

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO – CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE MIGRACIÓN
DE REDES DWDM CON REJILLA FIJA A FLEXIBLE**

Macarena Fernanda Saavedra Orrego

**INFORME FINAL DEL PROYECTO
PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO**

ENERO DE 2018

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE
MIGRACIÓN DE REDES DWDM CON REJILLA FIJA A FLEXIBLE**

INFORME FINAL

Presentado en cumplimiento de los requisitos
para optar al título profesional de
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO
otorgado por la
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
de la
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Macarena Fernanda Saavedra Orrego

Profesor Guía: Sr. Ariel Leiva López
Profesor Correferente Sr. Francisco Apablaza Martínez
Profesor Correferente Sr. Raimundo Villarroel Valencia

ENERO DE 2018

ACTA DE APROBACIÓN

La Comisión Calificadora designada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica ha aprobado el texto del Informe Final de Proyecto de Titulación, desarrollado entre el Segundo Semestre de 2014 y el Primer Semestre de 2015 y denominado

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE MIGRACIÓN DE REDES DWDM CON REJILLA FIJA A FLEXIBLE

Presentado por la Señorita
Macarena Fernanda Saavedra Orrego

Sr. Ariel Leiva López
Profesor Guía

Sr. Francisco Apablaza Martínez
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, ENERO DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis Padres por su infinita paciencia y por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, sin ellos nada de esto sería posible. Muchas gracias.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE MIGRACIÓN DE REDES DWDM CON REJILLA FIJA A FLEXIBLE

MACARENA FERNANDA SAAVEDRA ORREGO

Profesor Guía Sr. Ariel Leiva López

RESUMEN

Este trabajo plantea una metodología que permite evaluar el costo total que implica migrar desde una red DWDM estática saturada hacia diferentes alternativas de mayor capacidad. Es lo bastante genérica para ser aplicada en diversos casos ya que, las alternativas de migración consideradas presentan diferentes tipos de operación de la capa DWDM, así como también se toma en cuenta que la asignación de frecuencias portadoras se lleve a cabo de manera fija o flexible.

Esta metodología se compone de siete pasos a seguir en los cuales se determinan ciertos parámetros necesarios para realizar el estudio de una red DWDM durante un proceso de migración con sus respectivas alternativas que permitan aumentar su capacidad y donde también son considerados los costos involucrados al momento de realizar tal procedimiento.

Posteriormente, gracias a los resultados obtenidos, es posible decidir qué alternativa de migración es la más conveniente, es decir, la alternativa que presenta los menores costos totales de inversión frente a un mismo aumento de capacidad.

A modo de ejemplo se aplica la metodología de evaluación en tres posibles escenarios de migración. Estas opciones contemplan mantener la operación estática de la capa DWDM y la grilla fija pero aumentar la tasa de transmisión de sus portadoras, o bien, migrar hacia una red dinámica aumentando la tasa de transmisión de las portadoras y en donde es factible mantener la grilla fija o implementar grilla flexible. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de las tres alternativas y se concluye que la opción más conveniente a la hora de realizar un proceso de migración es mantener la red operando de forma estática, puesto que migrar hacia una red dinámica, sea o no flexible, presenta una mayor inversión. Por otra parte, esta metodología también permite identificar factores que son claves a la hora de evaluar los costos debido al efecto que provocan en él.

Los resultados entregados por esta metodología de evaluación tecno-económica son de gran utilidad para los operadores de redes ópticas DWDM al momento de tomar importantes decisiones.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1	1
REDES ÓPTICAS DWDM	1
1.1 DWDM o Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa	1
1.2 Red DWDM	1
1.2.1 Tipo de operación de una red DWDM	4
1.2.2 Grilla fija	5
1.2.3 Grilla flexible	6
1.3 Encaminamiento y asignación de longitud de onda	7
1.4 Objetivos del proyecto	8
CAPÍTULO 2	10
PROCESO DE MIGRACIÓN	10
2.1 Precedentes de un proceso de migración	10
2.2 Alternativas de aumento de capacidad	12
2.3 Opciones de migración	13
2.4 Modificaciones como consecuencia de un proceso de migración	14
CAPÍTULO 3	17
COSTOS DE MIGRACIÓN	17
3.1 Desembolsos como consecuencia de un proceso de migración	17
3.2 CapEx diferencial	17
3.3 OpEx	18
3.4 Costo total de migración	20
CAPÍTULO 4	23
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA	23
4.1 Metodología paso a paso de evaluación de alternativas	23
4.1.1 Paso 1	23
4.1.2 Paso 2	23
4.1.3 Paso 3	24
4.1.4 Paso 4	25
4.1.5 Paso 5	26
4.1.6 Paso 6	26
4.1.7 Paso 7	27
CAPÍTULO 5	28
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROPUESTA	28
5.1 Topología de red	28
5.2 Paso 1: Definición escenario inicial <i>A</i> y escenarios de migración <i>Bi</i>	28

5.3	Paso 2: Definición tasa de crecimiento de tráfico, carga de tráfico inicial y carga de tráfico máxima permitida	35
5.4	Paso 3: Estimación del tiempo de operación (T)	35
5.5	Paso 4: Determinación del número de instantes de inversión	36
5.6	Paso 5: Evaluación de costos	36
5.7	Paso 6: Comparación del costo total de las alternativas de migración	48
5.8	Paso 7: Evaluar el costo total de migración por unidad espectral	51
5.9	Análisis de sensibilidad	52
5.9.1	Factores claves	52
	CONCLUSIONES	54
	REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1-1 Multiplexación de N señales enviadas por una misma fibra óptica	2
Fig. 1-2 Esquema general de una red DWDM con sus respectivas capas	3
Fig. 1-3 Esquema de un nodo genérico DWDM	3
Fig. 1-4 Esquema general de un enlace DWDM	5
Fig. 1-5 Grilla fija con distintas separaciones espectrales	5
Fig. 1-6 Ejemplo de grilla fija con separación espectral de 50 GHz	6
Fig. 1-7 Concepto de FSUs	7
Fig. 1-8 Ejemplo de espaciamiento elástico utilizando grilla flexible	7
Fig. 2-1 Alternativas para definir una opción de migración	14
Fig. 3-1 Evolución temporal de la carga de tráfico, D_CapEx y OpEx	21
Fig. 4-1 Metodología de evaluación tecno-económica	24
Fig. 5-1 Topología NSFNet	28
Fig. 5-2 Esquema de nodo para escenario inicial A	29
Fig. 5-3 Esquema de nodo para escenarios B2 y B3	32
Fig. 5-4 Evolución de la carga de tráfico de las conexiones en el tiempo	36
Fig. 5-5 D_CapEx normalizado para los diferentes escenarios de migración	40
Fig. 5-6 Evolución temporal de la inversión de los componentes del escenario B1	40
Fig. 5-7 Evolución temporal de la inversión de componentes del escenario B2	41
Fig. 5-8 Evolución temporal de la inversión de los componentes del escenario B3	41
Fig. 5-9 OpEx total normalizado para los diferentes escenarios de migración	45
Fig. 5-10 OpEx total normalizado desagregado de los escenarios Bi	46
Fig. 5-11 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B1	47
Fig. 5-12 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B2	47
Fig. 5-13 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B3	48
Fig. 5-14 Costo total de migración normalizado, indicando diferentes aportes	49
Fig. 5-15 Evolución temporal CM normalizado desagregado para el escenario B1	49
Fig. 5-16 Evolución temporal CM normalizado desagregado para escenario B2	50
Fig. 5-17 Evolución temporal CM normalizado desagregado para escenario B3	50
Fig. 5-18 Costo de migración por unidad espectral normalizado	52
Fig. 5-19 CM normalizado para escenario B3 con diversas variaciones	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Tabla comparativa sobre trabajos previos analizados	12
Tabla 2-2 Modificaciones como consecuencia de un proceso de migración	16
Tabla 5-1 Requerimiento de dispositivos para escenario A	30
Tabla 5-2 Requerimiento de dispositivos para escenario B1	31
Tabla 5-3 Requerimiento de dispositivos escenario B2	33
Tabla 5-4 Requerimiento total de transpondedores [21]	34
Tabla 5-5 Requerimiento de dispositivos para escenario B3	35
Tabla 5-6 Tipo, número y costo de nuevos dispositivos requeridos en Bi	37
Tabla 5-7 Número total de nuevos dispositivos requeridos en ti	38
Tabla 5-8 Valores de FIT y potencia media de los dispositivos escenarios Bi	43
Tabla 5-9 Número de fallas de los dispositivos en los escenarios Bi	44

