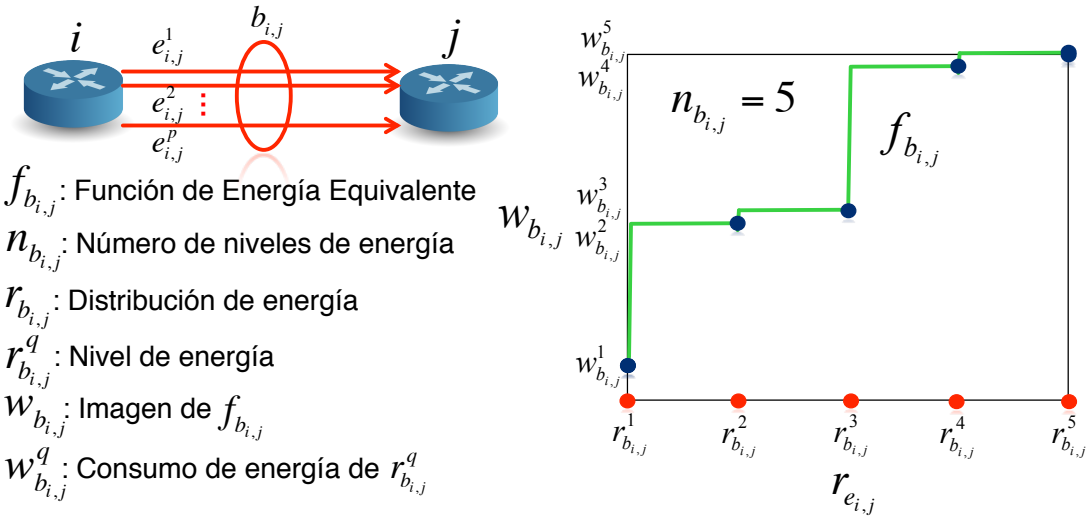


Figura 7.1: Descripción de un LAG o enlace agregado.

El objetivo principal que se persigue con la definición de FEE de un LAG $b_{i,j} \in B$ es el de minimizar el consumo de energía instantáneo del propio LAG para una carga de tráfico puntual dada. El foco se pone ahora en mejorar la eficiencia energética de los enlaces agregados en lugar de intentar reducir el consumo de energía de los enlaces individuales, aunque para ello se aprovechan las capacidades que estos enlaces individuales presentan para poder ahorrar energía de forma independiente. De hecho, para que el LAG $b_{i,j} \in B$ pueda reducir su consumo energético, al menos uno de los enlaces $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$ que lo constituyen debe ser capaz de poder cambiar de nivel de energía, es decir, $\exists k \in [1, p] \in \mathbb{N} \backslash n_{e^k_{i,j}} \geq 2$.

A continuación se describe el proceso de cálculo de la FEE de un LAG mediante la utilización de técnicas de optimización.

7.2. Cálculo de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces. Definición del Problema

Con el cálculo de $f_{b_{i,j}}$ se pretende obtener, de entre todas las FEE que pueden ser aplicables al LAG $b_{i,j} \in B$ a partir de sus enlaces $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$, la FEE óptima que presente un consumo de energía mínimo para la distribución de energía, $r_{b_{i,j}} \in L$, del propio LAG, o lo que es lo mismo, para cada uno de los $n_{b_{i,j}} \in \mathbb{N}; n_{b_{i,j}} \geq 1$ niveles de energía, $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$, a los que el LAG $b_{i,j} \in B$ puede configurarse. Para ello adoptamos la siguiente formulación de programación lineal o *Linear Programming* (LP):

$$w^q_{b_{i,j}} = \text{mín} \sum_{k=1}^{p} f_{e^k_{i,j}}(r^x_{e^k_{i,j}}), 1 \leq x \leq n_{e^k_{i,j}}, \forall r^x_{e^k_{i,j}} \in r_{e^k_{i,j}} \tag{7.5}$$

sujeto a

$$r^q_{b_{i,j}} \geq \sum_{k=1}^{p} r^x_{e^k_{i,j}}, \forall r^x_{e^k_{i,j}} \in r_{e^k_{i,j}} \tag{7.6}$$

Así pues, el problema del cálculo de la FEE de un LAG se divide en dos partes:

- Por un lado se pretende conseguir la configuración de mínimo consumo de energía, $w^q_{b_{i,j}} \in w_{b_{i,j}}$, para un determinado elemento $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$ de la distribución de energía del LAG $b_{i,j} \in B$ (ecuación 7.5).
- Por otro lado se pretende que la FEE del LAG, $f_{b_{i,j}}$, sea de consumo mínimo para todos los elementos de su distribución de energía, $r_{b_{i,j}} \in L$ (ecuación 7.6).

Para ello, la formulación LP (ecuación 7.5) permite obtener el consumo de energía óptimo $w^q_{b_{i,j}} \in w_{b_{i,j}}$ del LAG $b_{i,j} \in B$ para una determinada velocidad de operación $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$ mediante la minimización de la suma del consumo de energía de todos los enlaces $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$ que forman parte del LAG en base a la configuración actual de cada uno de ellos.

El consumo de energía instantáneo de un enlace $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$ que forma parte del LAG se obtiene, como en la Sección 3.4, al determinar la velocidad de operación $r^x_{e^k_{i,j}} \in r_{e^k_{i,j}}$ a la que está operando dicho enlace y, posteriormente, al aplicar la función de energía asociada, $f_{e^k_{i,j}}$, sobre dicha velocidad de operación.

En cuanto a la restricción (ecuación 7.6) de la formulación LP, se pretenden calcular cada uno de los elementos $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$ de la distribución de energía del LAG $b_{i,j} \in B$, y que además su consumo de energía asociado sea mínimo.

Para ello, se debe cumplir que la capacidad a la que debe estar configurado el LAG $b_{i,j} \in B$ para cada elemento $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$, debe ser mayor o igual a la suma de las capacidades $r^x_{e^k_{i,j}} \in r_{e^k_{i,j}}$ a las que están configurados los enlaces $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$ que forman parte del LAG.

Así, para un determinado elemento $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$ de la distribución de energía del LAG $b_{i,j} \in B$, se buscan configuraciones (mediante la suma de las capacidades de los enlaces individuales) con una capacidad mayor o igual que la de $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$, de forma que si se encuentra una configuración con mayor capacidad que la del propio elemento pero con un menor consumo energético, dicha configuración pasa a convertirse en una solución potencial.

De este modo, la formulación LP asegura que todos los elementos $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$ de la distribución de energía del LAG $b_{i,j} \in B$ presentan un consumo mínimo y se consigue, por tanto, una tendencia creciente de consumos en la FEE resultante.

7.3. Ejemplos de Cálculo de Función de Energía Equivalente de un Grupo de Agregación de Enlaces

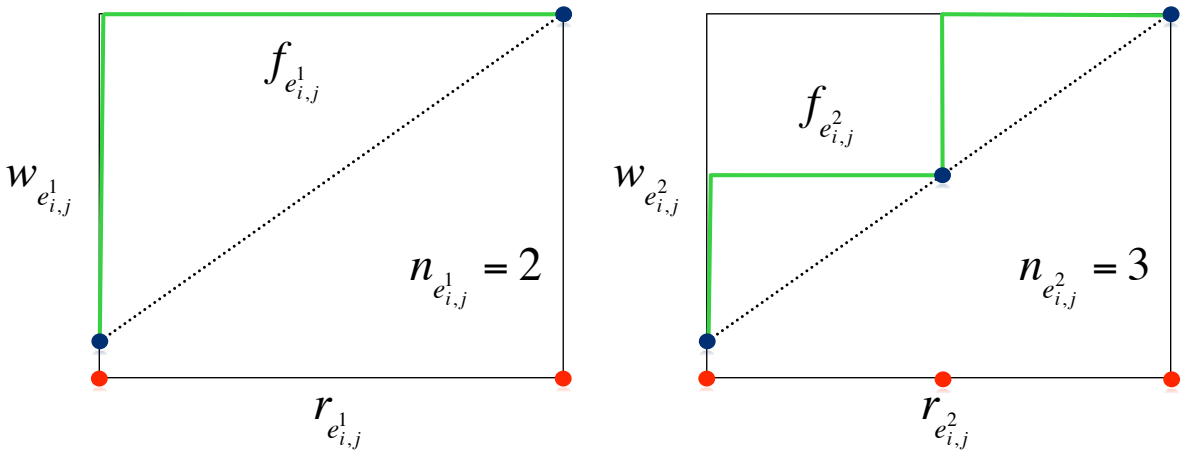
Tras la definición del concepto de FEE de un LAG y la formulación del problema mediante LP para proceder a su cálculo, a continuación se ilustran una serie de ejemplos que permiten conocer cuál es la secuencia de pasos necesaria para poder obtener el conjunto de niveles de energía de la FEE de un LAG a partir de las funciones de energía de los enlaces individuales que lo constituyen.

7.3.1. Ejemplo 1. Grupo de Agregación de Enlaces de 2 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Lineales

En un primer ejemplo, se dispone de un LAG $b_{i,j} \in B$ que conecta dos *routers* $i, j \in V$ mediante la agregación de dos enlaces individuales $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}\}$. Las características de ambos enlaces vienen descritas en la Tabla 7.1 y sus funciones de energía se encuentran representadas en las Figuras 7.2 (a) y 7.2 (b). Se puede observar que las funciones de energía y las distribuciones de energía de los enlaces son de tipo lineal.

Tabla 7.1: Características de los enlaces agregados en el LAG del primer ejemplo.

Enlace ($e^k_{i,j}$)	**Niveles de energía** ($n_{e^k_{i,j}}$)	**Función de energía** ($f_{e^k_{i,j}}$)	**Distribución de energía** ($r_{e^k_{i,j}}$)
$e^1_{i,j}$	2	lineal	lineal
$e^2_{i,j}$	3	lineal	lineal



(a) Función de energía de $e^1_{i,j}$.

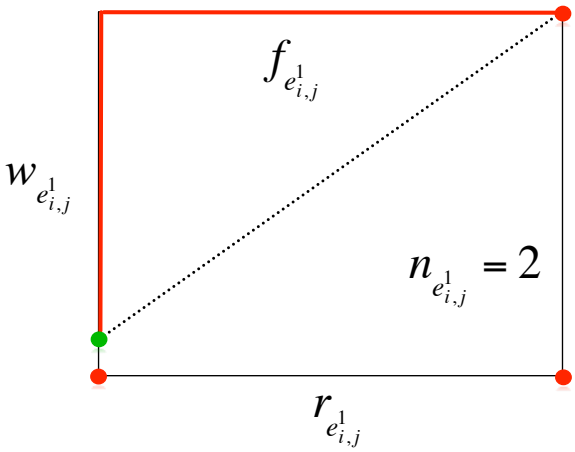
(b) Función de energía de $e^2_{i,j}$.

Figura 7.2: Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del primer ejemplo.

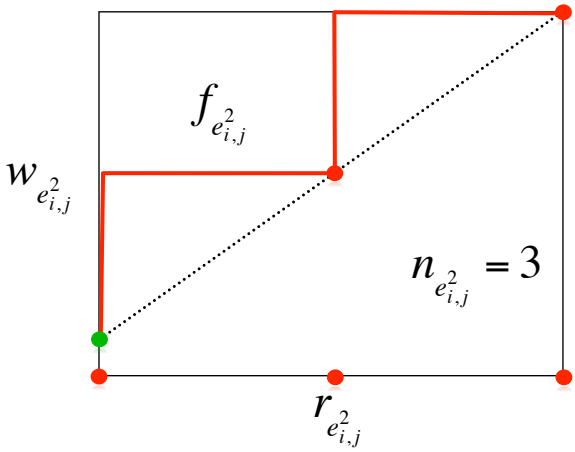
A continuación se explica, paso a paso, cómo se van obteniendo cada uno de los niveles de energía, $r^q_{b_{i,j}} \in r_{b_{i,j}}$, de la FEE del LAG a partir de la configuración de los enlaces individuales (Figuras 7.2 (a) y 7.2 (b)). Para ello, se indica qué niveles de energía se encuentran activos (color verde) y cuáles inactivos (color rojo) en cada uno de los enlaces individuales que constituyen el LAG para dar como resultado una FEE que es de consumo mínimo y tiene asociado un conjunto concreto de niveles de energía, $n_{b_{i,j}} \in \mathbb{N}$.

Ejemplo 1. Primer nivel de energía

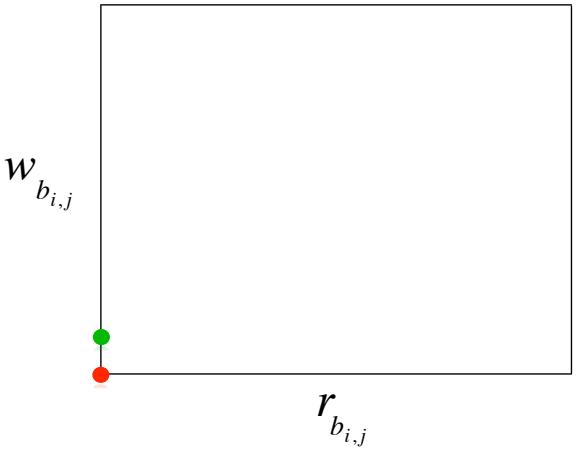
En la Figura 7.3 se puede observar que el primer nivel de energía de la FEE del LAG se corresponde con un modo dormido (*Sleeping*). Para obtener este nivel de mínima energía ha sido necesario configurar los dos enlaces que forman parte del LAG en su nivel de energía mínimo, es decir, ambos enlaces se encuentran dormidos o en *standby*.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

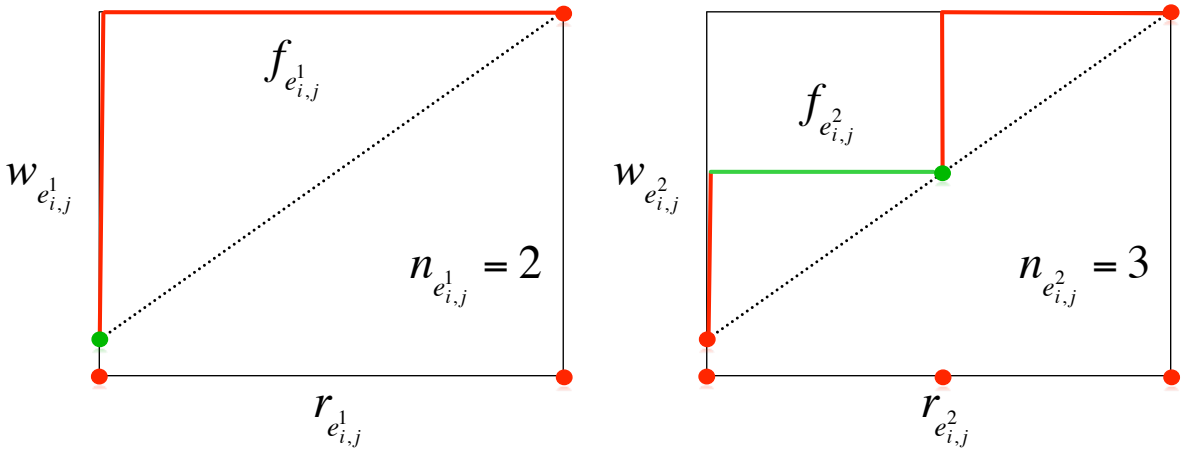


(c) Primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.3: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el primer nivel de energía.

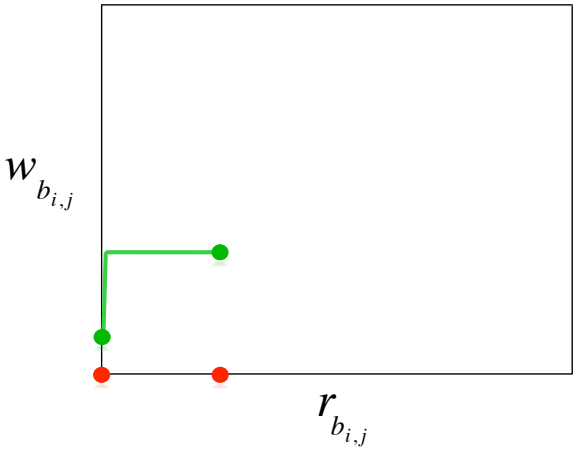
Ejemplo 1. Segundo nivel de energía

En la Figura 7.4 se comprueba que para obtener el segundo nivel de energía de la FEE del LAG, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) se ha de encontrar dormido y el segundo ($e^2_{i,j}$) operando a la mitad de su velocidad máxima de operación.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

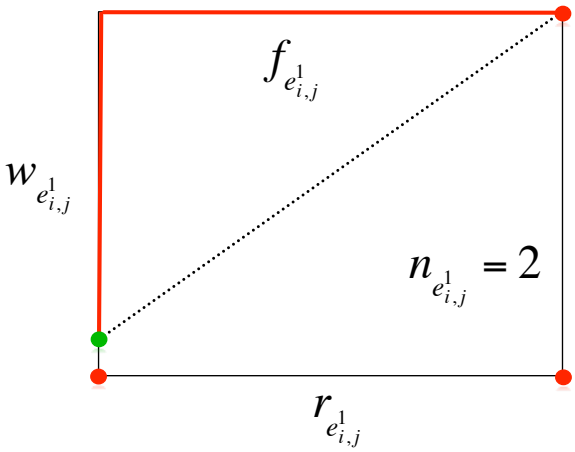


(c) Segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

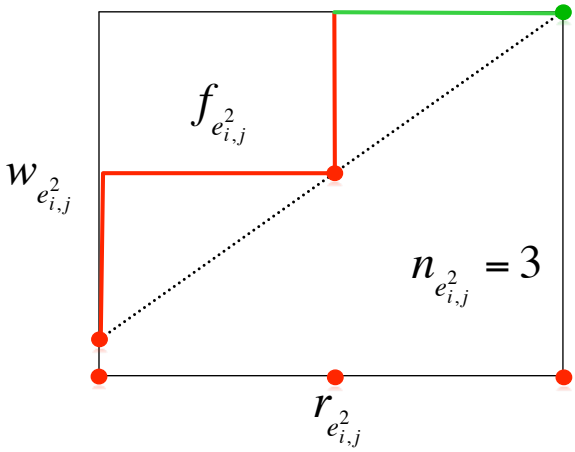
Figura 7.4: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el segundo nivel de energía.

Ejemplo 1. Tercer nivel de energía

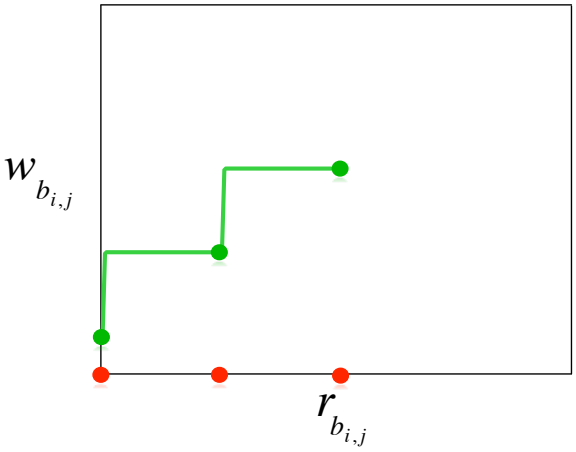
Para conseguir el tercer nivel de energía, uno de los dos enlaces ha de estar dormido y el otro se debe encontrar operando a su máxima velocidad. Por esto, tenemos dos posibles configuraciones que arrojarían el mismo resultado. En la Figura 7.5, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) se encuentra dormido y el segundo ($e^2_{i,j}$) opera a su velocidad máxima.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

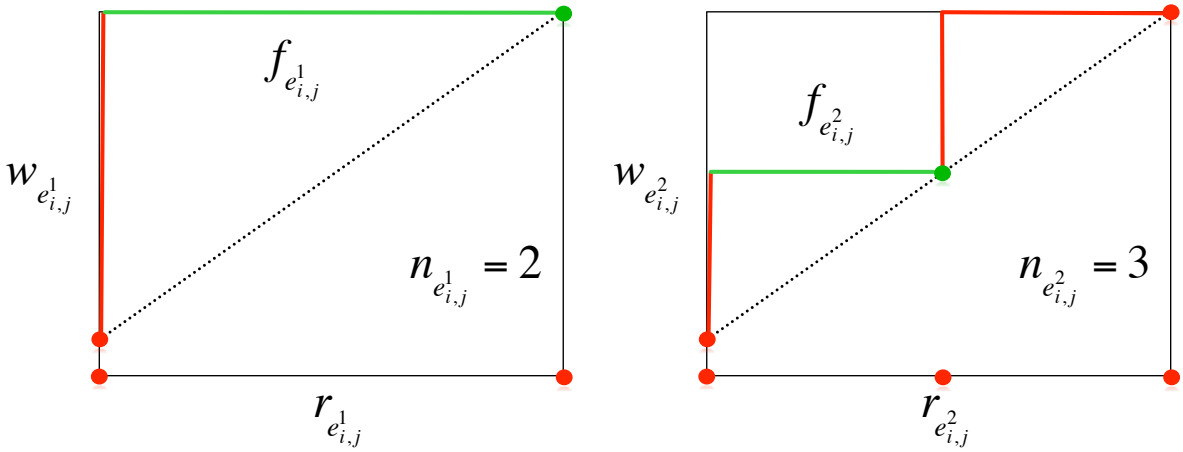


(c) Tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.5: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el tercer nivel de energía.