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AGC:	Automatic Gain Control
CapEx:	Capital Expenditure
D_CapEx:	Differential Capital Expenditure
DCM:	Dispersion Compensation Module
DWDM:	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA:	Erbium Doped Fiber Amplifier
FDM:	Frequency Division Multiplexing
FIT:	Failure in Time
FSU:	Frequency Slot Unit
Gbps:	Giga bits por segundo
GHz:	Giga Hertz
ILP:	Integer Linear Programming
ITU-T:	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector
M&CS:	Management & Control System
NSFNet:	National Science Foundation's Network
O&M:	<i>Operations & Maintenance</i>
OpEx:	Operational Expenditure
OTN:	Optical Transport Network
OXC:	Optical Cross Conect
RSA:	Routing and Spectrum Allocation
RWA:	Routing and Wavelength Assignment
SDH:	Synchronous Digital Hierarchy
SONET:	Synchronous Optical Network
SSON:	Spectrum Switched Optical Networks
WDM:	Wavelength Division Multiplexing
WSON:	Wavelength Switched Optical Networks
WSS:	Wavelength Selective Switch

INTRODUCCIÓN

Frente a la creciente demanda de tráfico de datos en las redes óptica de transporte, la técnica más apropiada que ha permitido incrementar la capacidad de éstas durante las dos últimas décadas es la denominada Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM) [1]. Ésta incrementa la capacidad de transmisión de la fibra óptica utilizando varias y diferentes longitudes de onda para transportar, al mismo tiempo, flujos separados de datos a través del mismo filamento [2]. La asignación de frecuencias portadoras está normada según la grilla fija de la ITU-T (Rec. G.694.1) [3], donde son establecidas las separaciones fijas entre éstas, por ejemplo 25, 50 ó 100 GHz, siendo la más usada y típica la de 50 GHz, en donde actualmente es posible transmitir a una velocidad de hasta 100 Gbps.

El tráfico de datos ha experimentado un crecimiento exponencial en tasas que van del 30% al 60% anual dependiendo de la naturaleza y de los servicios ofrecidos por los operadores de redes en diferentes zonas geográficas [1]. Por otra parte, se espera que en un futuro cercano las velocidades de transmisión digital sean de 2,5 Gbps a 1000 Gbps [4] y con un tipo de tráfico heterogéneo (solicitudes de conexión a distintas velocidades de transmisión digital [5]). Este crecimiento de tráfico junto con las altas velocidades de transmisión hace deducir que en los próximos años la capacidad de las redes DWDM se verá sobrepasada y agotada, presentando problemas para cubrir el tráfico de datos [6].

De lo descrito anteriormente, surge el inconveniente sobre la asignación de frecuencias portadoras con grilla fija (Rec. G.694.1) ya que, los 50 GHz, que son utilizados en la actualidad, no serán suficientes para atender conexiones con demandas de ancho de banda mayores (por ejemplo igual o mayores a 400 Gbps). En otros casos, se crearía un espectro ocioso que podría ser utilizado de mejor forma en otros canales (por ejemplo transmitir señales de 100 Gbps con el mismo ancho de banda que una señal de 10 Gbps [7]). Para aumentar la eficiencia en el uso de espectro óptico se ha propuesto la asignación de frecuencias portadoras con grilla flexible. Con esta grilla, el espectro es dividido y asignado según los requerimientos de la señal, por ejemplo según la velocidad de transmisión requerida y la distancia a cubrir, lo que posibilita atender más peticiones de conexión [8].

Por otra parte, entre las alternativas más comunes para aumentar la capacidad de una red DWDM se tiene: aumentar la velocidad de transmisión en los canales ya existentes, aumentar el número de canales en la misma o en otra fibra óptica, o también una opción es combinar las alternativas anteriores. Entonces, a estas alternativas, se suma la opción de continuar utilizando grilla fija o reemplazar ésta por una grilla flexible. Si bien son diversas las investigaciones que hablan sobre los beneficios de migrar hacia redes flexibles o elásticas es importante mencionar que ninguno de estos estudios da una respuesta concreta y dirigida a los operadores de redes de telecomunicaciones para que puedan elegir la alternativa menos costosa al momento de realizar un proceso de migración.

En [6] se indaga sobre estrategias de migración desde una red WSON (*Wavelength Switched Optical Networks*, que hace referencia a una arquitectura basada en grilla fija) hacia una red SSON (*Spectrum Switched Optical Networks*, que hace referencia a una

arquitectura basada en grilla flexible). Se analiza también cuándo las redes DWDM presentarían un verdadero problema al agotar su capacidad, lo cual se estima que ocurriría en los próximos 4 años, y se concluye que si la asignación de frecuencias portadoras es flexible sería posible alargar el tiempo de vida de la red en 5 años. En cuanto al análisis de costos de capital (CapEx) se indica que al migrar hacia una red elástica (cuando la capacidad de la red WSON es agotada), el número de dispositivos utilizados es reducido en comparación a seguir operando con grilla fija (añadiendo enlaces en paralelo), por lo tanto, los costos serían menores.

En [9] se presenta una metodología tecno-económica para evaluar el costo total de migración desde redes WDM estáticas (cuando su capacidad se encuentra exhausta) hacia diferentes alternativas de mejoramiento ya sea, manteniendo la operación estática o cambiándola a dinámica. Son considerados los costos de capital (CapEx) y los costos operacionales (OpEx). Los resultados obtenidos sorprenden ya que, a pesar del ahorro de OpEx en un escenario dinámico no es posible compensar la inversión de nuevos componentes, por ende, migrar hacia un escenario dinámico tiene un coste mayor que al de seguir operando bajo operación estática. En este caso no son consideradas las redes flexibles.

En [8] se estudia el proceso de migración donde la grilla flexible es desplegada en la red progresivamente. Algunos ejemplos de las expectativas de migración gradual son: incrementar la capacidad de enlaces específicos en la red cuando sea necesario, uso de *bit rates* elevados también en enlaces específicos, tomar ventaja de la elasticidad en aquellas áreas con grandes variaciones de tráfico, reducir el impacto económico distribuyendo los gastos, etc. Concluye que al ser una migración parcial, de solamente aquellos enlaces que posean mayor carga, se producirán ahorros posteriores de CapEx.

En [10] son investigados diferentes opciones de migración, el primer escenario es denominado “Migración DWDM” en donde los equipos existentes utilizan grilla fija y que dependiendo de las necesidades de tráfico la red puede seguir operando sin sufrir modificaciones. En caso de que la red no sea capaz de enrutar todo el tráfico se puede establecer una próxima generación de redes DWDM. Una segunda opción es la llamada “Grilla Flexible” en donde los operadores instalan en toda la red equipos con grilla flexible disponible. Y por último se encuentra el escenario denominado “Migración Grilla Flexible” en donde se realizan instalaciones intermedias que ofrecen futuras flexibilidades al operador. Cada escenario es evaluado en términos de CapEx en donde los equipos necesarios son multiplicados por su correspondiente costo. Los resultados indican que una “Migración DWDM” es claramente la opción más costosa y que frente a un alto crecimiento de tráfico es más rentable migrar hacia una red con grilla flexible que continuar utilizando equipamiento DWDM estándar, es decir, con grilla fija.

Por último, en [4] son revisados algunos avances en la investigación de redes elásticas. Si bien no ahonda en estudios donde son considerados los costos de migración, pero deja en claro el gran potencial de desplegar redes ópticas flexibles.

Considerando los estudios previos mencionados, es posible percatarse de que ninguno de estos entrega una respuesta concreta frente a la incertidumbre de saber cuál es realmente la opción más conveniente a la hora de migrar desde una red que se encuentra saturada hacia una alternativa de mayor capacidad, desde el punto de vista económico y

en donde sean incluidos tanto los costos de capital como los costos operacionales, así como también tomar en cuenta la opción de implementar grilla flexible a la red. El principal objetivo de este trabajo es responder tal pregunta por lo tanto, se pretende formular una metodología tecno-económica que compare alternativas de migración de redes DWDM. En tal metodología para poder obtener el costo total de migración de los diversos escenarios posibles deben incluidos CapEx y OpEx, para así lograr diferenciar la opción más beneficiosa.

El informe está compuesto de cinco capítulos y su estructura es la siguiente: en el primer capítulo son definidos los conceptos sobre la tecnología DWDM así como también son detalladas las redes ópticas de transporte DWDM con sus respectivas características, incluyendo las novedosas redes elásticas DWDM. El segundo capítulo trata sobre el concepto de migración junto con sus antecedentes, también son definidas las diversas alternativas que se tienen para aumentar la capacidad de una red y que luego forma parte de una opción de migración. Finalmente son descritas las modificaciones en la arquitectura de las redes como consecuencia de un proceso de migración. En el capítulo 3 se explican los costos económicos en los que se incurre producto de un proceso de migración. Se entregan las expresiones necesarias para realizar los cálculos de éstos. A continuación, en el capítulo número 4 se detalla paso a paso la metodología de evaluación propuesta, eje principal de este trabajo de investigación. Posteriormente, en el quinto y último capítulo, se aplica tal metodología a un ejemplo en particular en donde son considerados tres posibles escenarios de migración y posteriormente se exponen los resultados obtenidos. También, llegando al fin de este capítulo se realiza un análisis de sensibilidad con aquellos factores más influyentes y que presentan una mayor contribución al costo total de migración. Finalmente son expuestas las respectivas conclusiones sobre el trabajo.

CAPÍTULO 1

REDES ÓPTICAS DWDM

En este capítulo son definidos los conceptos sobre las actuales redes ópticas DWDM y las posibles redes DWDM flexibles o elásticas, describiendo también sus principales características, la forma de operar de cada una de ellas y la manera en que se lleva a cabo la asignación de espectro óptico según corresponda. También es presentada la problemática que presentan las actuales redes DWDM, lo que permite formular la pregunta de investigación de este trabajo. Por último, son expuestos los objetivos que se desean alcanzar con este trabajo.

1.1 DWDM o Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa

A finales de los años 70 la aparición de la fibra óptica en el mundo de las telecomunicaciones revolucionó el estado de las redes y servicios que existían hasta ese momento. Ha sido un avance grandioso que ha permitido transmitir gran cantidad de información a gran distancia, con toda seguridad y fiabilidad. A todos estos desarrollos se suma la técnica conocida como DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) o Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa que combina múltiples señales ópticas de tal manera que pueden ser amplificadas como un grupo y transportadas a través de una misma fibra para incrementar la capacidad propia del medio de transmisión; cada una de estas señales puede ir a una velocidad distinta y un formato diferente [11]. De esta forma es posible multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica y así también facilitar las comunicaciones bidireccionales. Es una técnica de transmisión que atrae mucho a los operadores de redes ya que, permite aumentar la capacidad de ésta sin tener que agregar más cables. Es utilizada para transmitir a grandes distancias, actuando básicamente en la tercera ventana de operación, es decir, en torno a los 1550 nm, parte del espectro en donde también operan los amplificadores EDFAs que tienen la capacidad de amplificar simultáneamente las múltiples señales ópticas transmitidas a través de la fibra, compensando hasta cierto punto la atenuación producida por ésta [12].

Para poder transmitir mediante DWDM son necesarios dos dispositivos complementarios: un multiplexor en el lado del transmisor y un demultiplexor ubicado en el lado del receptor. La Fig. 1-1 muestra un ejemplo de la técnica DWDM en donde varias portadoras o longitudes de onda ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) por medio del multiplexor (MUX), dispositivo encargado de juntar las diversas señales ópticas, son enviadas a través de una misma fibra óptica y que luego gracias al demultiplexor (DEMUX) son separadas para ser enviadas cada una a su destino.

1.2 Red DWDM

Una red DWDM está dividida en dos capas: una capa electrónica y una capa óptica DWDM, como se aprecia en la Fig. 1-2.

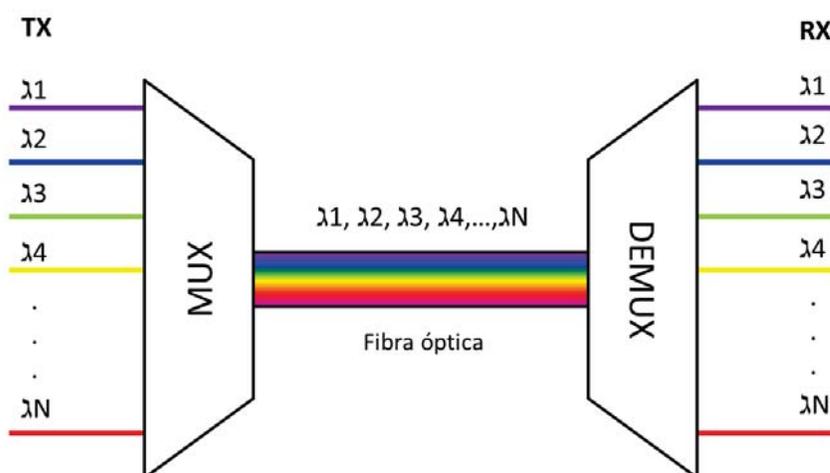


Fig. 1-1 Multiplexación de N señales enviadas por una misma fibra óptica

La capa electrónica está compuesta de *routers* o enrutadores que procesan las señales en el dominio electrónico y tienen interfaces electro-ópticas para poder comunicarse con la capa DWDM, aunque también puede componerse por sistemas SDH.

La capa DWDM está formada por nodos y enlaces de fibra óptica, ambos utilizan tecnología DWDM. Los nodos son los encargados de tomar la señal de salida de la capa electrónica y convertirla en una portadora DWDM que es asignada según la grilla fija de la ITU-T (Rec. G.694.1). Estos dispositivos pueden recibir información que va dirigida a ellos, puede transmitir información hacia cualquier otro nodo de la red, y también puede enviar señales de entrada hacia los enlaces de salida correspondiente según el nodo de destino. Para realizar todo esto, cada nodo DWDM está compuesto de cuatro etapas como se puede observar en la Fig. 1-3.

- Etapa de entrada: la señal es separada por los demultiplexores (DEMUX en Fig. 1-3) en sus diversos canales ópticos y luego, al pasar por los regeneradores y/o conversores de longitud de onda (Reg/WC en Fig. 1-3), la señal de cada canal es regenerada para compensar la degradación de calidad sufrida en su transmisión a través de la fibra óptica. Luego el conjunto de señales pasa a la siguiente etapa.
- Etapa de conmutación: compuesta por un dispositivo de conmutación óptica, el cual posee cierta cantidad de puertos de entrada así como también de salida. Este dispositivo es el encargado de conectar cada puerto de entrada (por donde ingresa la señal que viene de la etapa de entrada) a cierto puerto de salida determinado. Si alguna señal proveniente de la etapa de entrada se dirige hacia la capa electrónica el dispositivo de conmutación conecta el puerto de entrada con uno de los puertos de salida que se conecta a la etapa de interfaz capa electrónica-DWDM, en cambio si la señal se dirige a otro nodo de la red, el dispositivo de conmutación enlaza el puerto de entrada con el puerto de salida correspondiente a la fibra y longitud de onda que la señal necesita para llegar a destino.