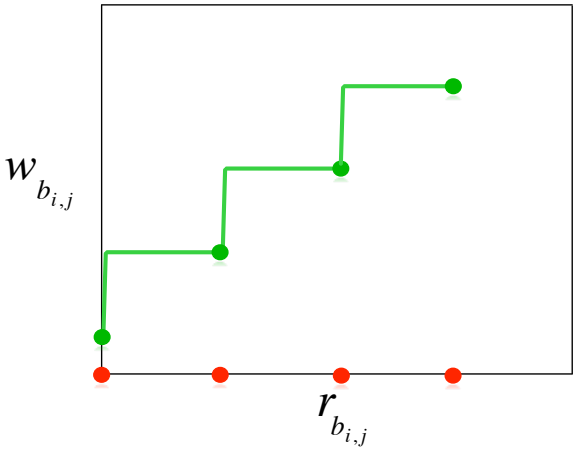
Ejemplo 1. Cuarto nivel de energía

En la Figura 7.6 se comprueba que para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE del LAG, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) se ha de encontrar operando a su máxima velocidad y el segundo ($e^2_{i,j}$) operando a la mitad de su velocidad máxima de operación.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

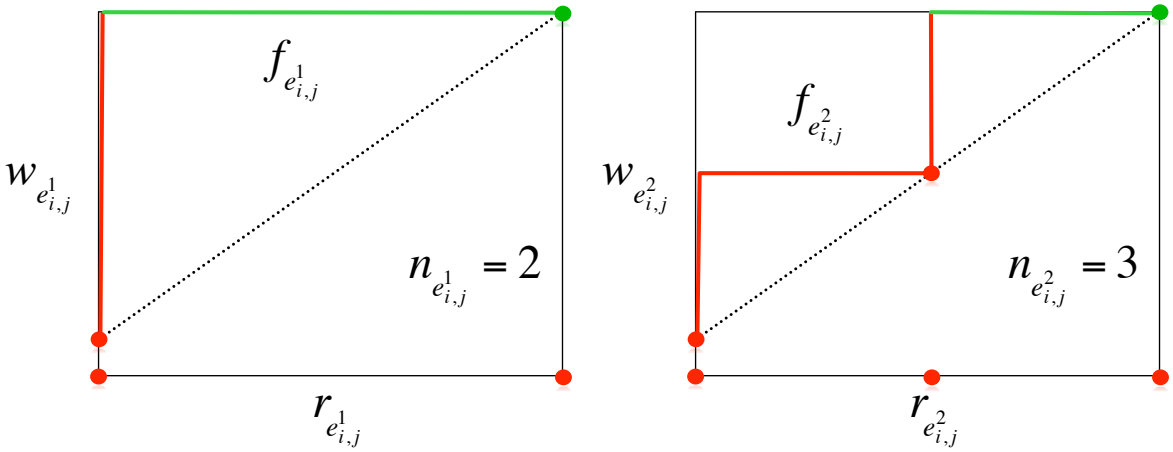


(c) Cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.6: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el cuarto nivel de energía.

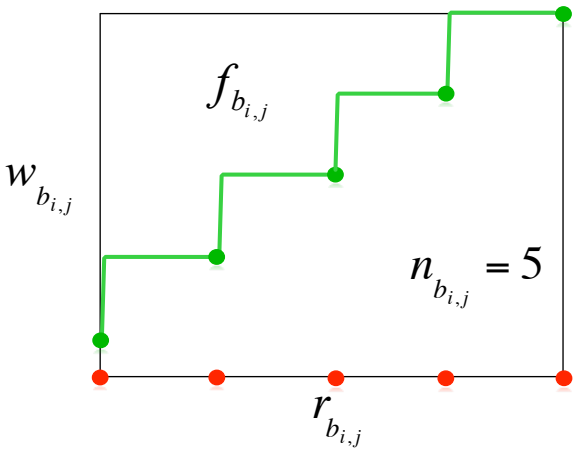
Ejemplo 1. Quinto nivel de energía

Finalmente se obtiene el quinto y último nivel de energía de la FEE, para el cual los dos enlaces se encuentran operando a su máxima velocidad (Figuras 7.7 (a) y 7.7 (b)). La Figura 7.7 (c) muestra la FEE, $f_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$ que se obtiene como resultado de aplicar la formulación LP de la Sección 7.2, concretamente las ecuaciones 7.5 y 7.6. En ella se puede observar que el LAG $b_{i,j} \in B$ puede operar según 5 niveles de energía distintos ($n_{b_{i,j}} = 5$).



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el quinto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el quinto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(c) FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.7: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del primer ejemplo para obtener el quinto nivel de energía.

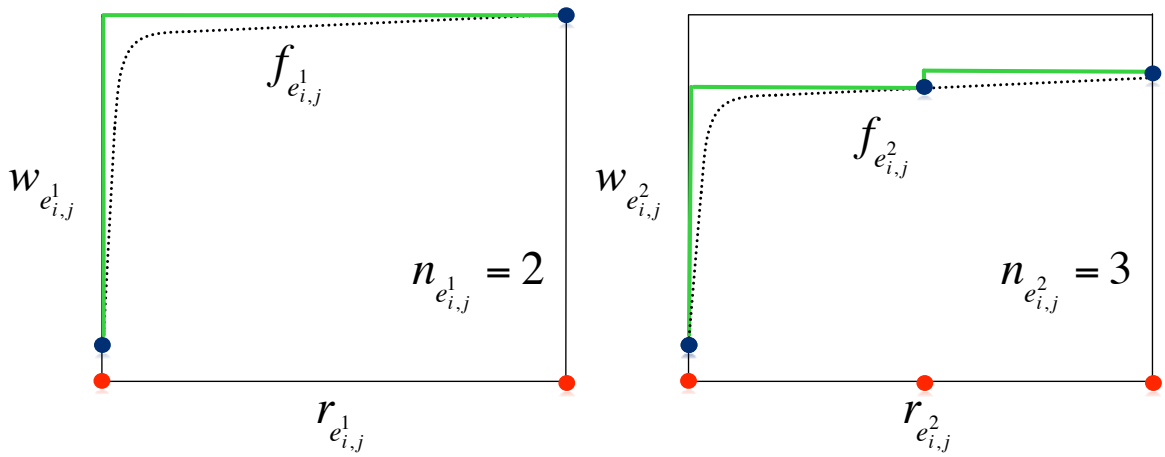
7.3.2. Ejemplo 2. Grupo de Agregación de Enlaces de 2 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Homogéneas

En este segundo ejemplo se muestran los pasos seguidos para obtener la FEE de un LAG compuesto también por dos enlaces $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}\}$, aunque la naturaleza de éstos es diferente a la de los enlaces del primer ejemplo. En la Tabla 7.2 se muestran las características de los dos enlaces que conforman el LAG.

Tabla 7.2: Características de los enlaces agregados en el LAG del segundo ejemplo.

Enlace ($e^k_{i,j}$)	**Niveles de energía** ($n_{e^k_{i,j}}$)	**Función de energía** ($f_{e^k_{i,j}}$)	**Distribución de energía** ($r_{e^k_{i,j}}$)
$e^1_{i,j}$	2	log	lineal
$e^2_{i,j}$	3	log	lineal

Como se puede observar en la Figura 7.8, las funciones de energía de ambos enlaces son de tipo logarítmico y sus distribuciones de energía son de tipo lineal, es decir, existe homogeneidad en ambos aspectos. A continuación, al igual que en el ejemplo anterior, se muestran las configuraciones de ambos enlaces individuales para la obtención de cada uno de los niveles de energía de la FEE resultante.



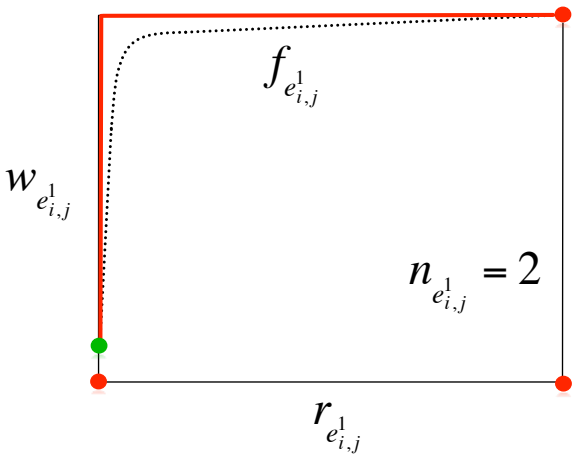
(a) Función de energía de $e^1_{i,j}$.

(b) Función de energía de $e^2_{i,j}$.

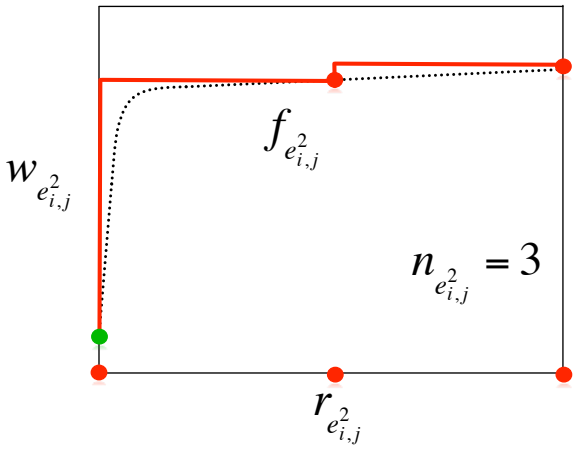
Figura 7.8: Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del segundo ejemplo.

Ejemplo 2. Primer nivel de energía

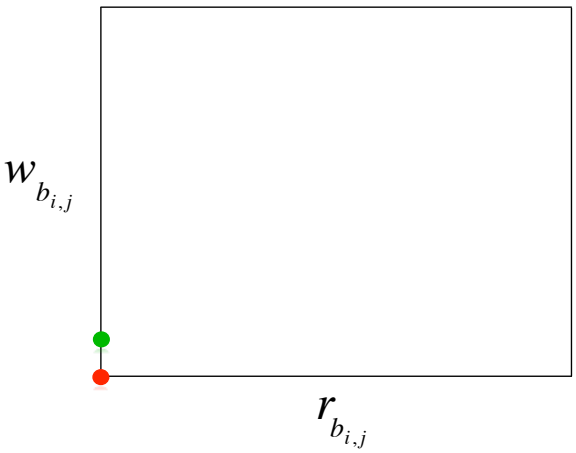
Del mismo modo que ocurría en el ejemplo anterior, el primer nivel de energía de la FEE del LAG se corresponde con el modo dormido o *Sleeping* (Figura 7.9). Para ello, ambos enlaces individuales se han de encontrar también en su nivel de mínima energía.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

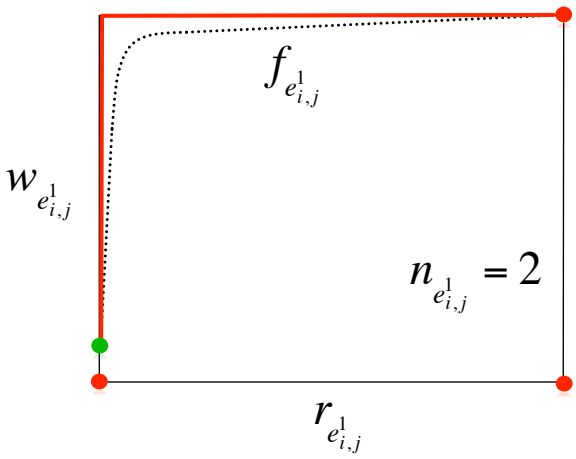


(c) Primer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

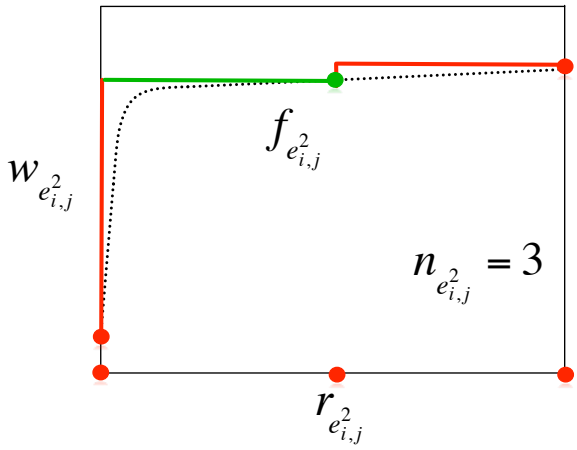
Figura 7.9: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el primer nivel de energía.

Ejemplo 2. Segundo nivel de energía

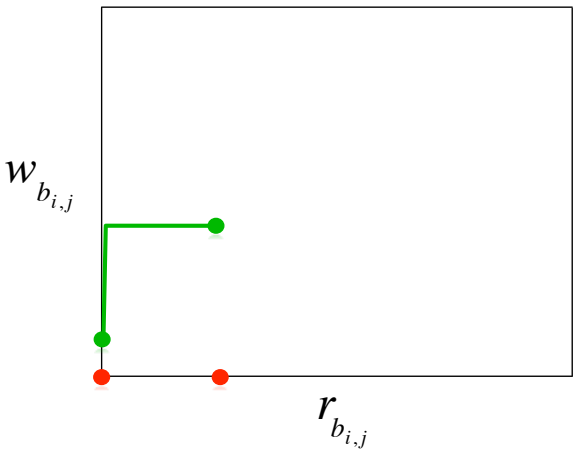
En la Figura 7.10 se comprueba que para obtener el segundo nivel de energía de la FEE del LAG, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) se ha de encontrar dormido y el segundo ($e^2_{i,j}$) ha de estar configurado en su segundo nivel de energía.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

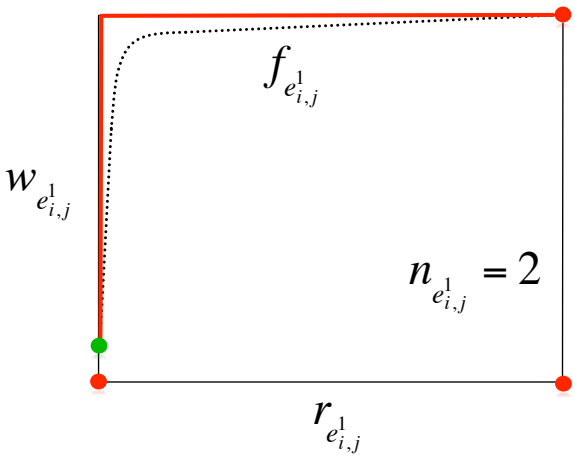


(c) Segundo nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

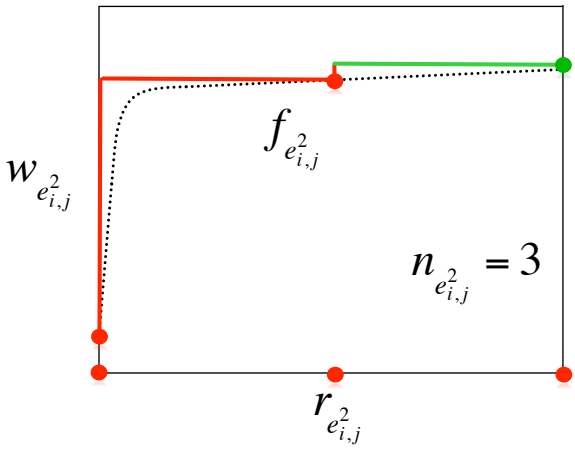
Figura 7.10: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el segundo nivel de energía.

Ejemplo 2. Tercer nivel de energía

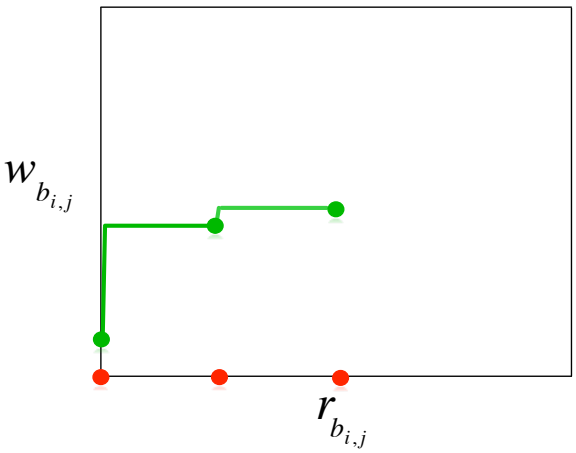
Para obtener el tercer nivel de energía de la FEE del LAG, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) ha de estar dormido y el segundo ($e^2_{i,j}$) se debe encontrar operando a su máxima velocidad (Figura 7.11).



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

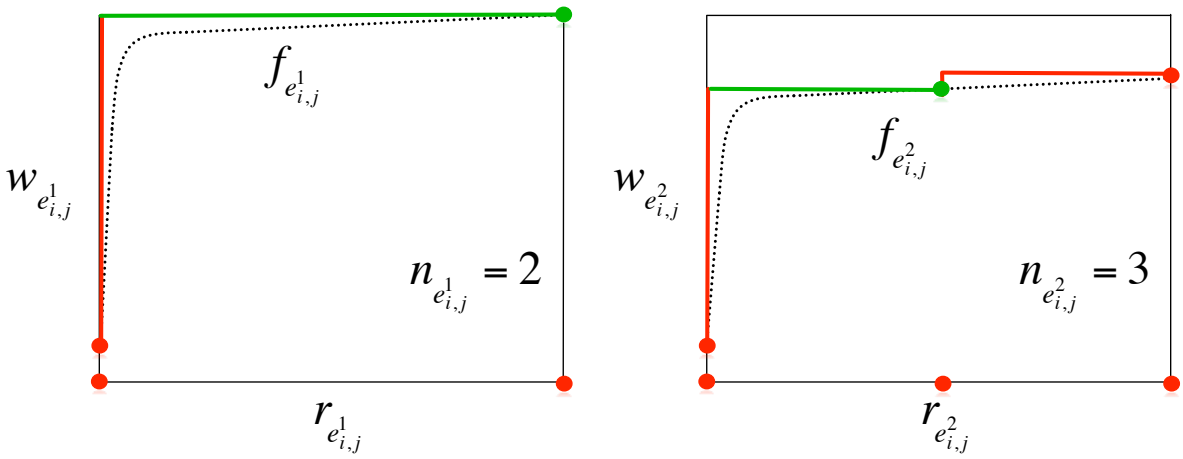


(c) Tercer nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.11: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el tercer nivel de energía.

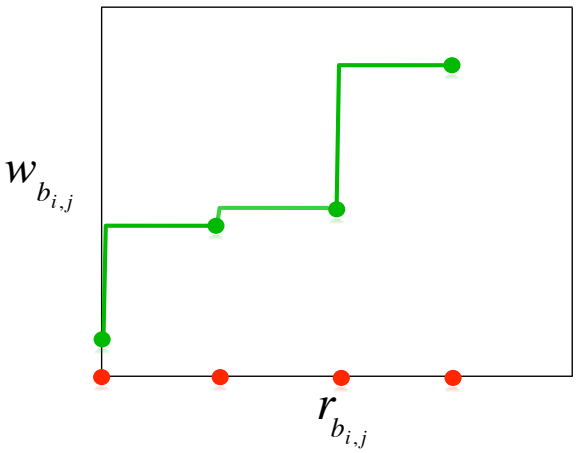
Ejemplo 2. Cuarto nivel de energía

En la Figura 7.12 se comprueba que para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE del LAG, el primer enlace ($e^1_{i,j}$) se ha de encontrar operando a su máxima velocidad y el segundo ($e^2_{i,j}$) ha de estar configurado en su segundo nivel de energía.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



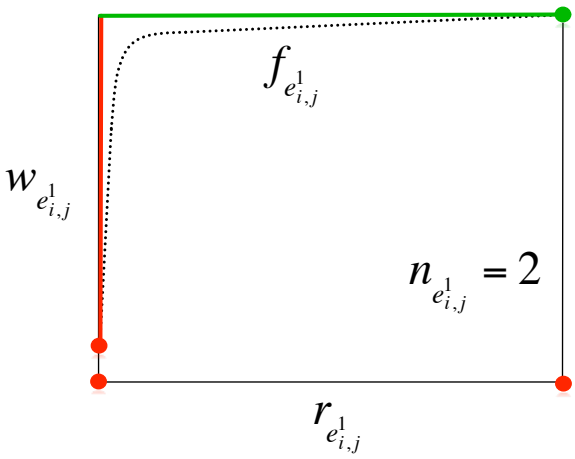
(c) Cuarto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.12: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el cuarto nivel de energía.

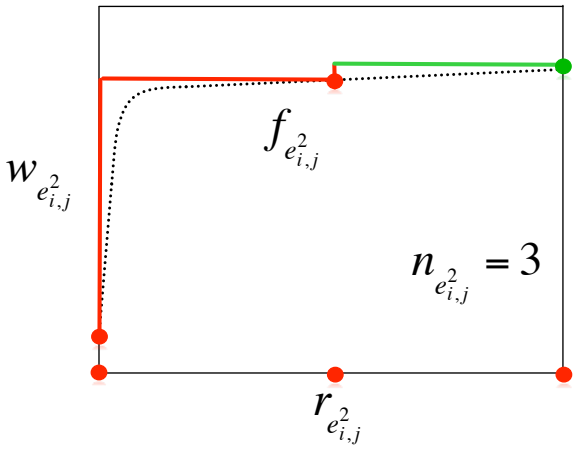
Ejemplo 2. Quinto nivel de energía

Para obtener el último nivel de energía de la FEE, ambos enlaces deben estar configurados con su nivel de energía máximo, es decir, deben estar operando a su máxima velocidad (Figuras 7.13 (a) y 7.13 (b)).

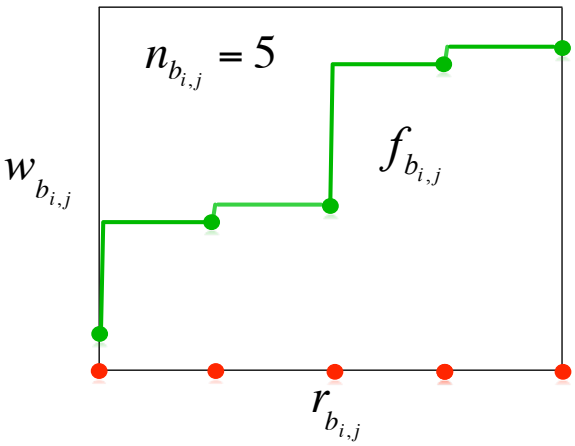
La Figura 7.13 (c) muestra la FEE resultante del LAG en cuestión. En ella, al igual que sucedía en el ejemplo anterior, se puede observar que el número discreto de niveles de energía es igual a 5 ($n_{b_{i,j}} = 5$). Sin embargo, la forma que describe la FEE en este caso es diferente debido a la naturaleza de los propios enlaces que constituyen el LAG.



(a) Nivel de energía seleccionado en $e^1_{i,j}$ para obtener el quinto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(b) Nivel de energía seleccionado en $e^2_{i,j}$ para obtener el quinto nivel de energía de la FEE de $b_{i,j}$.



(c) FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.13: Configuraciones de los dos enlaces que constituyen el LAG $b_{i,j}$ del segundo ejemplo para obtener el quinto nivel de energía.

7.3.3. Ejemplo 3. ¿Cómo se consigue que la Función de Energía Equivalente sea de consumo mínimo?

En este tercer ejemplo se pretende mostrar la necesidad de incluir la restricción correspondiente a la ecuación 7.6 en la formulación LP de la Sección 7.2 para garantizar que la FEE del LAG sea de consumo mínimo.

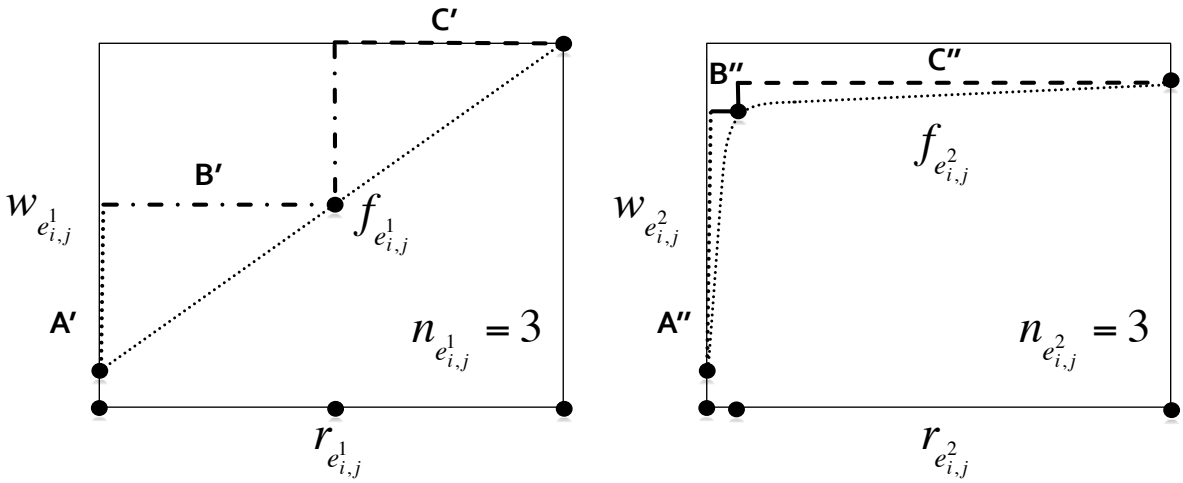
Para ello, se dispone de un LAG $b_{i,j} \in B$ constituido por dos enlaces agregados $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}\}$ cuyas características vienen descritas en la Tabla 7.3. En este caso, existe heterogeneidad en las funciones de energía (lineal y logarítmica) y en las distribuciones de energía (lineal y exponencial) de ambos enlaces.

Tabla 7.3: Características de los enlaces agregados en el LAG del tercer ejemplo.

Enlace ($e^k_{i,j}$)	**Niveles de energía** ($n_{e^k_{i,j}}$)	**Función de energía** ($f_{e^k_{i,j}}$)	**Distribución de energía** ($r_{e^k_{i,j}}$)
$e^1_{i,j}$	3	lineal	lineal
$e^2_{i,j}$	3	log	exp

Cada segmento de las funciones de energía de los enlaces del LAG se representa en la Figura 7.14 con diferente tipo de línea y tiene un identificador determinado que es único. Así, para el enlace $e^1_{i,j} \in b_{i,j}$ de tres niveles de energía, su función de energía $f_{e^1_{i,j}}$ está constituida por tres segmentos (A', B', C'), mientras que la función de energía del enlace $e^2_{i,j} \in b_{i,j}$, también de tres niveles de energía, está compuesta por otros tres segmentos diferentes (A'', B'' y C'').

Esta identificación de segmentos en las funciones de energía va a permitir comprender de una manera más sencilla cómo se obtiene cada uno de los niveles de energía de la FEE, $f_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$.



(a) Función de energía de $e^1_{i,j}$.

(b) Función de energía de $e^2_{i,j}$.

Figura 7.14: Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del tercer ejemplo.

La Figura 7.15 muestra el conjunto de pasos en los que se desglosa la función objetivo (ecuación 7.5 de la Sección 7.2) correspondiente a la formulación LP.

Inicialmente, se realizan todas las combinaciones posibles entre los niveles de energía de $e^1_{i,j}$ (A', B', C') y los niveles de energía de $e^2_{i,j}$ (A'', B'', C''). Para cada combinación, se calcula su capacidad global y el consumo asociado. La capacidad global de una combinación concreta se calcula como la suma de las capacidades correspondientes a los niveles de energía de los dos enlaces, mientras que el consumo asociado se obtiene aplicando sendas funciones de energía (1).

A continuación se realiza una ordenación de menor a mayor capacidad y se comprueba si para una misma capacidad existen dos valores de consumo asociado diferentes. En tal caso, se opta por elegir el de menor consumo (2).

Finalmente, se obtiene el conjunto de elementos de la distribución de energía, $r_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$ y sus consumos mínimos asociados, $w_{b_{i,j}}$ (3). La FEE, $f_{b_{i,j}}$, tiene por tanto 8 niveles de energía y se encuentra representada en la Figura 7.16.

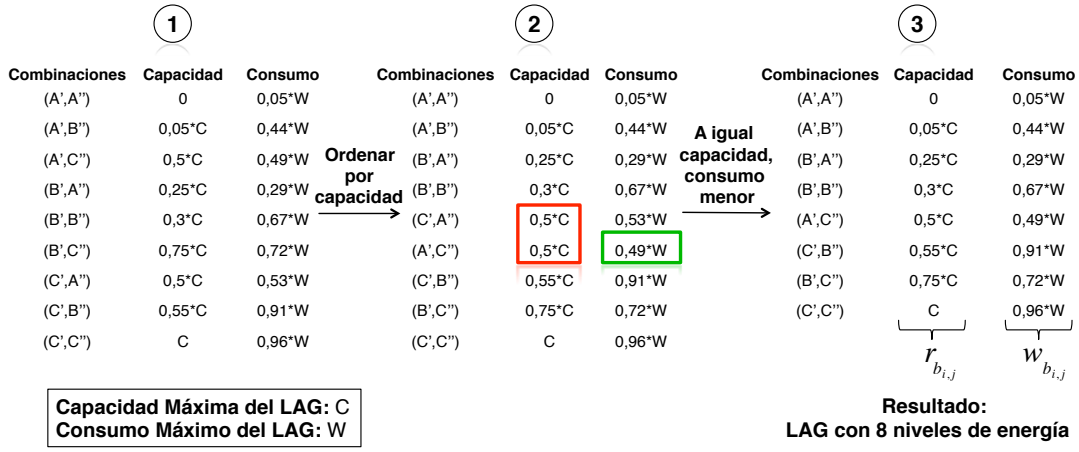


Figura 7.15: Pasos 1 a 3 del proceso de cálculo de FEE de un LAG.

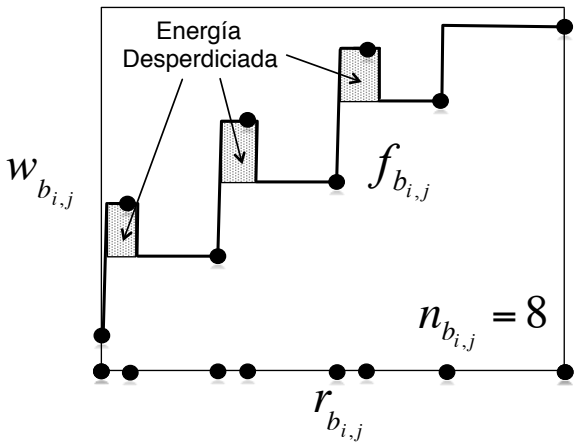


Figura 7.16: FEE del LAG tras el paso 3.

Sin embargo, en la FEE resultante se puede observar que dado un determinado nivel de energía, es posible que exista otro nivel de energía con una capacidad mayor cuyo consumo asociado sea menor.

Para dar solución a este problema, de forma que la FEE sea de consumo mínimo para todos los elementos de su distribución de energía, $r_{b_{i,j}}$, se añade a la formulación LP la restricción de la ecuación 7.6 de la Sección 7.2.

La Figura 7.17 muestra la sucesión de pasos para lograr este objetivo. Partiendo del paso (3) de la Figura 7.15, se comprueba, para cada elemento de la distribución de energía, $r_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$, si existe otro elemento con capacidad mayor y consumo menor. En tal caso, se asigna dicho consumo mínimo al elemento en cuestión de la distribución de energía (4).

Por último, se realiza una simplificación del número de niveles de energía, pasando de 8 a 5 niveles de energía distintos (5). La FEE, $f_{b_{i,j}}$, del LAG $b_{i,j} \in B$ se encuentra representada en la Figura 7.18.

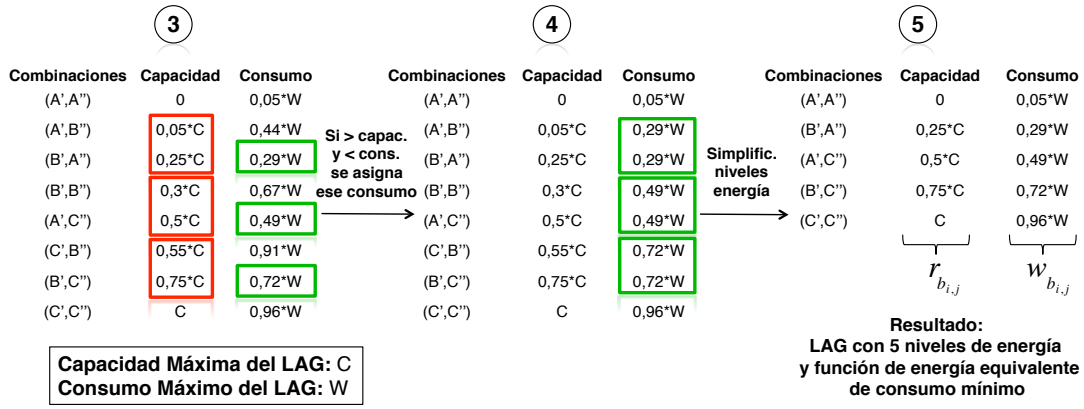


Figura 7.17: Pasos 3 a 5 del proceso de cálculo de FEE de un LAG.

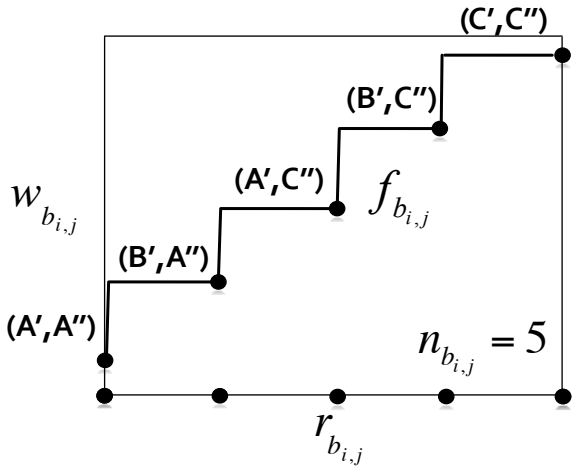


Figura 7.18: FEE resultante del LAG.

7.3.4. Ejemplo 4. Grupo de Agregación de Enlaces de 3 Enlaces con Funciones y Distribuciones de Energía Heterogéneas

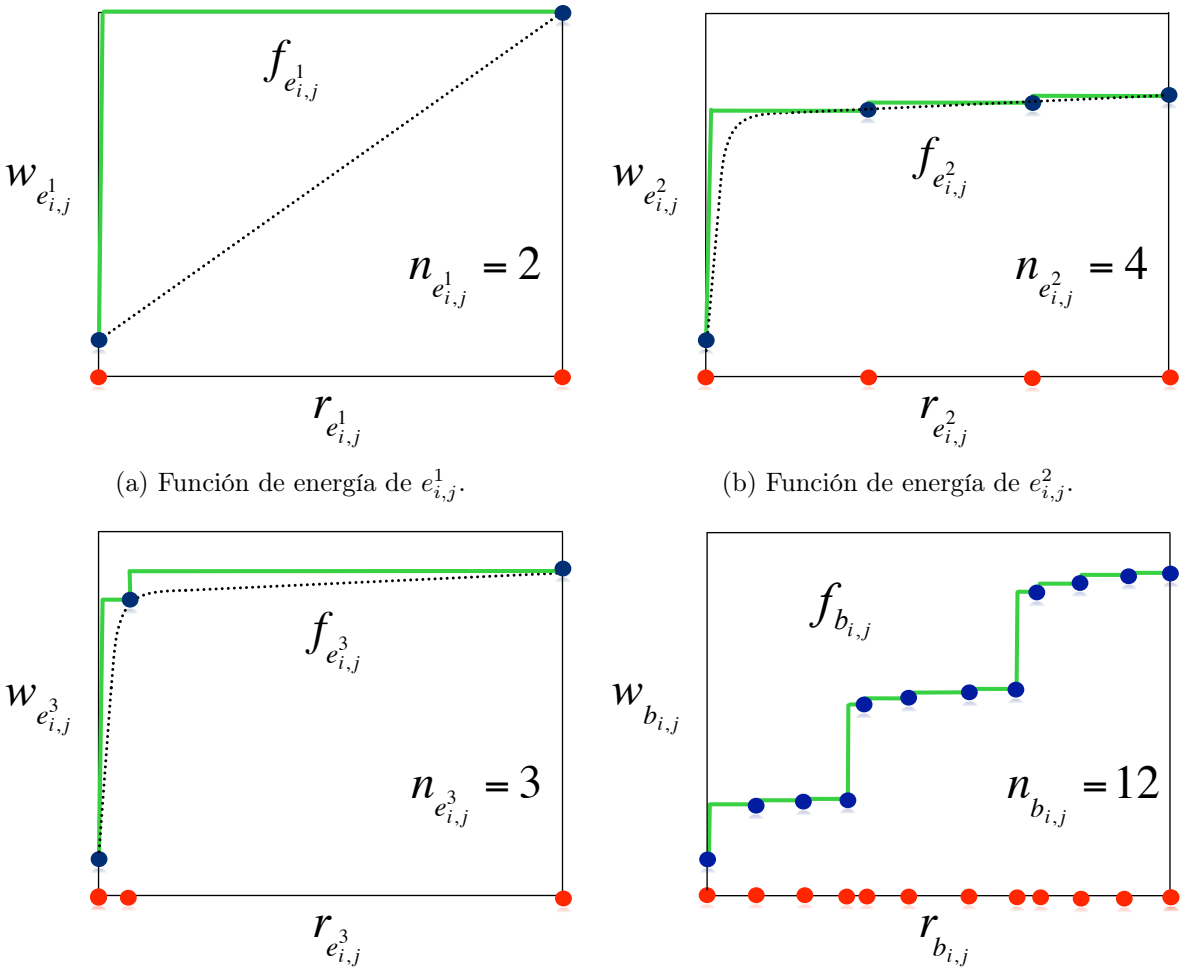
Con la restricción detallada en el tercer ejemplo, se permite calcular la FEE para cualquier tipo de LAG, incluso con un mayor número de enlaces. En este último ejemplo se añade un enlace más al LAG $b_{i,j} \in B$, que pasa a tener un total de tres enlaces agregados $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, e^3_{i,j}\}$ con las características especificadas en la Tabla 7.4. En este caso, también existe heterogeneidad tanto en el tipo de funciones de

energía como en el tipo de distribuciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG.

Tal y como se puede observar en la Figura 7.19, el número de niveles de energía distintos a los que puede configurarse el LAG de este ejemplo una vez calculada la FEE es igual a 12 ($n_{b_{i,j}} = 12$).

Tabla 7.4: Características de los enlaces agregados en el LAG del cuarto ejemplo.

Enlace ($e^k_{i,j}$)	**Niveles de energía** ($n_{e^k_{i,j}}$)	**Función de energía** ($f_{e^k_{i,j}}$)	**Distribución de energía** ($r_{e^k_{i,j}}$)
$e^1_{i,j}$	2	lineal	exp
$e^2_{i,j}$	4	log	lineal
$e^3_{i,j}$	3	log	exp



(a) Función de energía de $e^1_{i,j}$.

(b) Función de energía de $e^2_{i,j}$.

(c) Función de energía de $e^3_{i,j}$.

(d) FEE de $b_{i,j}$.

Figura 7.19: Funciones de energía de los enlaces que constituyen el LAG del cuarto ejemplo (a, b, c) y FEE resultante del propio LAG (d).

7.4. Conclusiones

En este capítulo se ha definido formalmente el problema que se desea resolver en la Parte II de esta tesis, que consiste en proponer un diseño energéticamente eficiente de LAG mediante la optimización de su consumo de energía.

Inicialmente, se ha definido el concepto de FEE de un LAG para caracterizar su consumo energético. A continuación se ha formalizado el proceso de cálculo de FEE de un LAG utilizando para ello optimización basada en LP. Por último, se han ilustrado una serie de ejemplos representativos que permiten conocer cuál es la secuencia de pasos necesaria para poder obtener el conjunto de niveles de energía de la FEE de un LAG a partir de las funciones de energía de los enlaces individuales que lo constituyen.

En este punto, se está en disposición de evaluar la técnica de optimización basada en LP propuesta para minimizar el consumo de energía de un LAG. En el siguiente capítulo se analizan y discuten los resultados experimentales obtenidos tras su ejecución.