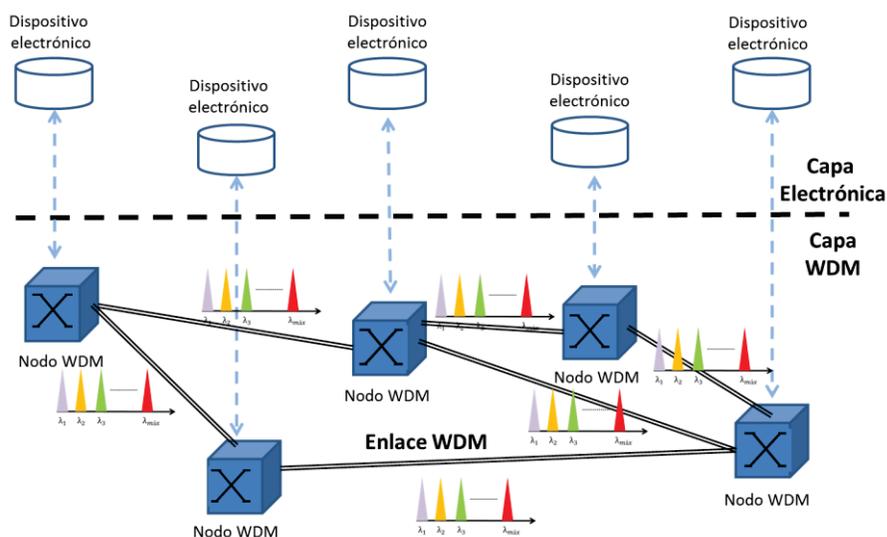


Fig. 1-2 Esquema general de una red DWDM con sus respectivas capas

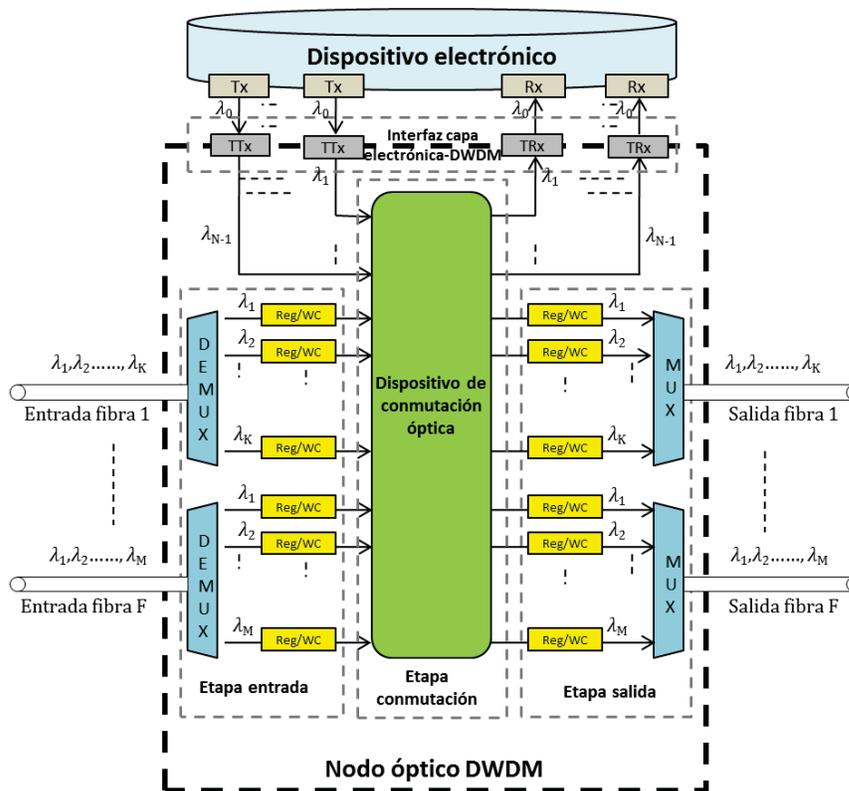


Fig. 1-3 Esquema de un nodo genérico DWDM

- Interfaz capa electrónica-DWDM: esta etapa está compuesta por transmisores monocanal, transpondedores de transmisión, receptores monocanal, y transpondedores

de recepción (en la Fig. 1-3 aparecen como TX, TTx, Rx, y TRx respectivamente). Todos estos dispositivos son los encargados de convertir la señal electrónica en una señal DWDM o, por el contrario, convertir una señal DWDM en una señal electrónica. El transmisor monocanal convierte la señal electrónica en una señal óptica a través de una longitud de onda única (λ_0 en la Fig. 1-3) luego, a través del transpondedor de transmisión, la señal óptica es convertida en una señal DWDM con una longitud de onda definida según la grilla fija (Rec. G.694.1) para posteriormente pasar a la etapa de conmutación. De forma inversa, si la señal se dirige a la capa electrónica desde la capa DWDM, el transpondedor de recepción convierte la señal DWDM en una señal monocanal que posteriormente pasa al receptor monocanal para ser convertida en una señal electrónica.

- Etapa de salida: esta última etapa se compone por regeneradores y/o conversores de longitud de onda (definidos como Reg/WC en la Fig. 1-3), dispositivos encargados de regenerar las señales provenientes del dispositivo de conmutación desde sus distintos puertos de salida, y también por multiplexores (MUX en la Fig. 1-3) cuya función es juntar las distintas señales ópticas provenientes del regenerador para finalmente ser transmitidas por las fibras ópticas o enlaces.

En cuanto a los enlaces de la capa DWDM, estos son los encargados de conectar los nodos y de transferir información a través de las portadoras ópticas. En la Fig. 1-4 se puede observar un esquema general de un enlace típico DWDM entre un nodo "A" y un nodo "B", el cual está compuesto por la fibra óptica y por amplificadores ópticos (AO en la Fig. 1-4). Las distintas señales (cada una de ellas con una longitud de onda diferente) al pasar por el multiplexor ubicado en la etapa de salida del nodo (ver Fig. 1-3) se juntan y se propagan a través de la fibra óptica por lo cual sufren algunas atenuaciones, para compensar tales debilitamientos de las señales son utilizados los amplificadores ópticos, así se aumenta la potencia de éstas sin tener la necesidad de transformar estas mismas señales al dominio electrónico. Los amplificadores más usados son los EDFAs y según su ubicación en el enlace son denominados como: *booster* (ubicados inmediatamente después del multiplexor o a la salida del nodo), amplificadores de línea (dependiendo de las distancias se encuentran entre los *booster* y los pre-amplificadores), y por último los pre-amplificadores (ubicados al final del enlace, justo antes del demultiplexor o antes del nodo).

1.2.1 Tipo de operación de una red DWDM

Las redes ópticas de transporte, según sea su naturaleza de operación, pueden ser clasificadas en redes estáticas o en redes dinámicas, en donde la transferencia de datos entre los diferentes nodos de la red DWDM se realiza a través de caminos ópticos o *lightpaths* (longitud de onda que une dos nodos DWDM a través de una ruta en la red).

- **Redes estáticas DWDM:** correspondiente a aquellas redes en donde las conexiones son permanentes y continúan así durante días, semanas, meses, o años, es decir, que a medida que avanza el tiempo las conexiones establecidas en un comienzo se mantienen iguales.

- **Redes dinámicas DWDM:** a este tipo de redes pertenecen las conexiones que se establecen y se liberan bajo demanda. Las conexiones se establecen por períodos cortos y sólo cuando existe información para transmitir. Luego de terminar con el envío de información, la conexión queda liberada dejando así recursos de red disponibles para establecer conexiones diferentes.

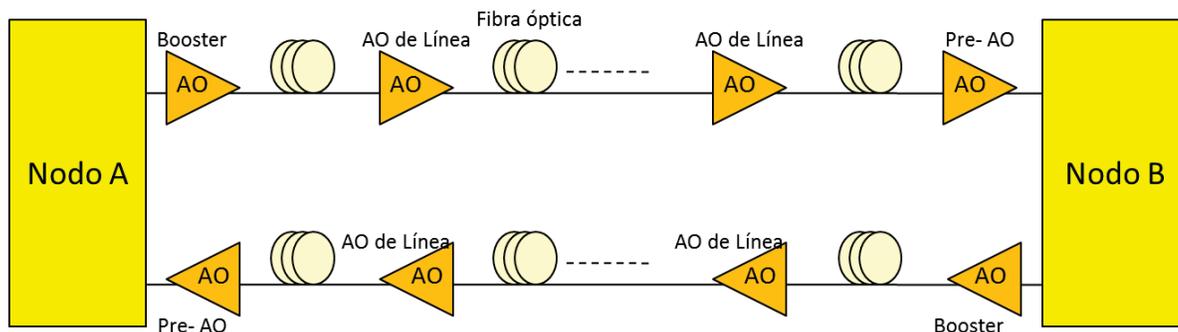


Fig. 1-4 Esquema general de un enlace DWDM

1.2.2 Grilla fija

Actualmente las redes ópticas DWDM utilizan la asignación de frecuencias portadoras basada en la grilla fija de la ITU-T (Rec. G.694.1) donde son establecidas las separaciones fijas entre éstas. Las separaciones pueden ser, por ejemplo, de 25, 50, ó 100 GHz, siendo la más típica y usada la de 50 GHz en donde es posible transmitir a velocidades de 10, 40, y hasta 100 Gbps (actualmente) [3]. En la Fig. 1-5 se puede apreciar esta grilla fija con sus respectivos espaciamentos de canal más utilizados y referidos a una frecuencia central de espectro de 193.1 THz.

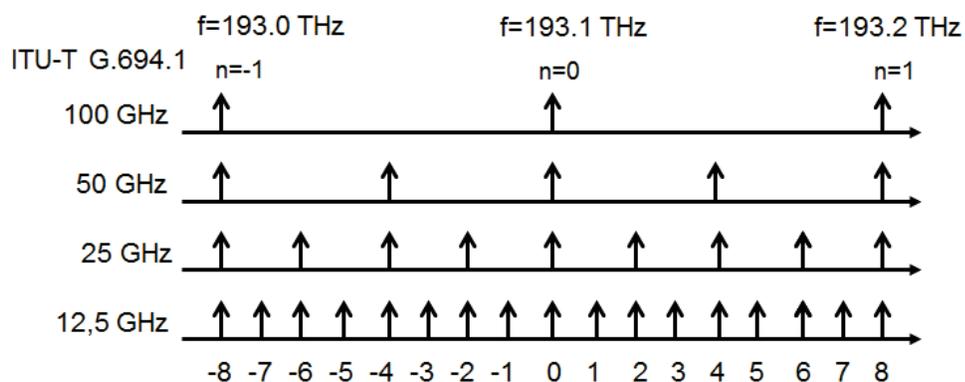


Fig. 1-5 Grilla fija con distintas separaciones espectrales

Con una demanda de tráfico de datos que crece rápidamente y de manera exponencial, presentando tasas de 30% a 60% anuales [1], sumado a la expectativa de velocidades de transmisión, para un futuro cercano, del orden de los 1000 Gbps [4] y con un tipo de tráfico heterogéneo [5], es decir, con solicitudes de conexión a distintas velocidades de transmisión digital, es posible advertir que la separación típica de 50 GHz no será suficiente, o por ejemplo, en caso contrario si se aumenta el ancho espectral pero hay señales que no lo utilizan en su totalidad, quedará cierto espectro ocioso que será desperdiciado en lugar de ser utilizado por otros canales. Un ejemplo de esto se puede observar en la Fig. 1-6 en donde la separación de 50 GHz no es suficiente para transmitir a 400 Gbps o a 1 Tbps, por lo tanto, la grilla fija pasa a ser poco conveniente.

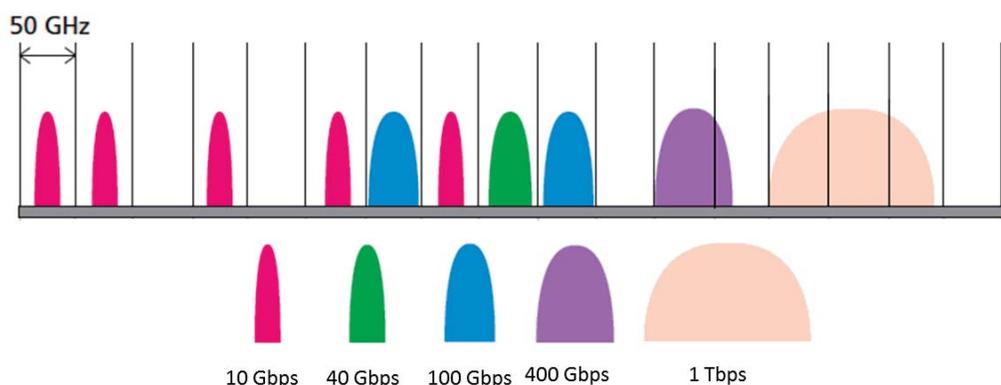


Fig. 1-6 Ejemplo de grilla fija con separación espectral de 50 GHz

1.2.3 Grilla flexible

Para incluir flexibilidad al dominio óptico y así aumentar la eficiencia en cuanto al uso de espectro óptico, y también para enfrentar de mejor manera las futuras demandas de tráfico heterogéneas, han sido propuestas las denominadas redes elásticas o flexibles [10]. En estas redes, la asignación de frecuencias portadoras se realiza según sea la demanda de tráfico, la velocidad de transmisión requerida, la distancia que se quiere cubrir, los formatos de modulación utilizados, y de acuerdo a las condiciones actuales en los enlaces y la red [4]. Sus especificaciones también se encuentran en la Rec. G.694.1 de la ITU-T [3] en la sección “Grilla flexible”, en donde son definidas las separaciones de canal y las frecuencias centrales de cada uno.

El espectro óptico de las redes DWDM flexibles adopta una granularidad fina en donde, por ejemplo, se puede adoptar una granularidad de 12,5 GHz [3]. Cada trozo de espectro es denominado FSU (*Frequency Slot Unit*) [7]. La granularidad hace referencia al mínimo ancho de banda del *slot*, por ende un canal puede ser establecido por uno o más FSUs. En la Fig. 1-7 se ilustra el término de FSU en donde en (a) es posible observar la forma en que es seccionado el espectro y en donde cada trozo corresponde a un FSU. En la imagen, cada FSU tiene un ancho espectral de 12.5 GHz y en (b), según los requerimientos de espectro, son asignados grupos de FSUs espectralmente consecutivos, por ejemplo, para 25 GHz son asignados dos FSUs, y en el caso de 75 GHz son cuatro los FSUs consecutivos asignados. En la Fig. 1-8 se presenta un ejemplo del uso eficiente

de este tipo de grilla en donde el espectro óptico es dividido y asignado flexiblemente, dejando libre aquel que no es utilizado para que sea aprovechado por otros canales y así aumentar la capacidad del sistema DWDM.

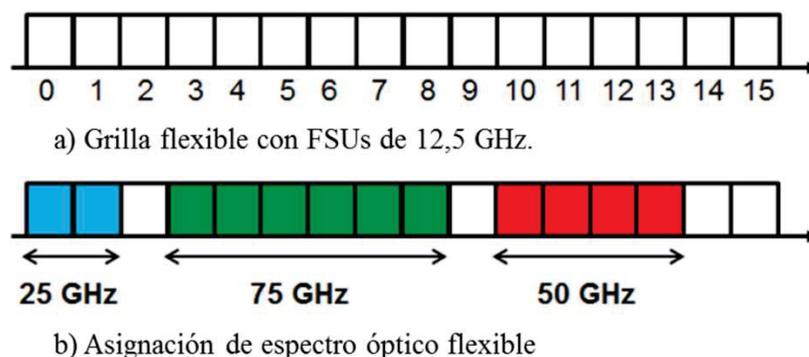


Fig. 1-7 Concepto de FSUs

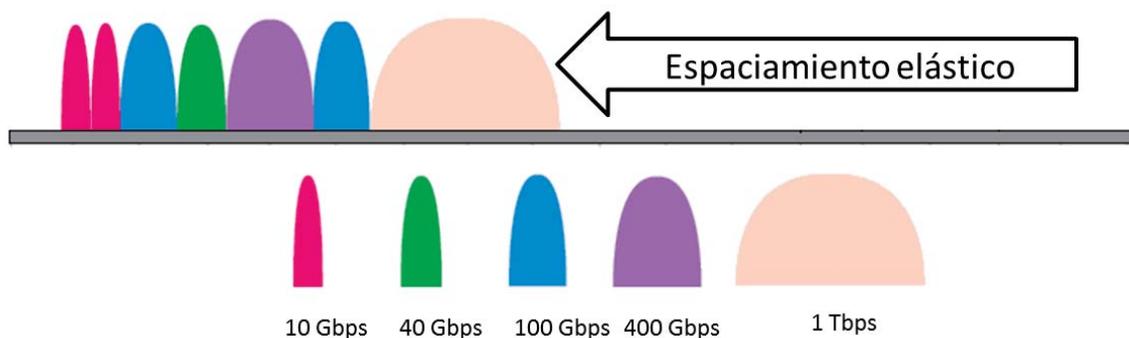


Fig. 1-8 Ejemplo de espaciamiento elástico utilizando grilla flexible

1.3 Encaminamiento y asignación de longitud de onda

Un problema de diseño que se presenta en las redes ópticas DWDM es el de encaminamiento y asignación de longitudes de onda o RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) en donde se debe asignar un camino y una longitud de onda disponible (camino óptico o *lightpath*) entre un par de nodos de la red para transmitir información [13]. El requerimiento RWA puede ser clasificado bajo dos versiones: RWA estático, en donde los requerimientos de tráfico son conocidos previamente puesto que las demandas son el tipo “*offline*”, y RWA dinámico, en donde las peticiones de *lightpaths* llegan de manera fortuita puesto que las demandas son del tipo “*online*”.

Para solucionar el problema RWA en su versión estática comúnmente se usa programación lineal entera (ILP) cuyo objetivo es minimizar el número de portadoras ópticas requeridas para cumplir satisfactoriamente con todas las demandas de tráfico. Con

esta técnica se obtiene una solución óptima pero en el caso de redes muy grandes es conveniente utilizar heurísticas que entregan soluciones para la demanda de tráfico de forma secuencial en cortos tiempos [14].