7. FUNCIÓN DE ENERGÍA EQUIVALENTE DE UN GRUPO DE AGREGACIÓN DE ENLACES

Capítulo 8

Resultados Experimentales

> "El científico no busca un resultado inmediato. No espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para los que vendrán, señalar el camino."
>
> Nikola Tesla

Con el objetivo de cuantificar las oportunidades de ahorro de energía derivadas de la propuesta de diseño de LAG energéticamente eficientes definida en el capítulo anterior, se procede a evaluar la técnica de optimización basada en LP que permite calcular la FEE de un determinado LAG. Para realizar esta evaluación, se ha seguido una metodología de obtención de resultados que engloba una serie de experimentos llevados a cabo sobre un enlace real para el que se explota la variación de la carga de tráfico a lo largo del día.

Inicialmente se presentan las consideraciones relacionadas con dicha carga de tráfico, así como con el enlace sobre el que se han realizado los experimentos. A continuación se describe la metodología utilizada en la obtención de resultados para posteriormente realizar un análisis y una discusión de los mismos con el objetivo de poder extraer una serie de conclusiones al respecto. Por último, se realiza una comparación entre la propuesta presentada en la Parte II de esta tesis y otros trabajos relacionados en los que se persigue conseguir una mejora de la eficiencia energética en entornos de red cableados en base a la actuación sobre los LAG que los constituyen.

8.1. Carga de Tráfico

Con el objetivo de evaluar la propuesta presentada en el capítulo anterior y proceder al cálculo de los resultados experimentales, se han analizado una serie de trazas públicamente disponibles que corresponden a mediciones de la carga de tráfico de distintos tipos de enlaces cuyas características se describen en la Tabla 8.1. En ella, cada fila corresponde a un determinado enlace y las columas hacen referencia a un conjunto de características concretas, como el tipo de enlace, los elementos que conecta, la fecha de inicio y fin de captura de tráfico, si finalmente se ha considerado o se ha descartado para la realización de los experimentos y el motivo por el cuál se tomó la decisión anterior.

De todos los enlaces evaluados, se ha decidido utilizar el conjunto de datos correspondientes a ESpanix para conseguir una aproximación a un modelo realista de tráfico de red en el que se pueda aprovechar la variación de la carga de tráfico a lo largo del día. De esta forma, se puede aplicar la propuesta de cálculo de FEE y evaluar la posibilidad de conseguir un ahorro de energía significativo.

Este nodo neutro permite a sus miembros desarrollar sus negocios en el ámbito del intercambio de tráfico, donde si bien son los principales operadores comerciales los que intercambian tráfico, existen otros miembros no comerciales como por ejemplo la red académica y de investigación española (RedIRIS) [115].

Una vez identificado el enlace sobre el que se van a realizar los experimentos, se procede a analizar su tráfico. Al disponer de 6 meses (180 días) de información reflejada en un conjunto de datos tomados cada 5 minutos que corresponden a la carga de tráfico puntual de ESpanix en cada instante de tiempo, se realiza un análisis para determinar si la carga de tráfico de un día laborable es similar o es distinta a la carga de tráfico de un día festivo.

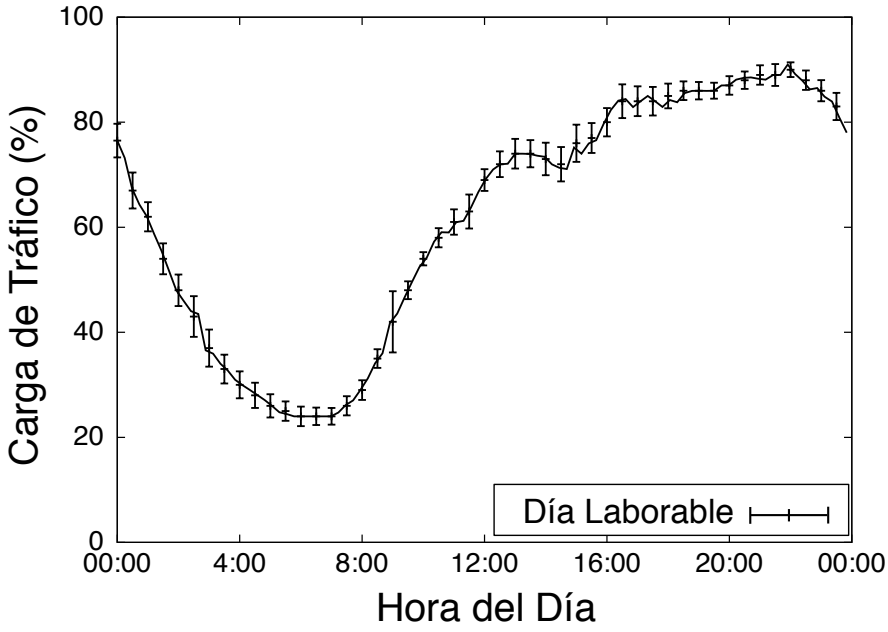
Para ello, inicialmente se realiza una división del conjunto de datos disponible en dos grupos: laborable y festivo. A continuación, para cada día se calcula la carga de tráfico instantánea en cada uno de los intervalos de tiempo (de 5 minutos) que constituyen el ciclo diario. La Figura 8.1 describe la variación de la carga de tráfico a lo largo del día en ESpanix para un día laborable (Figura 8.1 (a)) y para un día festivo (Figura 8.1 (b))[1]. En ambas figuras, se puede observar que existe una considerable variación que permite diferenciar la componente diurna de la nocturna, patrón que se repite día tras día.

Como principal diferencia al comparar ambas gráficas, se observa que la variabilidad de los datos correspondientes a los días festivos es mayor que la referente a los días laborables. Además, a simple vista parece intuirse que la carga de tráfico en días festivos es ligeramente superior a la carga de tráfico en días laborables durante ciertas horas del día.

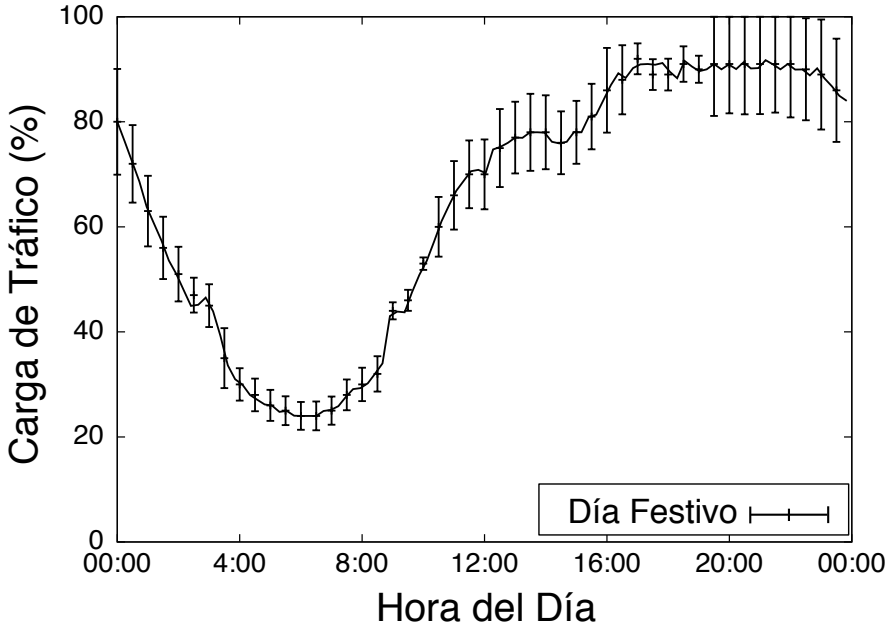
[1] Aunque las muestras disponibles y analizadas corresponden a intervalos de tiempo de 5 minutos (288 muestras para un día), los intervalos de confianza incluidos en todas las figuras de este capítulo se dibujan cada 30 minutos para mejorar su visualización y ayudar a la comprensión por parte del lector.

Tabla 8.1: Trazas de tráfico correspondientes a los enlaces analizados.

Enlace	Tipo	Elementos que conecta	Captura	¿Considerado?	Motivo
[116]	Enlace Ethernet a 100 Mbps	Pequeña organización educativa (35 empleados y 100 estudiantes) con Internet	Mayo 2007 - Junio 2007	✗	Ínfimamente cargado. Carga media día laborable y festivo en torno al 0,01 %.
[117]	Enlace Ethernet a 1 Gbps	Instituto de investigación (200 investigadores) con la red académica y de investigación holandesa	Mayo 2003 - Agosto 2003	✗	Mínimamente cargado. Carga media día laborable y festivo en torno al 1 %.
[118]	Enlace Ethernet a 1 Gbps	Universidad de Waikato (Nueva Zelanda) con Internet	Abril 2011 - Nov. 2011	✗	Mínimamente cargado. Carga media día laborable y festivo en torno al 1 %.
[119]	Enlace Ethernet a 1 Gbps	Institución educativa (más de 1000 estudiantes) con la red académica y de investigación holandesa	Sept. 2003 - Dic. 2003	✗	No se dispone del ciclo diario completo. Sólo trazas de 15 min. (carga media al 10-15 %).
[120]	Enlace Ethernet a 300 Mbps (LAG 3 enlaces a 100 Mbps)	Red residencial de una universidad (2000 estudiantes) con el núcleo de la red de dicha universidad	Julio 2002	✗	No se dispone del ciclo diario completo. Sólo trazas de 15 min. (carga media al 60 %).
[121]	Enlace Ethernet a 300 Mbps de un ISP de nivel 1 de EEUU	Chicago con Seattle (EEUU)	2008 - Actualidad	✗	No se dispone del ciclo diario completo. Sólo trazas de 1 hora (de 13:00 a 14:00).
[122]	Enlace Ethernet a 10 Gbps de un ISP de nivel 1 de EEUU	San José con Los Ángeles (EEUU)	2008 - Actualidad	✗	No se dispone del ciclo diario completo. Sólo trazas de 1 hora (de 13:00 a 14:00).
[123]	Punto neutro de intercambio de tráfico	Punto neutro de intercambio de tráfico de los operadores de redes IP en España (ESpanix)	Sept. 2013 - Feb. 2014	✓	Datos cada 5 minutos durante 6 meses. Permite actuar sobre la variación diaria de la carga de tráfico.



(a) Día laborable.



(b) Día festivo.

Figura 8.1: Porcentaje de carga de tráfico de ESpanix a lo largo del día.

La Figura 8.2 muestra la diferencia de carga de tráfico entre los días laborables (zona superior) y los días festivos (zona inferior) para cada uno de los intervalos que constituyen el ciclo diario. De la gráfica se extrae que el patrón de tráfico para sendos tipos de días es muy similar, ya que la diferencia de carga se encuentra cercana al 0 % durante todo el día. De hecho, se han acotado los valores máximo y mínimo del eje de ordenadas para realizar una ampliación y poder observar con un mayor detalle las diferencias existentes.

La tendencia de los datos indica que la carga en días festivos es ligeramente superior a la carga en días laborables a lo largo del ciclo diario exceptuando ciertas zonas del día donde son idénticas (por ejemplo en horas valle, desde las 4:00 hasta las 6:00 de la mañana) o ciertos intervalos de tiempo concretos donde la carga en días laborables supera mínimamente a la de los días festivos (por ejemplo de 8:00 a 9:00 ó de 9:30 a 10:00).

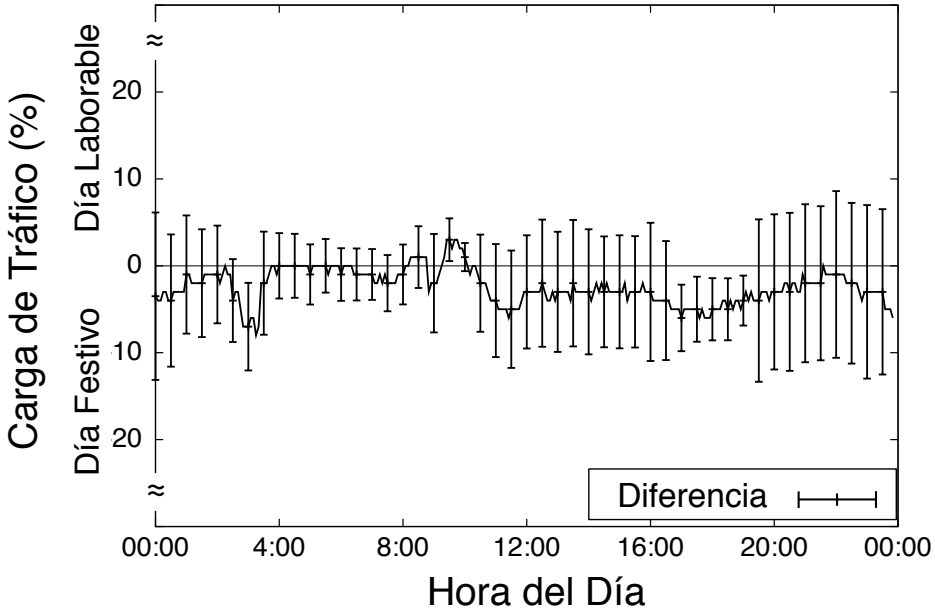


Figura 8.2: Diferencia en el porcentaje de carga de tráfico de ESpanix a lo largo del ciclo diario entre un día laborable y un día festivo.

8.2. Metodología

Con el objetivo de conocer el impacto en términos de ahorro energético que supone disponer de un LAG, $b_{i,j}$, con un número concreto de enlaces agregados, $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$, y poder realizar una comparación con el ahorro conseguido por un único enlace individual, $e_{i,j}$, de la misma capacidad que el propio LAG $b_{i,j}$, ($C_{e_{i,j}} = C_{b_{i,j}}$), se han

realizado un conjunto de pruebas en las que se ha ejecutado la formulación LP descrita en la Sección 7.2 suponiendo que el enlace de ESpanix puede tratarse de un LAG de 2, 3 ó 4 enlaces agregados ($p \in \{2, 3, 4\}$). Asumimos estos valores en el número de enlaces por LAG tras comprobar en [67] que las mayores oportunidades de ahorro de energía en este ámbito se obtienen al considerar LAG con 2, 3 ó 4 enlaces agregados (Figura 6.14 de la Sección 6.2).

Para caracterizar un enlace individual concreto, ya sea $e_{i,j}$ o $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$, se introduce el concepto de tupla de características asociado a un enlace individual, que se define como $T_{e_{i,j}} = (n_{e_{i,j}}, f_{e_{i,j}}, r_{e_{i,j}})$ con $n_{e_{i,j}}$: número de niveles de energía, $f_{e_{i,j}}$: función de energía, $r_{e_{i,j}}$: distribución de energía[2].

Para calcular el consumo de energía de un enlace individual $e_{i,j}$, y evaluar las posibilidades de ahorro de energía, se procede del mismo modo que en la Parte I, es decir, dada una carga de tráfico concreta, el consumo de energía de $e_{i,j}$ se calcula al aplicar la función de energía, $f_{e_{i,j}}$, utilizada (lineal o logarítmica, Figura 3.6 del Capítulo 3) sobre la carga del enlace teniendo en cuenta tanto la distribución de energía, $r_{e_{i,j}}$, (lineal o exponencial) como el número de niveles de energía, $n_{e_{i,j}}$.

Por su parte, para calcular el consumo de energía de un LAG $b_{i,j}$, se procede a aplicar la FEE, $f_{b_{i,j}}$, resultante de la ejecución de la formulación LP sobre la carga de tráfico en cuestión.

De acuerdo con las conclusiones de la Parte I, en las que se expone que es suficiente disponer de enlaces con un número de niveles de energía igual a 4 para lograr una reducción significativa del consumo de energía de la red, establecemos un número máximo de niveles de energía por enlace individual, $e_{i,j}$, igual a 4 para los resultados experimentales ($n_{e_{i,j}} \in \{2, 3, 4\}$). En la Tabla 8.2 se muestran los posibles valores que pueden tomar cada uno de los elementos de la tupla de características, $T_{e_{i,j}}$, de un determinado enlace individual, $e_{i,j}$.

Tabla 8.2: Posibles valores de los elementos de la tupla de características $T_{e_{i,j}}$ de un enlace individual $e_{i,j}$.

Elemento de la tupla $T_{e_{i,j}}$	**Descripción**	**Posibles valores**
$n_{e_{i,j}}$	Número de niveles de energía	2, 3, 4
$f_{e_{i,j}}$	Tipo de función de energía	lineal, logarítmica
$r_{e_{i,j}}$	Tipo de distribución de energía	lineal, exponencial

Por otro lado, asumimos también que los enlaces individuales pueden cambiar de nivel de energía de manera independiente para adaptar su velocidad de operación según las necesidades puntuales del tráfico. Además, para realizar una comparación justa, se establece que la capacidad del LAG permanece invariable independientemente del número de enlaces individuales que lo constituyan. Las asunciones anteriormente comentadas vienen descritas gráficamente en la Figura 8.3.

[2]Esta definición es idéntica para el caso de un enlace individual que pertenece a un determinado LAG, $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$.

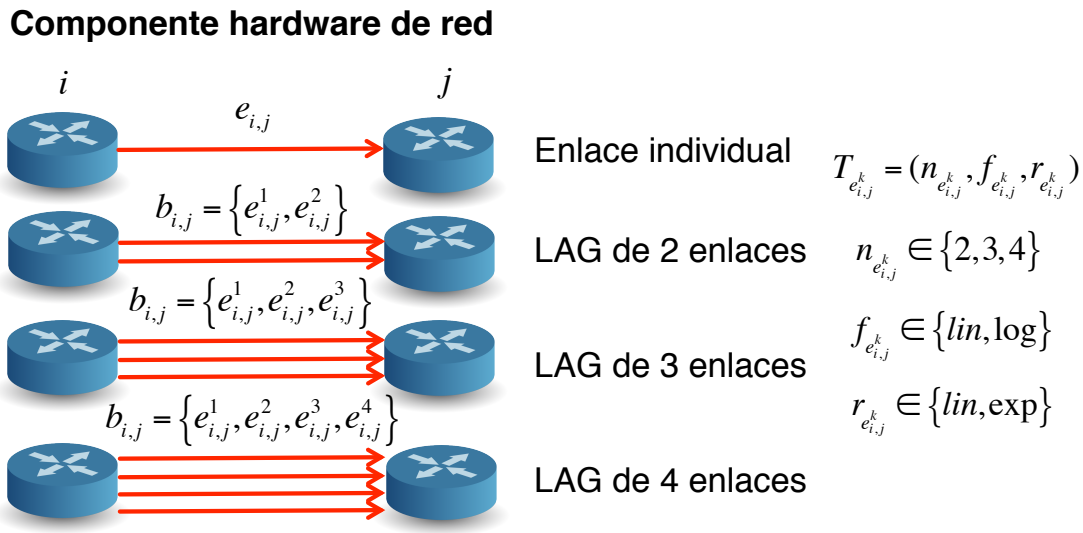


Figura 8.3: Consideraciones para la obtención de los resultados experimentales.

Para evaluar la técnica de optimización basada en LP que permite minimizar el consumo de energía de un determinado LAG, $b_{i,j}$, mediante el cálculo de su FEE, $f_{b_{i,j}}$, inicialmente se calculan todas las posibles combinaciones de tuplas de características para cada uno de los enlaces individuales, $e^k_{i,j} \in b_{i,j}$, que pueden formar parte de él.

El número total de combinaciones de tuplas de características para un enlace individual $e_{i,j}$ se calcula como sigue:

$$n_{T_{e_{i,j}}} =$$

$$\begin{aligned}
&3 \text{ (número de niveles de energía distintos: 2, 3, 4)} \times \\
&2 \text{ (tipos de funciones de energía distintas: lineal, logarítmica)} \times \\
&2 \text{ (tipos de distribuciones de energía distintas: lineal, exponencial)} = 12
\end{aligned}$$

Para el caso de un LAG con 2 enlaces individuales, el número total de combinaciones es igual a 12^2, mientras que en el caso de LAG con 3 y 4 enlaces individuales, este número asciende a 12^3 y 12^4 respectivamente. Por tanto, el número total de ejecuciones independientes de la formulación LP es igual a $12 + 12^2 + 12^3 + 12^4$.

De este cálculo previo de combinaciones se obtiene un conjunto de enlaces individuales con distintas características y un conjunto de LAG diferentes que vienen caracterizados por el número de enlaces individuales que los constituyen ($p \in \{2, 3, 4\}$) y por las tuplas de características, $T_{e^k_{i,j}}$, de cada uno de estos enlaces individuales.

Una vez definidos los enlaces individuales y los LAG que van a forman parte de la muestra, se aplica la técnica de optimización basada en LP para realizar el cálculo de sus FEE. A continuación, se calcula el consumo de energía instantáneo de cada uno de los LAG al aplicar su correspondiente FEE sobre la carga de tráfico de ESpanix para cada uno de los intervalos de tiempo que componen el ciclo diario (Figura 8.1).