En el caso del problema RWA dinámico, éste puede ser resuelto de forma separada: primero enrutamiento y después asignación de portadoras (R+WA). Para el primer caso, este problema se resuelve a través de algoritmos del camino más corto o “*shortest path*”, por ejemplo, los algoritmos de Dijkstra y Bellman-Ford [13]. Luego, para la asignación de portadoras son utilizadas heurísticas en donde las portadoras son establecidas de acuerdo a diversas estrategias, por ejemplo: la más utilizada, aleatoriamente, la primera disponible, etc. Para comparar los algoritmos RWA bajo operación dinámica es utilizada como métrica la probabilidad de bloqueo, en donde ésta se debe reducir, o bien, se debe maximizar el número de peticiones que pueden ser atendidas con cierta cantidad de portadoras en cada enlace [14].

Al problema de asignación de recursos en las redes ópticas DWDM elásticas se denomina RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) que se basa en asignar una ruta y el espectro suficiente para conectar un par de nodos de la red para una velocidad digital determinada y con un formato de modulación específico. Típicamente se soluciona asignando rutas y espectro de forma separada (RA+SA) [15]. El problema RSA también puede ser clasificado en: RSA estático y RSA dinámico. Para el caso estático esto se puede solucionar al igual que en el caso de RWA estático, es decir, a través de ILP en donde el objetivo es minimizar el espectro solicitado para satisfacer todas las demandas de tráfico de la red, aunque es preferible utilizar heurísticas puesto que se agregan nuevas restricciones lo que hacen que la resolución por ILP tarde un poco más en obtenerse. En el caso de RSA dinámico, son utilizados algoritmos o heurísticas que entregan soluciones al problema con la red funcionando. Para el enrutamiento es utilizado el algoritmo del camino más corto, o bien el de los k-caminos más cortos y para la asignación de espectro han sido propuestos estrategias como: aleatoriamente asignar los FSUs, asignar los primeros FSUs disponibles y consecutivos, entre otras. En este caso, para comparar algoritmos RSA en operación dinámica la métrica utilizada es la probabilidad de bloqueo para las solicitudes de conexión.

1.4 Objetivos del proyecto

Frente a la creciente demanda de tráfico de datos y a que en un futuro cercano las redes de transporte DWDM tendrán su capacidad saturada utilizando grilla fija [6], la posibilidad de flexibilizar la asignación de espectro óptico e incluirla como posible opción para un proceso de migración (proceso en el cual una red se actualiza con el fin de incrementar su capacidad) es una idea factible.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es formular una metodología tecnológica de comparación de alternativas de migración de redes DWDM, incluyendo la posibilidad de analizar redes ópticas flexibles. Y entre los objetivos específicos se tiene:

- Proponer y detallar escenarios de migración desde las actuales redes DWDM de grilla fija a otras tecnológicamente factibles y de mayor capacidad incluyendo las redes elásticas.

- Establecer un modelo de costos de capital (CapEx) y costos de operación (OpEx) aplicable a los distintos escenarios de migración.
- Establecer metodologías de obtención de parámetros influyentes de los modelos de CapEx y OpEx (capacidad, transmisores, receptores, etc.)
- Elaborar una metodología de evaluación de alternativas de migración en términos de CapEx y OpEx.
- Aplicar la metodología de evaluación a casos genéricos y típicos para luego comparar resultados.

CAPÍTULO 2

PROCESO DE MIGRACIÓN

En este capítulo se describe en qué está basado un proceso de migración desde una red actual DWDM estática hacia alternativas que presentan mayor capacidad. También es determinada la estrategia de migración y se detallan las alternativas posibles para aumentar la capacidad de una red DWDM, obteniendo así diferentes opciones de escenarios finales para un proceso de migración. Por último, se especifican las modificaciones que sufre la red como consecuencia de una opción de migración.

2.1 Precedentes de un proceso de migración

En la actualidad, las redes ópticas DWDM casi en su totalidad operan de forma estática [16], en donde los *lightpaths* se establecen previamente a la puesta en marcha de la red y permanecen así por largo tiempo, sin importar su nivel de utilización. Cuando estos caminos ópticos transmiten información lo hacen a una determinada tasa de transmisión digital que frecuentemente se mide en Gbps. Actualmente es posible transmitir hasta 100 Gbps [3] por portadora óptica.

Investigaciones [1, 17] indican que la tasa de crecimiento de tráfico de datos se encuentra entre el 30% y el 60% aproximadamente por cada año a consecuencia de nuevas tecnologías de acceso óptico, aplicaciones de internet que demandan grandes volúmenes de capacidad para la transmisión de datos, etc. Para prevenir la saturación de la red debido al firme aumento del tráfico de datos, constantemente los operadores de redes DWDM proceden a aumentar la capacidad de ésta cuando los enlaces alcanzan cierto nivel umbral de utilización (este valor queda a criterio del mismo operador). Entonces, un “Proceso de Migración” es aquel en donde la red DWDM realiza ajustes y cambios necesarios para aumentar su capacidad o modificar el tipo de operación de su capa DWDM.

Como se mencionó anteriormente, investigaciones indican que las actuales redes de transporte DWDM tendrán su capacidad agotada utilizando grilla fija, por lo tanto, éstas deberán confrontar un nuevo proceso para aumentar su capacidad. Este aumento de capacidad puede considerar conservar la operación estática o migrar a una red dinámica, así como también (independientemente del modo de operación) continuar operando con la actual grilla fija o implementar la grilla flexible.

Por otra parte, al momento de planificar un proceso de migración también es necesario decidir la estrategia de migración que se llevará a cabo, ésta puede ser del tipo gradual o “*big bang*” [9]. Cabe recordar que el tráfico de las conexiones que debe enfrentar la red DWDM es del tipo heterogéneo, es decir, las conexiones entre los nodos soportan diversas cargas de tráfico y distintas tasas de crecimiento, lo que deriva en que la capacidad de todas estas conexiones se satura en tiempos diferentes. Entonces, si el proceso de migración se efectúa de manera gradual, para enfrentar la heterogeneidad del comportamiento del tráfico de la red, se aumenta la capacidad de forma individual en

distintos tiempos según lo requiera cada enlace. En cambio, si el proceso de migración es del tipo “*big bang*” la heterogeneidad del tráfico se enfrenta según sea el peor caso, es decir, se trabaja con el valor de carga de tráfico mayor y la tasa de crecimiento mayor que presentan las distintas conexiones de la red DWDM. Cabe mencionar que en este caso el operador cambia completamente la tecnología de la red a causa de que es incompatible con la anterior o en algunos casos porque se ve en la obligación de hacerlo puesto que tiene que realizar un aumento de capacidad general a raíz de un gran contrato con alguna compañía. De esta forma, una migración del tipo “*big bang*” trabaja suponiendo una carga y tasa de crecimiento uniforme.

Es importante señalar que cuando una alternativa de migración contempla cambiar su modo de operación de la capa óptica DWDM, es decir, pasar de una operación estática a una operación dinámica, la estrategia aplicada es del tipo “*big bang*” ya que, son tecnologías totalmente incompatibles [18]. En el caso de que la alternativa de migración conserve el tipo de operación estática, el procedimiento se podría realizar de forma gradual si se quiere migrar hacia redes elásticas ya que, por ejemplo, algunos estudios señalan que al momento de que la capacidad de una red DWDM con grilla fija se encuentre saturada una opción viable es desplegar en paralelo una red cuya arquitectura esté basada en grilla flexible [6]. En otros casos, cuando la implementación de redes elásticas es postergada, el operador puede tomar ventaja de instalaciones más económicas de tecnología DWDM con grilla fija existentes. Esta opción es la preferida si el tráfico sigue los caminos de crecimiento deseado, pero en el caso de que el crecimiento sea más rápido de lo esperado, el operador terminará desperdiciando dinero porque no será capaz de enrutar todo el tráfico, por lo tanto, aparece la opción de implementar grilla flexible en toda la red. Esta opción termina siendo la más rentable (en comparación a seguir utilizando equipamiento DWDM con grilla fija) para un crecimiento de tráfico elevado [10] y a la vez extiende la vida útil económica de la fibra y de los enlaces de la red en 5 años respecto de una red con grilla fija [6].

En la Tabla 2-1 se puede observar la comparación de diversos estudios que tratan el proceso de migración de redes WDM, aplicando una estrategia del tipo gradual o “*big bang*”. Varias son las investigaciones que hablan sobre redes que utilizan la actual grilla fija de la ITU-T (Rec. G.694.1), al contrario de aquellos que indagan sobre la migración hacia redes elásticas, y de ser así ninguno toma en cuenta el costo total de migración (considerando CapEx y OpEx).

Este trabajo se enfoca en una estrategia del tipo “*big bang*” puesto que representa el peor caso, es mucho más riesgosa, y porque al momento de comparar resultados entre los diferentes escenarios de migración resulta más sencillo en contraste de hacerlo con una migración gradual.

La estrategia de migración es un punto importante a la hora de planificar un proceso de migración, pero también lo son: elegir la alternativa de mayor capacidad que se desea implementar, decidir el modo de operación de la capa DWDM y el tipo de grilla. Algunos de estos puntos fueron detallados en el capítulo anterior. A continuación son descritas las alternativas para aumentar la capacidad de la red.

Tabla 2-1 Tabla comparativa sobre trabajos previos analizados

Referencia	Tipo de migración	Operación final	Tipo de grilla	Costos
[19]	Big bang	Estática y dinámica	Fija	No
[20]	Big bang	Dinámica	Fija	CapEx y Opex
[21]	Big bang	Estática y dinámica	Fija	CapEx y Opex
[22]	Gradual	Dinámica	Fija	No
[23]	Gradual	Dinámica	Fija	No
[24]	Big bang	Dinámica	Fija	No
[8]	Gradual	Dinámica	Flexible	No
[25]	No	Dinámica	Flexible	CapEx

2.2 Alternativas de aumento de capacidad

Actualmente, las alternativas más comunes para aumentar la capacidad de las redes ópticas de transporte DWDM son: aumentar la tasa de transmisión digital de las portadoras ópticas ya existentes en la fibra óptica, aumentar el número de portadoras ópticas, es decir, de longitudes de onda en la misma o en otras fibras ópticas conservando la tasa de transmisión digital, y utilizar una combinación de las dos alternativas anteriores.

A continuación se detalla cada una de estas alternativas de aumento de capacidad:

- **Aumentar la tasa de transmisión digital de portadoras ya existentes en la fibra óptica:** esta alternativa es utilizada cuando los operadores de una red DWDM no realizan la transmisión de información a la máxima velocidad disponible comercialmente.

Tecnologías de transmisión utilizada en redes DWDM como SDH y SONET. Éstas, utilizan tasas de bits que convergen en 155 Mbps como también 622 Mbps, 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps o en otros casos, la tecnología OTN alcanza velocidades de transmisión de 100 Gbps. Por ende, si un sistema que está operando a ciertas tasas de transmisión y requiere aumentar su capacidad sólo necesita realizar los cambios necesarios para operar a tasas de transmisión digital mayores, por ejemplo de estar operando a 2.5 Gbps puede pasar a operar a 10 Gbps o a tasas mayores efectuando los ajustes pertinentes.

- **Aumentar el número de portadoras ópticas en la misma o en otras fibras ópticas conservando la tasa de transmisión digital:** como se mencionó anteriormente, la grilla espectral adoptada actualmente por las redes DWDM es la encargada de definir los canales a utilizar en dichas redes. La Recomendación ITU-T G.694.1 la estandariza, en donde establece una serie de rejillas espectrales fijas las cuales dividen el espectro óptico (en torno a los 1550 nm, tercera ventana de operación). Las separaciones van desde los 12.5 GHz hasta los 100 GHz, aunque la más utilizada es la de 50 GHz. Esta separación espectral entre longitudes de onda es la que determina el número máximo de canales DWDM que se utilizan para transmitir la información. El tamaño de la grilla (ΔG en THz) dividido por la separación espectral

entre canales (Δf en THz) da como resultado el máximo de canales. La frecuencia central, es decir, la ubicación de estos diferentes canales en la grilla está especificada en Rec. G.694.1 por la expresión: $193.1 + \Delta f \cdot q$ en THz, donde los 193.1 THz es una frecuencia de referencia entregada por la ITU-T y “q” es un valor entero que puede tomar valores tanto positivos como negativos (también puede ser cero).

El operador de una red puede decidir aumentar el número de canales de un sistema DWDM ya sea en la misma fibra óptica o en otras fibras ópticas. Si el aumento de capacidad se realiza en la misma fibra, aparecen dos opciones:

- i) Conservar la separación espectral entre los canales del sistema DWDM actual (Δf), por lo que introduce nuevos canales en otras frecuencias portadoras.
- ii) Disminuir la separación espectral (Δf) entre los canales de la red DWDM actual, por lo que se introducen nuevos canales entre los canales existentes previamente.

En cambio, si se aumenta la capacidad a través de otras fibras ópticas las opciones son:

- i) Utilizar la fibra óptica oscura que se encuentra disponible en cables ya instalados de la red actual DWDM.
 - ii) Instalar nuevos cables de fibra óptica en el sistema DWDM actual. Esto se lleva a cabo en caso de que el operador no cuente con fibra oscura.
- Utilizar una combinación de las alternativas anteriores: ni el aumento de la tasa de transmisión digital en las portadoras ni el aumento de canales son mutuamente excluyentes, por lo tanto, se pueden utilizar en conjunto.

2.3 Opciones de migración

La selección de una de las diversas alternativas para incrementar la capacidad de la red, el modo de operación de la capa DWDM y el tipo de grilla, especifican una opción de migración. Esta opción se caracteriza por los dispositivos, la capacidad física, y la infraestructura indispensables para realizar el proceso de migración. La Fig. 2-1 muestra las diferentes combinaciones que definen una opción de migración a partir de un escenario inicial, tales opciones son:

- Aumentar tasa de transmisión - operación estática - grilla fija.
- Aumentar tasa de transmisión - operación estática - grilla flexible
- Aumentar tasa de transmisión - operación dinámica - grilla fija.
- Aumentar tasa de transmisión - operación dinámica - grilla flexible.
- Aumentar longitudes de onda - operación estática - grilla fija.
- Aumentar longitudes de onda - operación estática - grilla flexible.
- Aumentar longitudes de onda - operación dinámica - grilla fija.

- Aumentar longitudes de onda - operación dinámica - grilla flexible.
- Combinando alternativas anteriores.

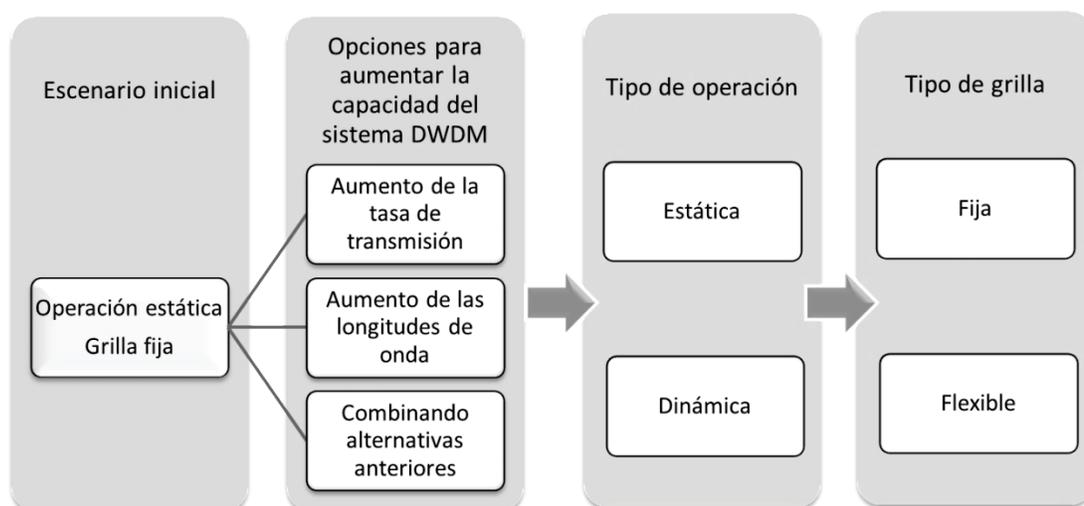


Fig. 2-1 Alternativas para definir una opción de migración

2.4 Modificaciones como consecuencia de un proceso de migración

Dependiendo de la opción de migración seleccionada, la red puede sufrir alteraciones tanto en la estructura genérica de sus nodos (ver Fig. 1-3) como en la estructura genérica de sus enlaces (ver Fig. 1-4). Estas modificaciones se detallan a continuación según cada alternativa de migración.