Por último, se realiza una validación de los resultados obtenidos mediante la realización de un análisis multivariante (regresión de MCO) que permite conocer cuál

es el impacto que tiene cada una de las variables identificadas sobre la cantidad de energía que se puede ahorrar con esta aproximación.

8.3. Análisis y Discusión de Resultados

A continuación se procede a describir el análisis de los resultados obtenidos tras aplicar la metodología explicada anteriormente. Por un lado, se pretende conocer qué elemento hardware de red (enlace o LAG de 2, 3 ó 4 enlaces individuales) permite ahorrar una mayor cantidad de energía y en qué condiciones, mientras que por otro lado se pretende evaluar la diferencia que supondría poder elegir la mejor configuración en cada instante de tiempo o, sin embargo, establecer una configuración a priori sin la posiblidad de cambiarla a lo largo del día.

Para ello, inicialmente se analizan los resultados obtenidos al aplicar la carga de tráfico diaria de ESpanix suponiendo que el componente hardware de red es un enlace individual y, a continuación, se hace lo propio al suponer que en lugar de un enlace individual, se dispone de LAG con 2, 3 y 4 enlaces individuales.

8.3.1. Enlace individual

La Figura 8.4 muestra el porcentaje de ahorro de energía obtenido a lo largo del ciclo diario al considerar un enlace individual. En ella, la línea negra hace referencia a la capacidad residual del enlace a lo largo del día, que coincide con la inversa de la carga de tráfico en ESpanix (Figura 8.1) y sirve como referencia para comparar los resultados de ahorro de energía obtenidos según la carga existente en el enlace. Para observar mejor los efectos resultantes, se ha evitado incluir los intervalos de confianza debido a la gran cantidad de información que añadirían sobre la gráfica.

Por otro lado, la línea roja indica, para cada intervalo de tiempo, el porcentaje de ahorro de energía obtenido si se tuviera la posibilidad de elegir la mejor configuración en términos de ahorro de energía del elemento hardware de red (en este caso del enlace) en cada instante de tiempo. Es decir, estaríamos ante el caso ideal en el que un administrador de red pudiera adaptar la configuración del enlace dinámicamente para maximizar el ahorro de energía en función de la carga de tráfico instantánea. En la gráfica se puede observar que el mayor ahorro de energía proviene de las horas valle, aunque en horas pico se obtiene un ahorro sostenido de alrededor de un 30 % (se solapa con la línea azul).

El resto de líneas incluidas hacen referencia a distintos percentiles (0, 10, 50, 90 y 100) que corresponden al caso en que no es posible cambiar la configuración del enlace a lo largo del día. Es decir, una vez elegida la configuración correspondiente para el primer intervalo del ciclo diario (00:00 horas), ésta no se modifica en todo el día. En este caso, el porcentaje de ahorro de energía calculado hace referencia al ciclo diario completo, no a un intervalo de tiempo determinado (ahorro instantáneo) como es el caso al que hace referencia la línea roja.

Se puede observar que, si no es posible adaptar la configuración del enlace a la carga de tráfico, la mejor configuración para todo el día (percentil 100, línea verde) y

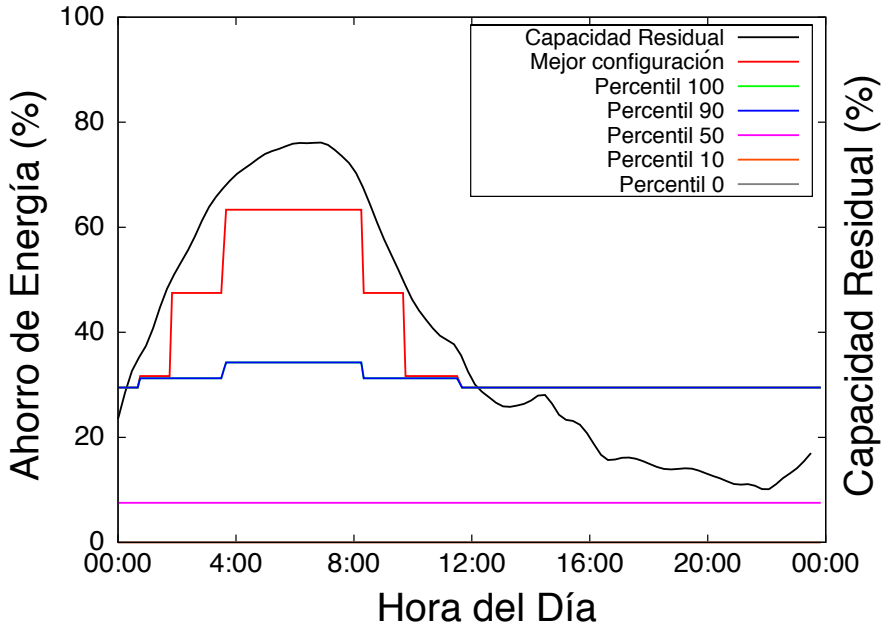


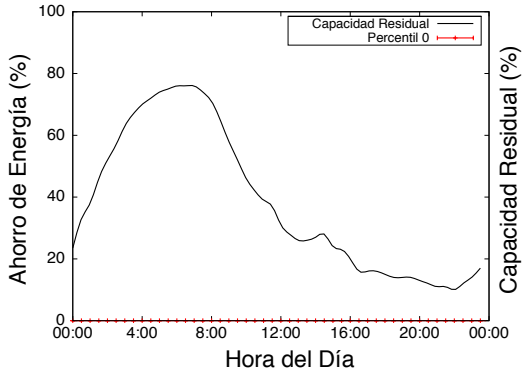
Figura 8.4: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un enlace individual, $e_{i,j}$.

el percentil 90 (línea azul) coinciden y permiten obtener un ahorro de energía estable a lo largo de todo el día en torno al 30 %. Por su parte, el caso medio, es decir, el percentil 50, permite ahorrar en todo momento alrededor de un 8 % de energía. Éste sería el caso normal de aplicación, es decir, si no se conoce la carga de tráfico a priori, la configuración establecida para el enlace durante todo el día va a coincidir con el percentil 50, de modo que es posible ahorrar una cantidad de energía significativa.

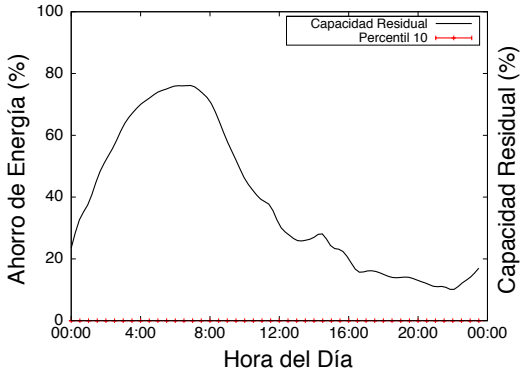
Por último, tanto el percentil 10 (línea naranja) y el percentil 0 (línea gris) coinciden con el eje de abscisas, lo que significa que las peores configuraciones para un enlace individual no permiten ahorrar energía en ningún momento del día. Un ejemplo de peor configuración es aquél en el que un enlace con dos niveles de energía (*Sleeping*) no permite ahorrar energía puesto que en ningún momento del día puede pasar a dormirse, ya que siempre existe tráfico en él (carga superior al 0 %).

Cabe destacar, tal y como se ha comentado en la sección anterior, que el número de configuraciones diferentes a evaluar para un enlace individual es igual a 12. Esto origina un conjunto de valores (en este caso 12 valores) que hacen referencia al porcentaje de ahorro de energía obtenido en cada uno de los intervalos de tiempo que constituyen el ciclo diario. Además, el hecho de disponer de 180 días de muestra hace que el conjunto total de datos resultado pueda ser variable.

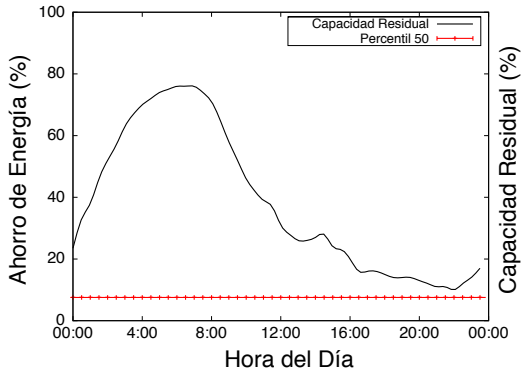
Sin embargo, aunque se ha decidido no incluir la información correspondiente a los intervalos de confianza en la Figura 8.4, sí se incluyen en cada una de las subfiguras de la Figura 8.5, donde se desglosa la información por separado. En esta figura se



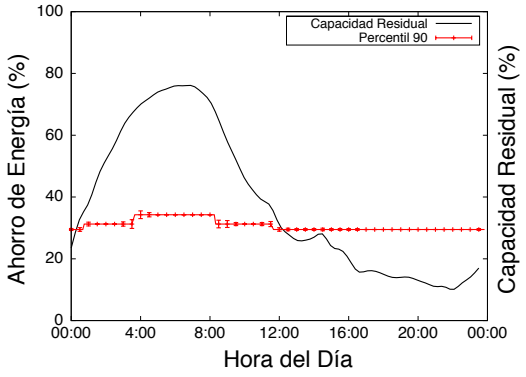
(a) Percentil 0.



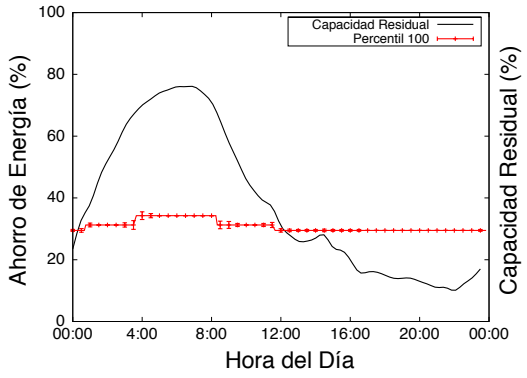
(b) Percentil 10.



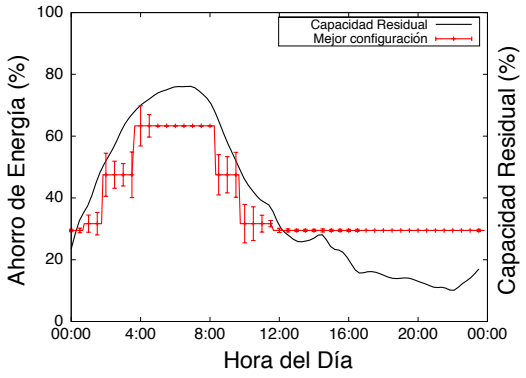
(c) Percentil 50.



(d) Percentil 90.



(e) Percentil 100.



(f) Mejor configuración en cada intervalo de tiempo.

Figura 8.5: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un enlace individual, según los distintos percentiles de la Figura 8.4.

puede observar que no existe variabilidad en los resultados obtenidos para el caso en el que no se modifica la configuración del enlace a lo largo del día (percentiles 0, 10, 50, 90 y 100). En el caso de considerar la posibilidad de cambiar de configuración en cada intervalo de tiempo, sí que existe una pequeña variabilidad en los resultados.

8.3.2. LAG de 2 enlaces

En el caso de disponer de un LAG de 2 enlaces, el número de configuraciones posibles asciende a 12^2. En la Figura 8.6 se puede observar que la cantidad de energía que se puede ahorrar con un LAG de 2 enlaces es superior a la conseguida con un único enlace.

Si bien los percentiles 0 y 10 de la Figuras 8.4 y 8.5 (a)-(b) indicaban que las peores configuraciones en términos de ahorro de energía para un único enlace no permitían conseguir ningún tipo de ahorro en ningún instante del día, de la Figura 8.6 se extrae que las peores configuraciones de un LAG de 2 enlaces permiten conseguir un ahorro de más del 45 % en horas valle (línea gris). Sin embargo, en horas pico, los resultados son similares a los obtenidos por el enlace individual.

El caso medio (percentil 50) asciende hasta un 70 % de ahorro de energía en los intervalos de tiempo en los que se dispone de una mayor capacidad residual, es decir aquellas horas del día donde existen mayores posiblidades de ahorro de energía (horas valle).

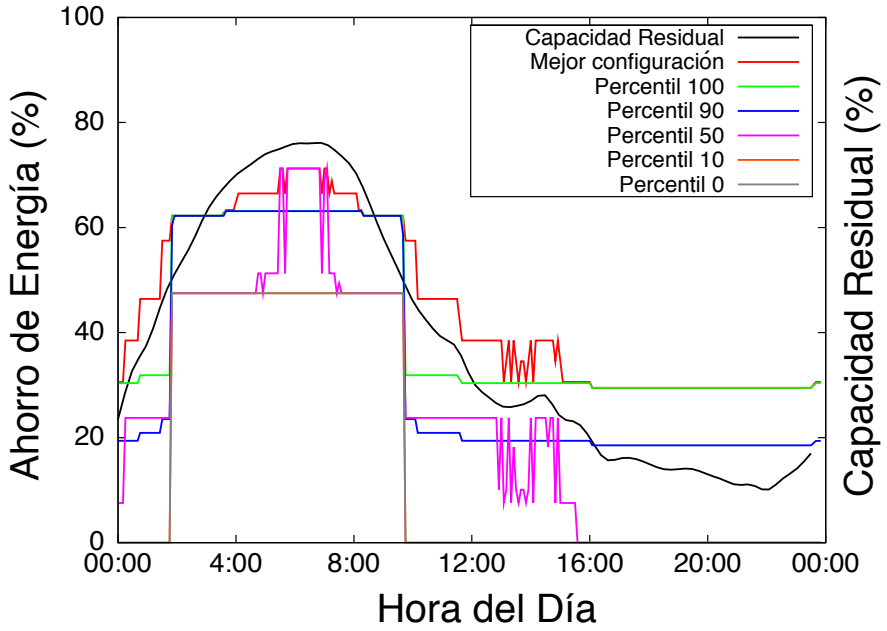
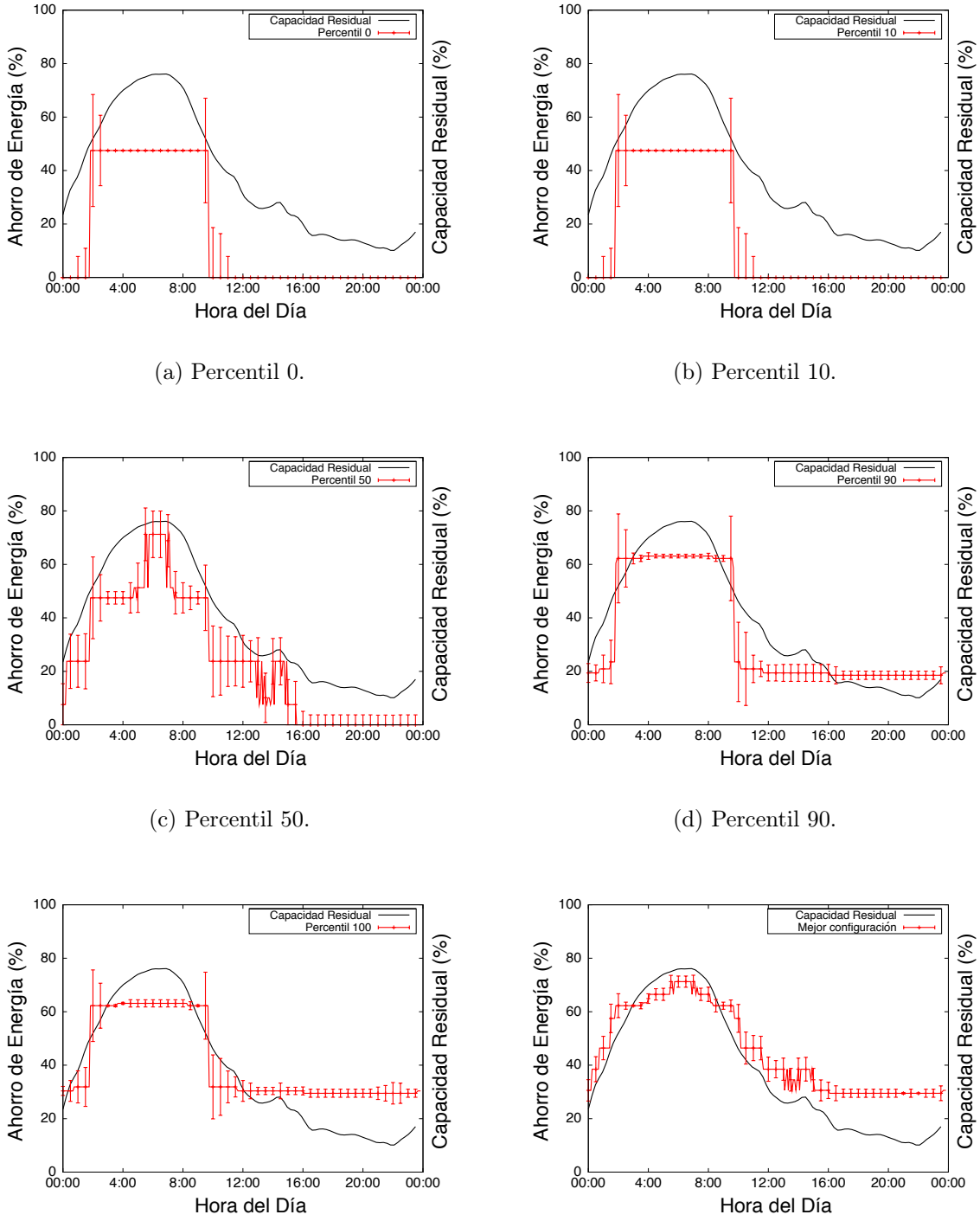


Figura 8.6: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 2 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}\}$.



(a) Percentil 0.

(b) Percentil 10.

(c) Percentil 50.

(d) Percentil 90.

(e) Percentil 100.

(f) Mejor configuración en cada intervalo de tiempo.

Figura 8.7: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 2 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.6.

De hecho, si se consideran únicamente las horas valle, una configuración media en términos de ahorro de energía a lo largo del día permite obtener valores similares de ahorro a los conseguidos por la situación ideal en la que es posible cambiar la configuración del LAG en cada instante de tiempo. Tal es así, que en este período de tiempo concreto supera incluso al ahorro de energía obtenido por las configuraciones correspondientes a percentiles superiores como el percentil 90 y el percentil 100. Para poder analizar en detalle los resultados de cada una de las situaciones evaluadas, la Figura 8.7 muestra, al igual que para el caso de un enlace individual, una gráfica con los intervalos de confianza para cada uno de los percentiles analizados y para el caso con las mejores configuraciones en términos de ahorro de energía por intervalo de tiempo.

8.3.3. LAG de 3 enlaces

Si se añade un enlace más al LAG, las oportunidades de ahorro de energía aumentan en gran medida en comparación con las correspondientes a un enlace individual y a un LAG de 2 enlaces, tal y como se puede observar en la Figura 8.8.

A medida que se incrementa el número de enlaces que constituyen un LAG, la forma que describen los valores de ahorro de energía obtenidos al aplicar la aproximación descrita en el capítulo anterior se adapta a la forma que sigue la variación diaria de la capacidad residual del enlace. Este efecto se puede observar tanto en la Figura 8.8 como en las distintas subfiguras de la Figura 8.10.

En particular, el ahorro de energía conseguido por la mejor configuración del LAG sin que ésta se modifique a lo largo del día (percentil 100, Figura 8.10 (e)) es casi idéntico al conseguido en el caso de que sea posible modificar la configuración en cada instante de tiempo en función de la carga de tráfico puntual (Figura 8.10 (f)). Por otro lado, se puede observar que al disponer de un mayor número de configuraciones a evaluar, la variabilidad en los resultados también se ve aumentada.

8.3.4. LAG de 4 enlaces

Por último se evalúa un LAG constituido por 4 enlaces individuales. Se trata del elemento hardware de red que permite conseguir un mayor ahorro de energía de entre todos los que se han evaluado (Figuras 8.9 y 8.11).

De este modo, se puede extraer la siguiente conclusión: el hecho de incrementar el número de enlaces por LAG se traduce en un incremento de la cantidad de energía que se puede ahorrar. Por otro lado, en el caso de configurar un LAG con la peor configuración en términos de ahorro energético (percentil 0, Figura 8.11 (a)), es posible conseguir un ahorro significativo de energía centrado en aquellas horas durante las cuales la capacidad residual es alta. Si se considera el caso medio (percentil 50), el ahorro resultante se ve incrementado en gran medida y sigue el mismo patrón que el descrito por la variación de la capacidad residual a lo largo del día (Figura 8.11 (c)). Por último, las mejores configuraciones tanto si se considera la posibilidad de poder realizar cambios de configuración en cada instante de tiempo como si no, presentan valores de ahorro de energía muy similares (Figuras 8.11 (e) y (f)).

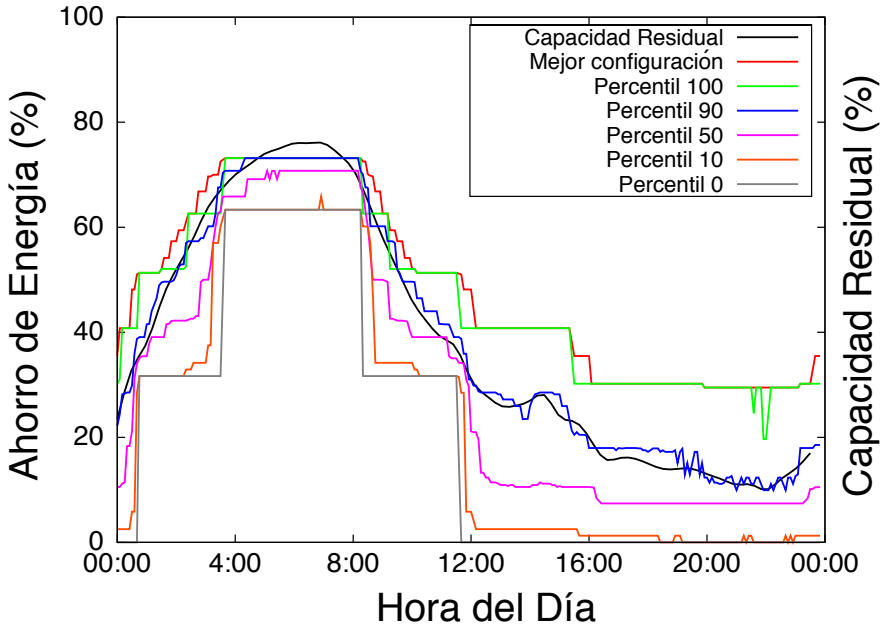


Figura 8.8: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 3 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, e^3_{i,j}\}$.

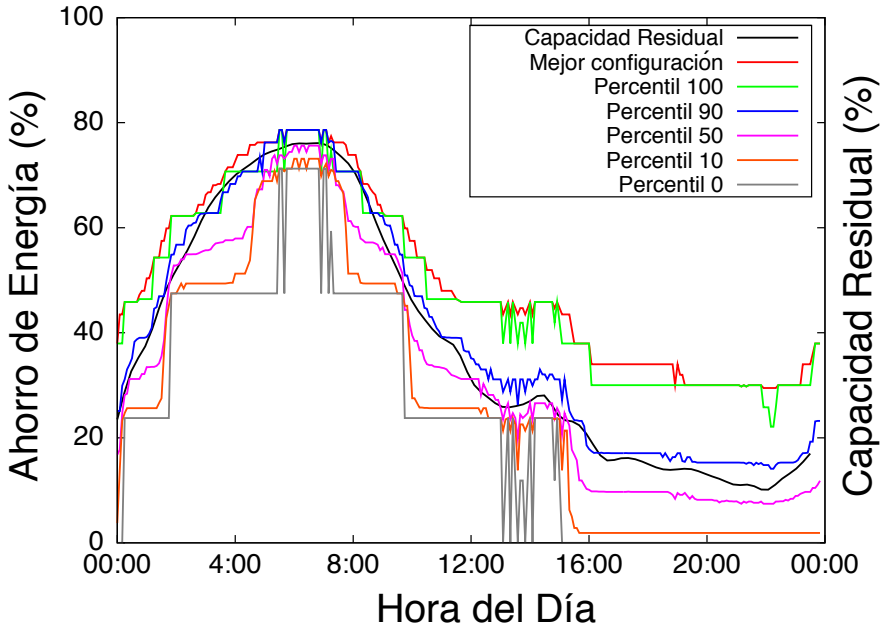
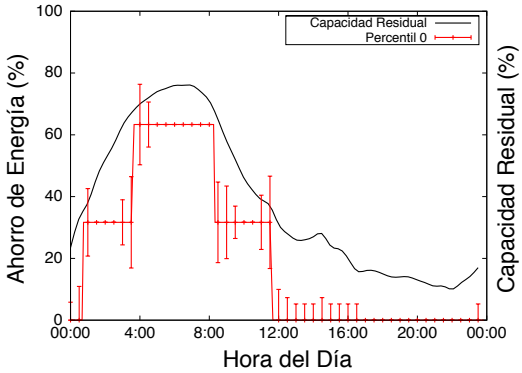
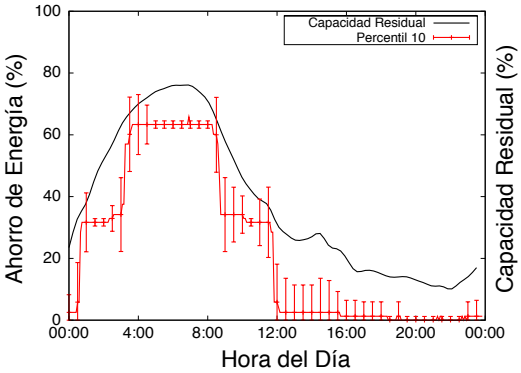


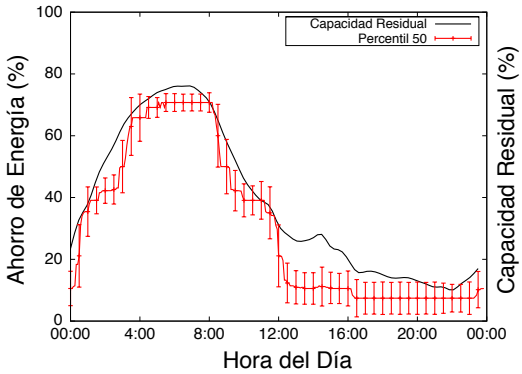
Figura 8.9: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 4 enlaces, $b_{i,j} = \{e^1_{i,j}, e^2_{i,j}, e^3_{i,j}, e^4_{i,j}\}$.



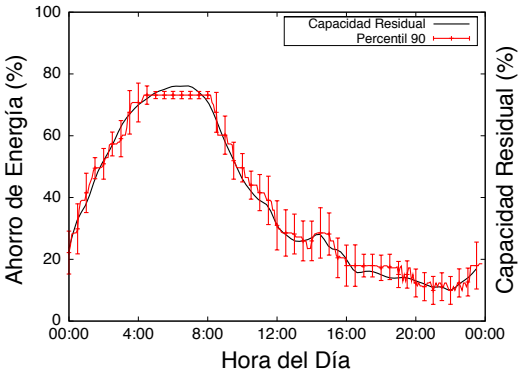
(a) Percentil 0.



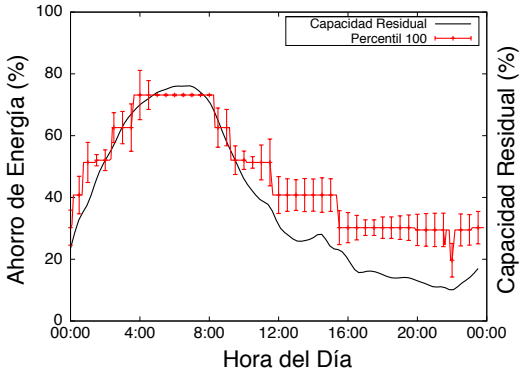
(b) Percentil 10.



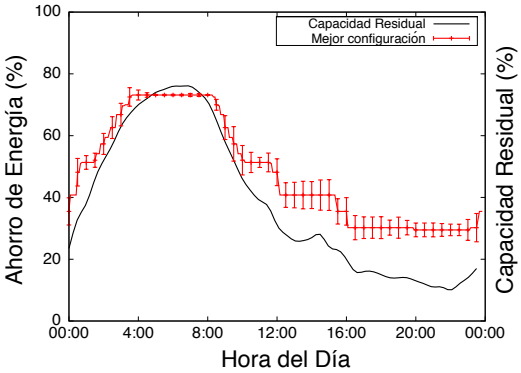
(c) Percentil 50.



(d) Percentil 90.

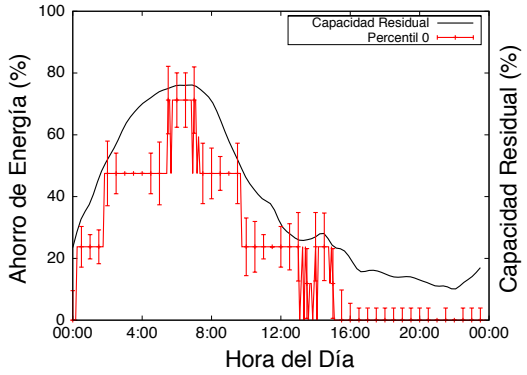


(e) Percentil 100.

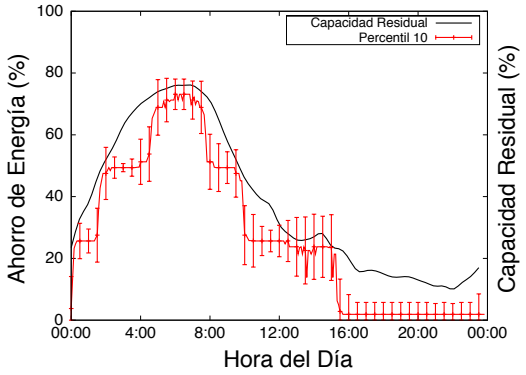


(f) Mejor configuración en cada intervalo de tiempo.

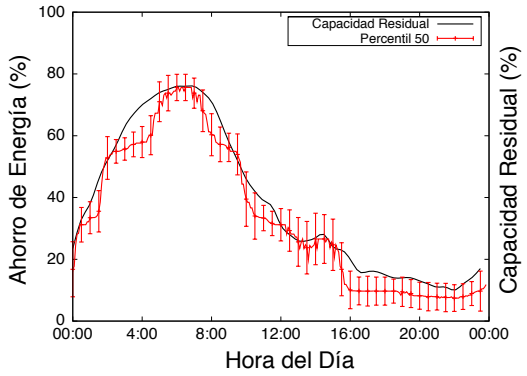
Figura 8.10: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 3 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.8.



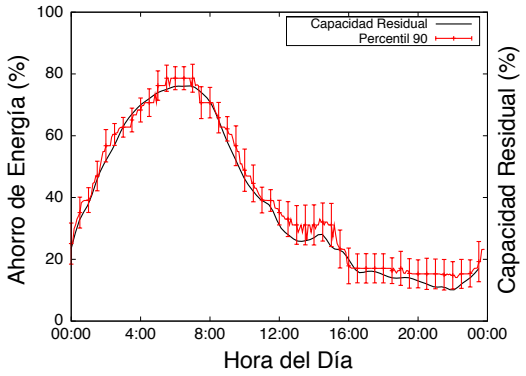
(a) Percentil 0.



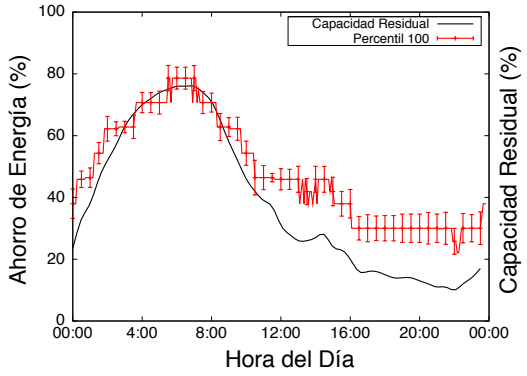
(b) Percentil 10.



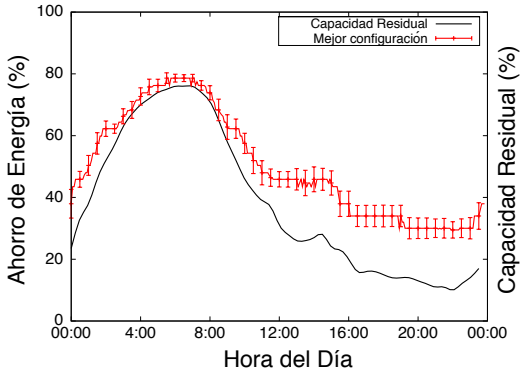
(c) Percentil 50.



(d) Percentil 90.



(e) Percentil 100.



(f) Mejor configuración en cada intervalo de tiempo.

Figura 8.11: Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario para un LAG de 4 enlaces, según los distintos percentiles de la Figura 8.9.

8.3.5. Validación de los Resultados

Para validar los resultados obtenidos tras la ejecución de los experimentos, se han identificado una serie de criterios objeto de estudio que se explican a continuación:

- Número de enlaces individuales que constituyen el LAG.

  En la Sección 8.2 se especificaron los valores correspondientes a este criterio. Concretamente, pueden tratarse de LAG con 2, 3 ó 4 enlaces individuales (de acuerdo con la Figura 6.14 de [67] incluida en la Sección 6.2).

- Homogeneidad/heterogeneidad en el número de niveles de energía.

  Indica si todos los enlaces que forman parte del LAG poseen el mismo número de niveles de energía o no.

- Homogeneidad/heterogeneidad en el tipo de función de energía.

  Indica si todos los enlaces que forman parte del LAG poseen el mismo tipo de función de energía o no.

- Homogeneidad/heterogeneidad en el tipo de distribución de energía.

  Indica si todos los enlaces que forman parte del LAG poseen el mismo tipo de distribución de energía o no.

- Tipo de día analizado.

  Puede ser laborable o festivo.

- Porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario.

  Indica el porcentaje de ahorro de energía obtenido por un enlace individual o por un LAG determinado al finalizar el día analizado.

Para conocer la influencia que ejercen los distintos criterios de estudio en relación con la cantidad de energía que se puede ahorrar con la propuesta de diseño de LAG energéticamente eficientes, se ha realizado un análisis multivariante (regresión de MCO) con los resultados obtenidos por el conjunto completo de ejecuciones llevadas a cabo. Además, este análisis ha permitido conocer la significación estadística de los propios resultados.

La Tabla 8.3 categoriza los criterios de estudio que son objeto del análisis, para los que se indica tanto el nombre como el tipo de la variable en cuestión.

Como se puede observar, todas las variables independientes del análisis multivariante son categóricas excepto la relacionada con el número de enlaces agregados por LAG (*EnlacesPorLAG*), que es continua. La variable dependiente objeto de estudio hace referencia al porcentaje de ahorro de energía a lo largo del ciclo diario y también es de tipo continuo.

La Tabla 8.4 muestra el resultado de la regresión de MCO realizada, donde se puede observar que todas las variables son significativas. Se extrae que el hecho de añadir un nuevo enlace al LAG (variable *EnlacesPorLAG*) presenta, de entre todos los

Tabla 8.3: Criterios y variables utilizadas en el análisis multivariante.

Criterio	**Nombre de Variable**	**Tipo**
Número de enlaces en el LAG	EnlacesPorLAG	Independiente / Continua
Homogeneidad / heterogeneidad en el número de niveles de energía	Homogeneidad / HeterogeneidadNivelesEnergia	Independiente / Categórica
Homogeneidad / heterogeneidad en el tipo de función de energía	Homogeneidad / HeterogeneidadFuncionesEnergia	Independiente / Categórica
Homogeneidad / heterogeneidad en el tipo de distribución de energía	Homogeneidad / HeterogeneidadDistribucionesEnergia	Independiente / Categórica
Tipo de día analizado	DiaLaborable / DiaFestivo	Independiente / Categórica
Porcentaje de ahorro de energía	AhorroEnergia	Dependiente / Continua

criterios estudiados en el análisis, la mayor influencia sobre la posibilidad de ahorrar energía a lo largo del ciclo diario, al tener un valor de Beta Estandarizado igual a 0,278.

De hecho, la influencia de añadir un nuevo enlace al LAG es aproximadamente 5 veces mayor que disponer de un LAG en el que alguno de los enlaces que lo consituyen posea un tipo de función de energía distinto (variable *HeterogeneidadFuncionesEnergia* con valor 0,064), un tipo de distribución de energía distinto (variable *HeterogeneidadDistribucionesEnergia* con valor 0,052) o diferente número de niveles de energía (variable *HeterogeneidadNivelesEnergia* con valor 0,050).

Finalmente, por cada enlace que se añade al LAG se consigue un incremento de más del 6 % en el ahorro de energía a lo largo del ciclo diario (coeficientes no estandarizados, columna B). Este valor supone una relación directamente proporcional entre el número de enlaces individuales que forman parte de un LAG y la cantidad de energía que es posible ahorrar, es decir, a mayor número de enlaces por LAG, mayor ahorro de energía.

Por ello, desde el punto de vista de la mejora de la eficiencia energética, interesa más incorporar nuevos enlaces a un LAG, aunque solamente sean capaces de dormirse al tener implementados 2 niveles de energía (técnica *Sleeping*), a disponer de menos enlaces agregados en el LAG que puedan operar según un número distinto de niveles de energía (técnica *Rate Adaptation*).

Por último, del análisis también se extrae que las oportunidades de ahorro energético en días laborables son mayores que en días festivos, al presentar la variable *DiaFestivo* un valor de -1,862 en el coeficiente no estandarizado sobre el ahorro de energía con respecto a un día laborable. Esta conclusión está relacionada con el hecho de que la carga de tráfico en días festivos es ligeramente superior a la carga de tráfico en días laborables (Figura 8.2).

Tabla 8.4: Resultados de la regresión[A]

Modelo	Tipo de Variable	Coefs. no Estandarizados B	Coefs. no Estandarizados Error Est.	Coefs. Estand. Beta	t	Sig.
1 (Constante)		9,997	0,207		48,209	0,000
EnlacesPorLAG	Continua	6,172	0,076	0,278	81,653	0,000
HeterogeneidadNivelesEnergia	Categórica	0,996	0,066	0,050	15,158	0,000
HeterogeneidadFuncionesEnergia	Categórica	0,983	0,049	0,064	19,853	0,000
HeterogeneidadDistribucionesEnergia	Categórica	0,788	0,049	0,052	15,916	0,000
DiaFestivo	Categórica	-1,862	0,047	-0,126	-39,581	0,000

[A] Variable Dependiente: AhorroEnergia

Variables de Referencia: HomogeneidadNivelesEnergia, HomogeneidadFuncionesEnergia, HomogeneidadDistribucionesEnergia, DiaLaborable

8.4. Comparación con Otras Propuestas de Eficiencia Energética en Grupos de Agregación de Enlaces

Con el objetivo de realizar una comparación entre la propuesta descrita en la Parte II de esta tesis y los trabajos identificados en la Sección 6.2 que tratan de mejorar la eficiencia energética de las redes cableadas mediante la actuación sobre componentes hardware como LAG, se ha creado la Tabla 8.5 en la que se muestran las principales características de los trabajos identificados y los resultados obtenidos en términos de ahorro de energía.

En ella, cada fila hace referencia a un trabajo concreto y las columnas contienen la información correspondiente a las características que se han identificado para realizar la comparación: trabajo en cuestión, método aplicado para dar solución al problema, número de enlaces individuales que constituyen los LAG, número de niveles de energía, funciones de energía y distribuciones de energía de los enlaces individuales, tipo de LAG o topologías consideradas, demanda de tráfico y resultados en porcentaje de ahorro de energía conseguido.

Al igual que en la Sección 5.4, el trabajo realizado en la Parte II se incluye al final de la tabla, donde destaca la posibilidad de utilizar más de dos niveles de energía en los enlaces que constituyen los LAG y que el consumo de éstos puedan seguir distinto tipo de función y de distribución de energía.

Tabla 8.5: Comparación entre nuestra propuesta y otras soluciones existentes en la literatura relacionada con la eficiencia energética en LAG.

Referencia	**Solución**	**Número de Enlaces por LAG (p)**	**Niveles de Energía por Enlace ($n_{e^k_{i,j}}$)**	**Funciones de Energía de los Enlaces ($f_{e^k_{i,j}}$)**	**Distribuciones de Energía de los Enlaces ($r_{e^k_{i,j}}$)**	**LAG o Topologías consideradas (N=nodos, L=enlaces)**	**Demanda de tráfico**	**Ahorro de Energía (%)**
Y. Fukuda et al. [108]	Medición del tráfico entrante en los *switches* y estimación del número de enlaces activos en el LAG para satisfacer la demanda de tráfico.	8	2: *Sleeping*	N/D	N/D	LAG con 8 enlaces individuales a 1 Gbps entre dos *switches*.	Modelo de tráfico en el que la velocidad media del tráfico entrante a los *switches* oscila entre 0 y 8 Gbps de manera aleatoria.	Ahorro de energía de un 40% (percentil 50 de la distribución de valores de *throughput* medidos) y de un 30% (percentil 90) para intervalos de control en torno a 800 ms. El tiempo establecido para el intervalo de control permite conseguir un compromiso entre el ahorro de energía y la QoS.
H. Imaizumi et al. [109]	Medición del tráfico saliente en los *switches* y estimación del número de enlaces activos en el LAG para satisfacer la demanda de tráfico.	8	2: *Sleeping*	N/D	N/D	LAG con 8 enlaces individuales a 1 Gbps entre un PC y un *switch*.	Trazas de tráfico reales para dos ISP obtenidas en intervalos de dos horas para cada uno de ellos (de 00:00 a 02:00 y de 15:00 a 17:00).	Ahorro de energía de un 25% con una frecuencia de muestreo frecuente sin pérdida de paquetes y con un razonable *delay* en términos de *buffering*. Incremento del número de eventos necesarios para la activación y la desactivación de los enlaces.
W. Fisher et al. [67]	ILP y heurísticas voraces	1 a 12	2: *Sleeping*	N/D	N/D	Abilene (39 N, 28 L) y dos topologías sintéticas: jerárquica de 2 niveles (50 N, 148 L) y grafo de Waxman (50 N, 169 L).	Demanda de tráfico determinada por mediciones para Abilene y generada utilizando un modelo de entropía clásico [110] para las topologías sintéticas.	El ahorro de energía varía del 50% a más del 70% en las tres topologías consideradas, siguiendo un patrón logarítmico con respecto al tamaño del LAG, p.
L. Liu y B. Ramamurthy [111]	Heurísticas	10	2: *Sleeping*	N/D	N/D	Topología sintética idéntica a Internet2 (9 N, 26 L) en la que los LAG están constituidos por 10 enlaces individuales a 1 Gbps.	Trazas de tráfico real tomadas cada 5 minutos durante 30 días consecutivos.	Ahorro de energía de un 86% para un umbral de utilización del enlace del 90% y superación de la capacidad efectiva en alguno de los enlaces en el 2,7% de los intervalos de tiempo evaluados.
L. Liu y B. Ramamurthy [112]	Heurísticas	10	2: *Sleeping*	N/D	N/D	Topología sintética idéntica a Internet2 (9 N, 26 L) en la que los LAG están constituidos por 10 enlaces individuales a 1 Gbps.	Trazas de tráfico real tomadas cada 5 minutos durante 30 días consecutivos.	Ahorro de energía similar para umbrales de utilización del 60%, 80% y 90%, con un 2,3% de diferencia entre el valor más alto y el más bajo. El número de situaciones de congestión se reduce en torno a un 75% en comparación con [111]. El ahorro de energía también se ve ligeramente reducido (un 3,2%).
R. Garroppo et al. [113]	Heurísticas	Diferente en función de la topología.	2: *Sleeping*	Consumo constante si está activo y 0 W si está apagado.	N/D	Nobel-eu (28 N, 41 L), Exodus (23 N, 37 L), Ebone (27 N, 38 L), Abovenet (27 N, 42 L), Sprintlink (56 N, 83 L) y Telekom Austria (66 N, 108 L). Los enlaces que constituyen los LAG son todos de 38,486 Gbps.	Matrices de tráfico real para Nobel-eu y matrices sintéticas que siguen una distribución uniforme para el resto de topologías.	Ahorro de energía en función del tamaño de la red: para topologías grandes, la heurística de este trabajo mejora los resultados de [67], mientras que para topologías pequeñas, [67] se acerca al óptimo. No se proporcionan valores de porcentaje de ahorro generales debido a la cantidad de topologías y metodologías comparadas. Además, se garantiza la QoS con un valor de 0,52 ns para el *delay* medio.
J. Galán y A. Gazo	LP	2, 3 y 4	2, 3 y 4	Lineal [74] y logarítmica [12].	Lineal y exponencial	ESpanix.	Trazas de tráfico reales tomadas cada 5 minutos durante 6 meses.	Análisis multivariante en la Tabla 8.4.

8.5. Conclusiones

En esta sección se resumen las principales conclusiones obtenidas tras la ejecución de los experimentos llevados a cabo para evaluar la propuesta de diseño de LAG energéticamente eficientes definida en el capítulo anterior.

Para ello, se ha seguido una metodología de obtención de resultados en la que se aplica la técnica de optimización basada en LP que permite calcular la FEE de un determinado LAG de modo que se minimice su consumo de energía para una carga de tráfico dada. De entre todos los enlaces analizados, el enlace sobre el que se han realizado los experimentos es el punto neutro de intercambio de tráfico de los operadores de redes IP en España (ESpanix), para el que se explota la variación de la carga de tráfico a lo largo del día.

El análisis de los resultados muestra que el hecho de añadir enlaces a un LAG presenta la mayor influencia en términos de ahorro de energía de entre todos los criterios estudiados. Esta influencia es alrededor de 5 veces mayor que utilizar enlaces individuales con distinto tipo de funciones de energía, distribuciones de energía o número de niveles de energía.

De este modo, añadir enlaces con capacidad de *Sleeping* a un LAG es una técnica más eficiente energéticamente hablando que utilizar menos enlaces aunque éstos presenten características avanzadas de eficiencia energética, como puede ser la capacidad de adaptación de velocidad en función de la carga de tráfico (técnica *Rate Adaptation*).

Por otro lado, se llega a la conclusión de que si no se conoce la carga de tráfico a priori, el hecho de seleccionar una configuración determinada que pueda pertenecer al conjunto de configuraciones medias en términos de eficiencia energética (percentil 50) permite reducir significativamente el consumo de energía fuera del conjunto de intervalos correspondientes a las horas pico.

Asimismo, se ha comprobado que la mayor cantidad de energía ahorrada proviene de días laborables en lugar de días festivos, al presentar estos últimos un ligero aumento de la carga de tráfico en comparación con los días laborables. En este punto hay que recordar que el enlace sobre el que se han realizado los experimentos es un nodo neutro en el que la mayoría de los miembros que inyectan tráfico son operadores comerciales.

Por último se realiza una comparación entre esta propuesta y un conjunto de trabajos existentes en la literatura que persiguen también conseguir una mejora de la eficiencia energética en entornos de red cableados en base a la actuación sobre LAG.

Parte III

Conclusiones y Trabajos Futuros

Capítulo 9

Conclusiones Finales

> "Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: es también un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas."
>
> Marie Curie

La mejora de la eficiencia energética en las TIC en general y en las redes de comunicaciones en particular se han convertido durante los últimos años en un campo de investigación activo debido a las implicaciones que conlleva su aplicación sobre el medio ambiente y el coste económico derivado. Tal y como se ha podido comprobar en los Capítulos 2 y 6 de esta tesis, existe una gran variedad de trabajos cuya principal finalidad consiste en minimizar el consumo de energía de una red (inalámbrica, cableada, óptica) que presenta unas determinadas características sin que su rendimiento se vea afectado.

De entre los distintos tipos de redes y las distintas áreas o categorías en las que se engloban las estrategias de ahorro de energía en las redes de comunicaciones, esta tesis se centra en realizar un diseño de sistemas energéticamente eficientes mediante la optimización de sus componentes hardware. Por un lado, se pretenden proporcionar una serie de recomendaciones a los fabricantes de tarjetas de línea para que puedan construir tarjetas que sean a la vez energéticamente eficientes y dispongan de un compromiso con respecto a la complejidad de su fabricación. Por otro lado, se pretende facilitar una serie de pautas a los administradores de red relacionadas con la formación y configuración de LAG cuando su diseño de red así lo requiera para que estos sean energéticamente eficientes y el consumo de la red se vea reducido.

Para alcanzar estos dos objetivos principales, inicialmente se han definido una serie de conceptos (nivel de energía, función de energía y distribución de energía) que permiten caracterizar de forma genérica el consumo de energía de un determinado enlace. Con estas definiciones, se ha realizado una propuesta que, mediante la utilización de metaheurísticas basadas en la computación bio-inspirada, permite conseguir una reducción significativa del consumo de energía de la red en base un diseño energéticamente eficiente de las tarjetas de línea. Además, se ha establecido un *fra-*

mework de comparación de funciones de energía con el objetivo de poder evaluar el ahorro conseguido en la red según el tipo de función de energía de los enlaces que la constituyen.

La validación de la propuesta se ha llevado a cabo mediante su aplicación sobre un conjunto de topologías de red reales como NSFNet, Géant y AT&T, en las que se utilizan diversos tipos de funciones y distribuciones de energía y los enlaces pueden configurarse según distintos niveles de energía. Por otro lado, se ha explotado la variación de la carga de tráfico a lo largo del día para cada una de las topologías consideradas, ya que existen diferencias entre la componente diurna y la componente nocturna que permiten diferenciar las oportunidades de ahorro de energía según la hora del día.

Los resultados demuestran que se puede mejorar en gran medida la eficiencia energética de una red mediante la utilización de tarjetas de línea con un reducido número de niveles de energía. Concretamente, no es necesario que los fabricantes construyan tarjetas de línea que soporten un elevado número de niveles de energía diferentes, ya que un número igual a 4 es suficiente para lograr una reducción significativa del consumo de energía de la red.

Además, de las dos técnicas basadas en hardware estudiadas y consideradas, si no es posible utilizar la técnica *Rate Adaptation* de adaptación de velocidad en las tarjetas de línea, se podría usar la técnica denominada *Sleeping* (activo-dormido) dependiendo del perfil energético de la red. Los resultados indican también que a mayor grado de conectividad se consigue un mayor ahorro de energía respecto del consumo global de la red y, además, ni el tipo de distribución de energía ni el tipo de función de energía tienen un gran impacto sobre el ahorro energético.

Una vez evaluada la propuesta relacionada con el diseño de tarjetas de línea energéticamente eficientes que permiten conseguir un ahorro de energía sustancial en la red, se considera la posibilidad de generalizar el problema y actuar sobre enlaces agregados o LAG constituidos por un conjunto de enlaces individuales que, al igual que en el caso anterior, se encuentran caracterizados por un número limitado de niveles de energía, una función de energía y una distribución de energía concretas.

Para minimizar el cosumo de energía de un LAG, se define el concepto de FEE del propio LAG en base a los modelos de consumo de los enlaces individuales que lo constituyen y se procede a su cálculo mediante la utilización de programación lineal. En este caso, en lugar de realizar una validación a nivel de red (topología), se procede a validar la propuesta sobre un determinado enlace. Para ello, se dispone de la variación de la carga de tráfico diaria de ESpanix, punto neutro de intercambio de tráfico de los operadores de redes IP en España.

Asumiendo que este enlace puede comportarse como un enlace individual o como un LAG de 2, 3 ó 4 enlaces individuales donde para cada enlace individual se utilizan diversos tipos de funciones y distribuciones de energía y distinto número de niveles de energía (con 4 niveles de energía como límite superior tras los resultados previos), los resultados obtenidos muestran que el hecho de añadir enlaces al LAG presenta una influencia 5 veces mayor en términos de ahorro de energía que utilizar enlaces con distintos tipos de funciones de energía. En concreto, al añadir un enlace al LAG se consigue un incremento de más del 6 % en el ahorro de energía a lo largo del día.

Por ello, para un administrador de red que desee mejorar la eficiencia energética de su red es más interesante formar LAG con un número mayor de enlaces agregados aunque éstos únicamente implementen capacidades de *Sleeping* (2 niveles de energía) a disponer de menos enlaces agregados en el LAG que puedan operar según un número distinto de niveles de energía (técnica *Rate Adaptation*). Es decir, es preferible que el LAG disponga de más enlaces EEE a que disponga de menos enlaces con tecnología heterogénea.

En resumen, los resultados arrojan la conclusión de que para disponer de tarjetas de línea energéticamente eficientes basta con que puedan implementar 4 niveles de energía diferentes, ya que es un número suficiente para conseguir ahorros de energía significativos en la red. De hecho, un número de niveles de energía superior a este valor por tarjeta de línea apenas supone beneficios en términos de ahorro de energía. Por otro lado, si se desea minimizar el consumo de energía de una red constituida por diferentes LAG, prima el hecho de considerar un número mayor de enlaces en el LAG antes que considerar enlaces con distinta tecnología. Esta información puede resultar de gran valor a fabricantes de tarjetas de línea y a administradores de red que deseen incorporar características de eficiencia energética a sus respectivos ámbitos de aplicación.

Capítulo 10

Trabajos Futuros

> "Sólo podemos ver poco del futuro,
> pero lo suficiente para darnos cuenta
> de que hay mucho que hacer."
>
> Alan Turing

Una vez expuestas las conclusiones finales de esta tesis en el capítulo anterior, a continuación se identifican un conjunto de líneas de trabajo futuro con las que poder continuar su desarrollo.

10.1. Tarjetas de Línea Energéticamente Eficientes y Calidad del Servicio

Una línea de investigación futura está relacionada con la posibilidad de considerar la evaluación del impacto que esta metodología presenta sobre el rendimiento de la red, medida en términos de parámetros de QoS.

Aunque durante el desarrollo de esta tesis se ha asegurado que cada demanda de tráfico entre cada par de nodos de la red ha de encaminarse sin superar la capacidad efectiva de cada uno de los enlaces que la componen, sería adecuado tratar de determinar hasta qué punto el incremento de la carga de los enlaces afecta al servicio ofrecido por la red. Adicionalmente, existen trabajos que tratan de evaluar cómo afectan los cambios en el modo de operación de un enlace a nivel de comportamiento de la red en pequeñas escalas de tiempo. La forma en la que estos cambios afecten al servicio provisto por la red y su cuantificación con respecto a parámetros de QoS es sin duda de gran interés como continuación de esta tesis.

Por otro lado, se podría evaluar también el número de caminos necesarios para encaminar cada demanda de tráfico individual. La relevancia de este análisis radica en el hecho de que las soluciones que pretenden minimizar el consumo de energía pueden originar un elevado número de caminos por cada demanda de tráfico, mientras que la gestión de estos caminos puede traducirse en un coste elevado en términos de señalización.

10.2. Normalización de la Carga de Tráfico

Para evaluar la cantidad de energía que la propuesta anterior permite ahorrar sobre una red de comunicaciones concreta y compararla con el ahorro de energía obtenido sobre otra red diferente, es necesario poder aplicar la propuesta sobre configuraciones de red diferentes pero cuyas condiciones sean comparables.

Por ello, se pretende establecer una metodología de normalización que haga referencia a la situación operativa de una red en relación a su carga de tráfico. Así, mediante la utilización de esta metodología y la aplicación de mecanismos de ahorro de energía como la propuesta relacionada con el diseño de tarjetas de línea energéticamente eficientes, se pretende definir una arquitectura que minimice el consumo energético de una infraestructura de red en función de sus características topológicas concretas de forma previa a su implantación.

Esta normalización de red permitirá realizar comparaciones entre los resultados obtenidos al aplicar dicha metodología sobre redes de diferentes características. De este modo, se pretenden obtener resultados realistas en relación al consumo energético de dichas topologías de red en fase de diseño. Así, si disponemos de dos infraestructuras de red con características topológicas diferentes, se pretende poder determinar si la situación en la que se encuentran ambas redes es equivalente o no, de forma que se puedan aplicar distintos mecanismos de eficiencia energética sobre ellas y las conclusiones obtenidas en términos de ahorro de energía sean comparables.

10.3. Grupos de Agregación de Enlaces Energéticamente Eficientes, Protocolos de Agregación de Enlaces y *Software Defined Networking*

La propuesta de diseño de LAG energéticamente eficientes descrita en esta tesis se ha realizado a nivel de enlace. En concreto, se ha evaluado la cantidad de energía que se puede ahorrar en un LAG al variar una serie de parámetros como el número de enlaces por LAG, el número de niveles de energía o el tipo de función o de distribución de energía por enlace.

En esta línea de investigación se pretende aplicar la definición y cálculo de FEE de un LAG sobre entornos de red reales para poder minimizar el consumo energético de la red como un todo, actuando de forma coordinada sobre todos los enlaces. Para ello, es necesario tener en cuenta protocolos de agregación de enlaces como LACP o PAgP para la creación y gestión de los LAG de la red. Con todo ello y mediante simulaciones, se puede evaluar el microcomportamiento de la red mediante modificaciones en parámetros de QoS como *delay*, *jitter* o *throughput*.

Otra opción que permite implementar y evaluar esta aproximación es la utilización de *Software-Defined Networking* (SDN). SDN es una aproximación que permite a los administradores de red realizar tareas de gestión abstrayéndose de la funcionalidad de los niveles inferiores. La clave está en desacoplar el sistema que toma decisiones acerca de hacia dónde enviar el tráfico (plano de control) de los sistemas subyacentes

que se encargan de enviar el tráfico al destino seleccionado (plano de datos). Para ello son necesarios mecanismos, como OpenFlow, que permitan la comunicación entre ambos planos.

Por tanto, para una red constituida por una serie de LAG que utilizan LACP para su agregación, es posible, mediante SDN, programar la lógica de control de dicha red a través de un elemento controlador sin la necesidad de tener acceso físico a los dispositivos de red.

Bibliografía

[1] M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Develder, D. Colle, B. Dhoedt, and P. Demeester. Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems, 2008. ANTS '08. 2nd International Symposium on*, pages 1–3, 2008.

[2] J. Mankoff, R. Kravets, and E. Blevis. Some computer science issues in creating a sustainable world. *Computer*, 41(8):102–105, August 2008. ISSN 0018-9162.

[3] D. Pamlin and K. Szomolanyi. Saving the climate @ the speed of light-first roadmap for reduced co2 emissions in the eu and beyond. Technical report, World Wildlife Fund and European Telecommunications Network Operators' Association, 2007.

[4] Telefonica. Informe de sostenibilidad corporativa. el futuro es compromiso. Technical report, Telefonica, Mayo 2013.

[5] Mark P. Mills. The cloud begins with coal. big data, big networks, big infrastructure, and big power. Technical report, Digital Power Group, August 2013.

[6] S. Nedevschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, and D. Wetherall. Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaptation. In *Proceedings of the 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, NSDI'08, pages 323–336, Berkeley, CA, USA, 2008. USENIX Association. ISBN 111-999-5555-22-1.

[7] T. Bostoen, S. Mullender, and Y. Berbers. Analysis of disk power management for data-center storage systems. In *Future Energy Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet (e-Energy), 2012 Third International Conference on*, pages 1–10, May 2012.

[8] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee. Energy efficiency in telecom optical networks. *Commun. Surveys Tuts.*, 12(4):441–458, October 2010. ISSN 1553-877X.

[9] The Climate Group. SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. Technical report, 2008. URL `http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf`.

[10] M. Nakamura. Advanced photonic technologies for the information era. In *Proceedings of the Nature Photonics Technology Conference*, Tokyo, Japan, Octubre 2007.

[11] David Larrabeiti, Pedro Reviriego, Jose Alberto Hernandez, Juan Antonio Maestro, and Manuel Urueńa. Towards an energy efficient 10 gb/s optical ethernet: Performance analysis and viability. *Optical Switching and Networking*, 8(3):131–138, 2011.

[12] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, Cristian Estan, David Tsiang, and Stephen J. Wright. Power awareness in network design and routing. In *INFOCOM*, pages 457–465. IEEE, 2008.

[13] Yuvraj Agarwal, Ranveer Chandra, Alec Wolman, Paramvir Bahl, Kevin Chin, and Rajesh Gupta. Wireless wakeups revisited: Energy management for voip over wi-fi smartphones. In *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, MobiSys '07, pages 179–191, New York, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 978-1-59593-614-1.

[14] Maruti Gupta and Suresh Singh. Greening of the internet. In *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '03, pages 19–26, New York, NY, USA, 2003. ACM. ISBN 1-58113-735-4.

[15] Biswanath Mukherjee. *Optical WDM Networks (Optical Networks)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2006. ISBN 0387290559.

[16] L.M. Feeney and M. Nilsson. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1548–1557 vol.3, 2001.

[17] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '99, pages 174–185, New York, NY, USA, 1999. ACM. ISBN 1-58113-142-9.

[18] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '00, pages 56–67, New York, NY, USA, 2000. ACM. ISBN 1-58113-197-6.

[19] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal. Teen: Arouting protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 15th International Parallel &Amp; Distributed Processing Symposium*, IPDPS '01, pages 189–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-0990-8.

[20] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8 - Volume 8*, HICSS '00, pages 8020–, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-0493-0.

[21] Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin. Geographical and Energy Aware Routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. *Energy*, 463, 2001.

[22] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '01, pages 70–84, New York, NY, USA, 2001. ACM. ISBN 1-58113-422-3.

[23] R.C. Shah and J.M. Rabaey. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*, volume 1, pages 350–355 vol.1, Mar 2002.

[24] Deepak Ganesan, Ramesh Govindan, Scott Shenker, and Deborah Estrin. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2Nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking &Amp; Computing*, MobiHoc '01, pages 251–254, New York, NY, USA, 2001. ACM. ISBN 1-58113-428-2.

[25] Anand Srinivas and Eytan Modiano. Minimum energy disjoint path routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '03, pages 122–133, New York, NY, USA, 2003. ACM. ISBN 1-58113-753-2.

[26] S. M Senouci and G. Pujolle. Energy efficient routing in wireless ad hoc networks. In *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, volume 7, pages 4057–4061 Vol.7, June 2004.

[27] Sungoh Kwon and N.B. Shroff. Energy-efficient interference-based routing for multi-hop wireless networks. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pages 1–12, April 2006.

[28] H. Hassanein and Jing Luo. Reliable energy aware routing in wireless sensor networks. In *Dependability and Security in Sensor Networks and Systems, 2006. DSSNS 2006. Second IEEE Workshop on*, pages 54–64, April 2006.

[29] M. Cardei, M.T. Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1976–1984 vol. 3, March 2005.

[30] J. Carle and D. Simplot-Ryl. Energy-efficient area monitoring for sensor networks. *Computer*, 37(2):40–46, Feb 2004. ISSN 0018-9162.

[31] Mihaela Cardei and Ding-Zhu Du. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *Wirel. Netw.*, 11(3):333–340, May 2005. ISSN 1022-0038.

[32] Wei Ye, John S. Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM*, 2002.

[33] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *Wirel. Netw.*, 12(1):63–78, February 2006. ISSN 1022-0038.

[34] Injong Rhee, A. Warrier, M. Aia, Jeongki Min, and M.L. Sichitiu. Z-mac: A hybrid mac for wireless sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 16(3):511–524, June 2008. ISSN 1063-6692.

[35] G. Toussaint. The relative neighborhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 12:1–24, 1980.

[36] J.E. Wieselthier, Gam D. Nguyen, and Anthony Ephremides. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pages 585–594 vol.2, 2000.

[37] Ning Li, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(3):1195–1206, 2005.

[38] F. Ingelrest, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic. Optimal transmission radius for energy efficient broadcasting protocols in ad hoc and sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 17(6):536–547, June 2006. ISSN 1045-9219.

[39] M. Cardei, Jie Wu, and Shuhui Yang. Topology control in ad hoc wireless networks with hitch-hiking. In *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 480–488, Oct 2004.

[40] Shan Lin, Jingbin Zhang, Gang Zhou, Lin Gu, John A. Stankovic, and Tian He. Atpc: adaptive transmission power control for wireless sensor networks. In Andrew T. Campbell, Philippe Bonnet, and John S. Heidemann, editors, *SenSys*, pages 223–236. ACM, 2006. ISBN 1-59593-343-3.

[41] Konstantinos Kalpakis, Koustuv Dasgupta, and Parag Namjoshi. Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 42(6):697–716, August 2003. ISSN 1389-1286.

[42] Jie Wu and Hailan Li. On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, DIALM '99, pages 7–14, New York, NY, USA, 1999. ACM. ISBN 1-58113-174-7.

[43] Fei Dai and Jie Wu. An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 15(10):908–920, Oct 2004. ISSN 1045-9219.

[44] Guangyu Pei, M. Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks. In *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 70–74 vol.1, 2000.

[45] Dang Nguyen and Pascale Minet. Scalability of the olsr protocol with the fish eye extension. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Networking*, ICN '07, pages 88–, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-2805-8.

[46] Christine E. Jones, Krishna M. Sivalingam, Prathima Agrawal, and Jyh Cheng Chen. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. *Wirel. Netw.*, 7(4):343–358, September 2001. ISSN 1022-0038.

[47] Bo Zhai, David Blaauw, Dennis Sylvester, and Krisztian Flautner. Theoretical and practical limits of dynamic voltage scaling. In *Proceedings of the 41st Annual Design Automation Conference*, DAC '04, pages 868–873, New York, NY, USA, 2004. ACM. ISBN 1-58113-828-8. doi: 10.1145/996566.996798.

[48] Mark Weiser, Brent B. Welch, Alan J. Demers, and Scott Shenker. Scheduling for reduced cpu energy. In *OSDI*, pages 13–23. USENIX Association, 1994.

[49] A. Bravo-Vicente, J. Galán-Jiménez, and A. Gazo-Cervero. Analisis del impacto de la configuracion de un dispositivo 802.11g sobre su consumo energetico. In *Actas de las XI Jornadas de Ingenieria Telematica*, pages 1942–1948, 2013.

[50] L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, and M.A. Marsan. Energy-efficient management of umts access networks. In *Teletraffic Congress, 2009. ITC 21 2009. 21st International*, pages 1–8, Sept 2009.

[51] P. Reviriego, B. Huiszoon, V. López, R. B. Coenen, J.A. Hernández, and J.A. Maestro. Improving energy efficiency in ieee 802.3ba high-rate ethernet optical links. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 17(2):419–427, March 2011. ISSN 1077-260X.

[52] Ken Christensen, Pedro Reviriego, Bruce Nordman, Michael Bennett, Mehrgan Mostowfi, and Juan Antonio Maestro. Ieee 802.3az: The road to energy efficient ethernet. *Comm. Mag.*, 48(11):50–56, November 2010. ISSN 0163-6804.

[53] Steven Lanzisera, Bruce Nordman, and RichardE. Brown. Data network equipment energy use and savings potential in buildings. *Energy Efficiency*, 5(2): 149–162, 2012. ISSN 1570-646X.

[54] M. Mostowfi and K. Christensen. Saving energy in lan switches: Synchronized packet coalescing for energy efficient ethernet. In *Proceedings of the International Green Computing Conference*, July 2011.

[55] IEEE. Ieee draft standard for information technology telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks specific requirements part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (csma/cd) access method and physical layer specifications amendment: Media access control parameters, physical layers and management parameters for energy-efficient ethernet. *IEEE P802.3az/D3.1, June 2010 (Draft Amendment of IEEE Std 802.3-2008)*, pages 1–0, July 2010.

[56] Cisco Systems and Intel Corporation. Ieee 802.3az energy efficient ethernet: Build greener networks. Technical report, Cisco Systems and Intel Corporation, 2011.

[57] Pedro Reviriego, José Alberto Hernández, David Larrabeiti, and Juan Antonio Maestro. Performance evaluation of energy efficient ethernet. *IEEE Communications Letters*, 13(9):697–699, 2009.

[58] Pedro Reviriego, Ken Christensen, Juan Rabanillo, and Juan Antonio Maestro. An initial evaluation of energy efficient ethernet. *IEEE Communications Letters*, 15(5):578–580, 2011.

[59] P. Reviriego, V. Sivaraman, Z. Zhao, J.A. Maestro, A. Vishwanath, A. Sanchez-Macian, and C. Russell. An energy consumption model for energy efficient ethernet switches. In *High Performance Computing and Simulation (HPCS), 2012 International Conference on*, pages 98–104, July 2012.

[60] P. Reviriego, J.A. Maestro, J.A. Hernández, and D. Larrabeiti. Burst transmission for energy-efficient ethernet. *Internet Computing, IEEE*, 14(4):50–57, July 2010. ISSN 1089-7801.

[61] J. Rodgers. Energy efficient ethernet: Technology, application and why you should care, May 2011. URL `http://communities.intel.com/community/wired/blog/2011/05/05/energy-efficient-ethernet-technology-application-and-why-you-should-care`.

[62] Chamara Gunaratne, Kenneth Christensen, Bruce Nordman, and Stephen Suen. Reducing the energy consumption of ethernet with adaptive link rate (alr). *IEEE Trans. Comput.*, 57(4):448–461, April 2008. ISSN 0018-9340.

[63] Nedeljko Vasić and Dejan Kostić. Energy-aware traffic engineering. In *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and*

Networking, e-Energy '10, pages 169–178, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-4503-0042-1.

[64] Jiayue He, Martin Suchara, Ma'ayan Bresler, Jennifer Rexford, and Mung Chiang. Rethinking internet traffic management: From multiple decompositions to a practical protocol. In *Proceedings of the 2007 ACM CoNEXT Conference*, CoNEXT '07, pages 17:1–17:12, New York, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 978-1-59593-770-4.

[65] David Applegate and Edith Cohen. Making intra-domain routing robust to changing and uncertain traffic demands: Understanding fundamental tradeoffs. In *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '03, pages 313–324, New York, NY, USA, 2003. ACM. ISBN 1-58113-735-4.

[66] Luca Chiaraviglio, Marco Mellia, and Fabio Neri. Reducing power consumption in backbone networks. In *ICC*, pages 1–6. IEEE, 2009.

[67] Will Fisher, Martin Suchara, and Jennifer Rexford. Greening backbone networks: Reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links. In *Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking*, Green Networking '10, pages 29–34, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-4503-0196-1.

[68] A. P. Bianzino, C. Chaudet, F. Larroca, D. Rossi, and J. Rougier. Energy-aware routing: A reality check. In *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE*, pages 1422–1427. IEEE, December 2010. ISBN 978-1-4244-8863-6.

[69] Gangxiang Shen and Rodney S. Tucker. Energy-minimized design for ip over wdm networks. *J. Opt. Commun. Netw.*, 1(1):176–186, Jun 2009.

[70] Mohammad Masud Hasan, Farid Farahmand, Ankitkumar N. Patel, and Jason P. Jue. Traffic grooming in green optical networks. In *ICC*, pages 1–5. IEEE, 2010. ISBN 978-1-4244-6402-9.

[71] Cisco. Reduce power consumption through integrated services delivery. White paper, February 2014. URL `http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns340/ns517/ns477/net_implementation_white_paper0900aecd80716af6.html`.

[72] Weigang Hou, Lei Guo, Xuetao Wei, and Xiaoxue Gong. Multi-granularity and robust grooming in power- and port-cost-efficient ip over wdm networks. *Computer Networks*, 56(10):2383–2399, 2012.

[73] A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Marazza, and E. Vittorini. An energy saving routing algorithm for a green ospf protocol. In *INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops , 2010*, pages 1–5, March 2010.

[74] Luiz André Barroso and Urs Hölzle. The case for energy-proportional computing. *Computer*, 40(12):33–37, December 2007. ISSN 0018-9162.

[75] Ilfat Ghamlouche, Teodor Gabriel Crainic, and Michel Gendreau. Cycle-based neighbourhoods for fixed-charge capacitated multicommodity network design. *Operations Research*, 51(4):655–667, 2003.

[76] Luca Chiaraviglio, Marco Mellia, and Fabio Neri. Energy-aware backbone networks: a case study. In *First Int. Workshop on Green Communications (GreenCommÕ09*, 2009.

[77] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri. Minimizing isp network energy cost: Formulation and solutions. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 20(2): 463–476, April 2012. ISSN 1063-6692.

[78] Yang Xiao. *Bio-inspired computing and networking.* Boca Raton, FL: CRC Press. xviii, 534 p. $ 119.95/hbk , 2011.

[79] Chenyu Zheng and D.C. Sicker. A survey on biologically inspired algorithms for computer networking. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 15(3): 1160–1191, Third 2013. ISSN 1553-877X.

[80] Falko Dressler and Ozgur B. Akan. A survey on bio-inspired networking. *Comput. Netw.*, 54(6):881–900, April 2010. ISSN 1389-1286.

[81] Charles Darwin. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection.* Murray, London, 1859. or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life.

[82] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1989. ISBN 0201157675.

[83] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence.* MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992. ISBN 0262082136.

[84] James Kennedy and Russell C. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pages 1942–1948, 1995.

[85] Matlab. Matlab global optimization toolboxtm, February 2014. URL `http://www.mathworks.es/help/toolbox/gads/ga.html`.

[86] *PSOt - a particle swarm optimization toolbox for use with Matlab*, 2003.

[87] Chris Phillips, Alfonso Gazo-Cervero, Jaime Galan-Jimenez, and Xin Chen. Pro-active energy management for wide area networks. In *Communication Technology and Application (ICCTA 2011), IET International Conference on*, pages 317–322, Oct 2011.

[88] Géant. Géant network, February 2014. URL http://www.geant.net.

[89] B. Chinoy and H. Braun. The national science foundation networks. Technical Report SDSC Report GA-A21029, San Diego Supercomputer Center, Sep 1992.

[90] Totem. At&t topology, February 2014. URL http://totem.run.montefiore.ulg.ac.be/examples.html.

[91] Cisco. Understanding etherchannel load balancing and redundancy on catalyst switches, February 2014. URL http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/etherchannel/12023-4.html.

[92] IEEE. Ieee standard for local and metropolitan area networks - link aggregation. *IEEE Std 802.1AX-2008*, pages c1–145, Nov 2008.

[93] R. Hinden. Virtual router redundancy protocol (vrrp). RFC 3768 (Informational), April 2004. URL http://www.ietf.org/rfc/rfc3768.txt.

[94] IEEE. Ieee standard for local and metropolitan area networks: Media access control (mac) bridges. *IEEE Std 802.1D-2004 (Revision of IEEE Std 802.1D-1998)*, pages 1–277, June 2004.

[95] A.N. Bhagat. Multichassis link aggregation group. Google Knowledge Base. URL https://sites.google.com/site/amitsciscozone/home/link-aggregation/multichassis-link-aggregation-group.

[96] J. Touch and R. Perlman. Transparent interconnection of lots of links (trill): Problem and applicability statement. RFC 5556 (Informational), May 2009. URL http://www.ietf.org/rfc/rfc5556.txt.

[97] IEEE. Ieee standard for local and metropolitan area networks–media access control (mac) bridges and virtual bridged local area networks–amendment 20: Shortest path bridging. *IEEE Std 802.1aq-2012 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2011 as amended by IEEE Std 802.1Qbe-2011, IEEE Std 802.1Qbc-2011, IEEE Std 802.1Qbb-2011, IEEE Std 802.1Qaz-2011, and IEEE Std 802.1Qbf-2011)*, pages 1–340, June 2012.

[98] Rich Seifert and James Edwards. *The All-New Switch Book: The Complete Guide to LAN Switching Technology*. Wiley Publishing, 2 edition, 2008. ISBN 0470287152, 9780470287156.

[99] H.M. Frazier. Aggregation at the physical layer. *Communications Magazine, IEEE*, 46(2):S12–S12, 2008. ISSN 0163-6804.

[100] T. Li, B. Cole, P. Morton, and D. Li. Cisco hot standby router protocol (hsrp). RFC 2281 (Informational), March 1998. URL http://www.ietf.org/rfc/rfc2281.txt.

[101] Cisco. Glbp - gateway load balancing protocol, February 2014. URL http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_2t/12_2t15/feature/guide/ft_glbp.html.

[102] Petr Lapukhov. Understanding stp and rstp convergence, 2010. URL http://blog.ine.com/wp-content/uploads/2010/04/understanding-stp-rstp-convergence.pdf.

[103] W. Wojdak. Rapid spanning tree protocol: A new solution from an old technology. *CompactPCI Systems Magazine, Telecom Special Feature*, March, 2003.

[104] R. Perlman, D. Eastlake 3rd, D. Dutt, S. Gai, and A. Ghanwani. Routing bridges (rbridges): Base protocol specification. RFC 6325 (Informational), July 2011. URL http://www.ietf.org/rfc/rfc2281.txt.

[105] Chunyang Lu, Zhixiong Jiang, Jinping Yu, Gan Zhang, Mingfu Li, Wei Liang, and Jingping Bi. Understanding the overhead of large layer 2 data center networking: Measurement and analysis of trill as an example. In *Innovative Computing Technology (INTECH), 2013 Third International Conference on*, pages 555–560, Aug 2013.

[106] R. Doverspike, K.K Ramakrishnan, and C. Chase. *Guide to Reliable Internet Services and Applications*, chapter Structural overview of ISP networks. Springer, 2010.

[107] D.J. Koenen and M. Chuang. Method for ethernet power savings on link aggregated groups, December 11 2008. URL http://www.google.nl/patents/US20080304519. US Patent App. 12/121,523.

[108] Y. Fukuda, T. Ikenaga, H. Tamura, M. Uchida, K. Kawahara, and Y. Oie. Performance evaluation of power saving scheme with dynamic transmission capacity control. In *GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE*, pages 1–5, Nov 2009.

[109] H. Imaizumi, T. Nagata, G. Kunito, K. Yamazaki, and Hiroyuki Morikawa. Power saving mechanism based on simple moving average for 802.3ad link aggregation. In *GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE*, pages 1–6, Nov 2009.

[110] B. Fortz and M. Thorup. Optimizing ospf/is-is weights in a changing world. *IEEE J.Sel. A. Commun.*, 20(4):756–767, September 2006. ISSN 0733-8716.

[111] Lin Liu and B. Ramamurthy. Rightsizing bundle link capacities for energy savings in the core network. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, pages 1–6, Dec 2011.

[112] Lin Liu and B. Ramamurthy. A dynamic local method for bandwidth adaptation in bundle links to conserve energy in core networks. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS), 2011 IEEE 5th International Conference on*, pages 1–6, Dec 2011.

[113] R.G. Garroppo, Giordano S., G. Nencioni, and M.G. Scutella. Power-aware routing and network design with bundled links: Solutions and analysis. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013:1–16, 2013.

[114] J.C.C. Restrepo, C.G. Gruber, and C.M. Machuca. Energy profile aware routing. In *Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on*, pages 1–5, June 2009.

[115] RedIRIS. Rediris. red académica y de investigación espanola, February 2014. URL `http://www.rediris.es/`.

[116] SimpleWeb. Simpleweb traces. pcap traces. trace 6 - packet headers., . URL `http://traces.simpleweb.org/traces/TCP-IP/location6/`.

[117] SimpleWeb. Simpleweb traces. pcap traces. trace 2 - packet headers., . URL `http://traces.simpleweb.org/traces/TCP-IP/location2/`.

[118] WAND Network Research Group. Wits: Waikato viii. URL `http://wand.net.nz/wits/waikato/8/`.

[119] SimpleWeb. Simpleweb traces. pcap traces. trace 3 - packet headers., . URL `http://traces.simpleweb.org/traces/TCP-IP/location3/`.

[120] SimpleWeb. Simpleweb traces. pcap traces. trace 1 - packet headers., . URL `http://traces.simpleweb.org/traces/TCP-IP/location1/`.

[121] The Cooperative Association for Internet Data Analysis. Passive monitor: equinix-chicago, . URL `http://www.caida.org/data/monitors/passive-equinix-chicago.xml`.

[122] The Cooperative Association for Internet Data Analysis. Passive monitor: equinix-sanjose, . URL `http://www.caida.org/data/monitors/passive-equinix-sanjose.xml`.

[123] ESpanix. Espanix punto neutro espanol de internet, February 2014. URL `http://www.espanix.net/`.

Apéndice A

Listado de Acrónimos

A. LISTADO DE ACRÓNIMOS

ALR	Adaptive Link Rate
ARP	Address Resolution Protocol
AS	Autonomous System
BMAC	Backbone Media Access Control
BVID	Backbone Virtual Local Area Network Identifier
CBR	Constant Bit Rate
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
EEE	Energy Efficient Ethernet
EEUU	Estados Unidos de América
FEE	Función de Energía Equivalente
GA	Genetic Algorithm
GLBP	Gateway Load Balancing Protocol
H-VPLS	Hierarchical Virtual Private Local Area Network Service
HSRP	Hot Standby Router Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
ILP	Integer Linear Programming
IP	Internet Protocol
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
ISI	Institute for Scientific Information
ISL	Inter Switch Link
ISP	Internet Service Provider

JCR	Journal Citation Reports
LACPDU	Link Aggregation Control Protocol Data Unit
LACP	Link Aggregation Control Protocol
LAG	Link Aggregation Group
LMST	Local Minimum Spanning Tree
LPI	Low Power Idle
LP	Linear Programming
MAC	Media Access Control
MC-LAG	Multi-Chassis Link Aggregation Group
MCMF	Multi-Commodity Maximum Flow
MCO	Mínimos Cuadrados Ordinarios
MST	Minimum Spanning Tree
NIC	Network Interface Card
OAM	Operations, Administration and Management
OLSR	Optimized Link State Routing
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PAgP	Port Aggregation Control Protocol
PBB	Provider Backbone Bridges
PSO	Particle Swarm Optimization
RNG	Relative Neighborhood Graph
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
SFe	Single Frame efficiency
SPBM	Shortest Path Bridging Mac-in-Mac
SPBV	Shortest Path Bridging Virtual Local Area Network
SPB	Shortest Path Bridging
SPF	Shortest Path-First

SPVID	Shortest Path Virtual Local Area Network Identifier
STP	Spanning Tree Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
TRILL	Transparent Interconnection of Lots of Links
VLAN	Virtual Local Area Network
VRRP	Virtual Router Redundancy Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network