- **Aumentar tasa de transmisión – operación estática – grilla fija:** los cambios que sufren los nodos de la red se deben a que los componentes que dependen de la tasa de transmisión digital deben ser reemplazados, es decir, transpondedores de transmisión, de recepción, y de regeneración deben ser sustituidos por unos que trabajen a la nueva tasa de transmisión digital escogida. Por otra parte, los multiplexores, demultiplexores, y el dispositivo de conmutación no son necesarios cambiarlos, pues no dependen de la tasa de transmisión.

En cuanto a la estructura genérica del enlace, ésta puede sufrir variaciones que dependerán de la proporción en la que se aumente la tasa de transmisión. Esto, debido a los fenómenos de transmisión que se producen en la fibra óptica, por ejemplo la dispersión cromática, dispersión por modo de polarización y efectos no lineales que limitan el *bit rate* o la distancia de transmisión para una buena calidad de transmisión. Si el sistema (transmisor/receptor) de mayor velocidad de transmisión no cuenta con técnicas que minimicen tales efectos, el operador se verá obligado a instalar módulos compensadores de dispersión (DCM).

- **Aumentar tasa de transmisión – operación dinámica – grilla fija:** los transpondedores de transmisión, de recepción, y de regeneración de un nodo deben ser modificados y cambiados por unos que sean sintonizables. El dispositivo de

conmutación también debe ser sustituido por otro que permita una reconfiguración de forma remota y rápida, y para establecer conexiones y desconexiones se debe adquirir un nuevo plano de gestión y control (M&CS).

Con respecto a la estructura de los enlaces, éstos no experimentan variaciones ya que, los amplificadores ópticos no presentan problemas al amplificar diversos números de conexiones en distintos instantes de tiempo puesto que operan con control de ganancia automática (AGC). Y, dependiendo de la proporción en la que se aumente el *bit rate*, el operador deberá instalar DCM (en caso que la red no cuente con técnicas que atenúen los fenómenos que se producen en la transmisión a través de la fibra óptica).

- **Aumentar tasa de transmisión – operación estática/dinámica – grilla flexible:** cuando la asignación de frecuencias portadoras se realiza de forma flexible, el cambio en la estructura genérica de los nodos de la red (ver Fig. 1-3) es el mismo ya sea para operar de forma estática u operar de manera dinámica. Los nodos deben ser cambiados por otros que posean una estructura elástica, lo que es completamente diferente a la estructura del escenario inicial, la red pasa a ser una red óptica flexible o elástica en donde todo el equipamiento y el plano de control puede manejar canales ópticos de ancho de banda variable y cuyos dispositivos de conmutación soportan diferentes granularidades en el ancho espectral de los canales que transportan información.

- **Aumentar longitudes de onda – operación estática/dinámica – grilla fija:** dependiendo de la forma en la cual se aumente el número de canales ópticos o longitudes de onda en la misma fibra óptica es la modificación a realizar en los nodos.

Si la inserción de longitudes de onda se lleva a cabo conservando la separación espectral entre los canales de la red original DWDM, entonces es necesario agregar transpondedores de transmisión, de recepción, y de regeneración, pero conservando los ya existentes ya que, la ubicación espectral de estas nuevas portadoras es diferente a las de los canales iniciales. En cuanto al conmutador óptico, si el número de puertos de entrada y salida no es suficiente frente al aumento de portadoras (si no posee puertos de holgura) se deberá adquirir uno nuevo para agregar, conservando el ya existente, o en otro caso para reemplazarlo por el original. Lo mismo pasa con los multiplexores y demultiplexores, si el número de canales no es suficiente se deberán adquirir nuevos dispositivos y agregarlos a los ya existentes, o reemplazar con dispositivos nuevos los originales. Por otra parte, los enlaces no sufren modificaciones, porque los amplificadores ópticos no tienen un límite teórico en el número de longitudes de onda que pueden amplificar siempre que la potencia total de entrada esté dentro de su rango de operación.

En el caso de que la inclusión de portadoras se lleve a cabo disminuyendo la separación espectral original entre ellas, para así combinar nuevos y antiguos canales, se deben sustituir todos los transpondedores que no puedan operar con el nuevo ancho de banda asignado en cada canal. Si el nuevo ancho de banda asignado a cada canal es mayor que el de las señales con que trabajan los transpondedores de la red original, se puede mantener estos transpondedores y adicionar sólo aquellos que estén relacionados a las nuevas portadoras. Para el dispositivo de conmutación, al igual que

en el caso anterior, si no posee puertos de holgura será necesario añadir uno nuevo y agregarlo al ya existente o simplemente reemplazar el original por uno nuevo, lo mismo pasa con los multiplexores y demultiplexores.

- **Aumentar longitudes de onda – operación estática/dinámica – grilla flexible:** en este caso las modificaciones que se deben realizar en los nodos son idénticas a las realizadas cuando se aumenta la tasa de transmisión usando grilla flexible, es decir, los nodos genéricos (ver Fig. 1-3) de la red deben ser reemplazados por nodos que posean una estructura flexible.

En la Tabla 2-2 se puede observar a modo de resumen las alteraciones provocadas en los nodos de la red DWDM debido a un proceso de migración.

Tabla 2-2 Modificaciones como consecuencia de un proceso de migración

Opción de Migración	Tipo de Operación	Tipo de Grilla	Cambios en el Nodo
Aumentar tasa de transmisión	Estática	Fija	Transpondedores de transmisión, recepción, y de regeneración
	Dinámica	Fija	Transpondedores de transmisión, recepción, y de regeneración, dispositivo de conmutación y M&CS
	Estática/Dinámica	Flexible	Todos los nodos deben ser modificados por otros que posean estructura flexible
Aumentar longitudes de onda	Estática/Dinámica	Fija	Las modificaciones que sufren los nodos en este caso dependen de la forma en que se aumentan los canales ópticos. Es posible agregar o reemplazar por los originales: transpondedores de transmisión, recepción, y de regeneración, conmutadores ópticos, multiplexores y demultiplexores.
	Estática/Dinámica	Flexible	Todos los nodos deben ser modificados por otros que posean estructura flexible

CAPÍTULO 3

COSTOS DE MIGRACIÓN

Para llevar a cabo la implementación de cualquiera de las opciones de migración descritas en el capítulo anterior se debe incurrir en ciertos gastos. En este capítulo son definidos los costos asociados a un proceso de migración desde un escenario inicial hacia otro escenario final y también son presentadas las expresiones utilizadas para evaluar tales costos.

3.1 Desembolsos como consecuencia de un proceso de migración

El costo asociado a un proceso de migración es llamado “costo total de migración” el cual se compone por la suma de los costos de capital (CapEx) y los costos operacionales (OpEx).

- **Costos de capital (CapEx)**: se refiere a los gastos relacionados con la infraestructura y equipamiento, por ejemplo, costos por los transpondedores, multiplexores, demultiplexores, amplificadores, etc. [26]. Como en este caso se trata de un proceso de migración, puede que parte del equipamiento y la infraestructura original sea reutilizada por la opción de migración escogida. Entonces el CapEx está asociado a la compra, instalación y configuración inicial de dispositivos pertenecientes a nodos, enlaces, y al sistema de gestión y control nuevos, todo aquello que se puede reutilizar no forma parte de este costo, sólo son incluidas las nuevas adquisiciones. Por esta razón estos costos son denominados como CapEx Diferencial o D_CapEx.
- **Costos operacionales (OpEx)**: en estos costos son incluidos, por ejemplo, los costos asociados al mantenimiento de la red (O&M), la energía y la reparación de fallas [26]. Es decir, se refiere a los costos ocasionados por el mantenimiento de la red desde el momento en que se implementa cierta alternativa de migración hasta realizar una nueva actualización de la red. Aquí son considerados los antiguos y los nuevos dispositivos que conforman la red ya que, todos ellos aportan al gasto que significa mantener funcionando esta red.

3.2 CapEx diferencial

Como se mencionó anteriormente, corresponde al costo de adquisición, instalación y configuración de cualquier equipamiento nuevo que sea necesario para migrar desde un escenario inicial A hacia un escenario final B, el cual dependerá de la alternativa de migración seleccionada. Para calcular los costos de capital diferencial se debe considerar el costo de ingeniería (diseño), el número de equipamiento o mobiliario a adquirir con su respectivo precio, la instalación y configuración de éstos en caso de ser necesario, por lo que también se debe contar con cierto número de técnicos que realicen tal función. Al

momento de contratar tales técnicos se debe de tener en cuenta los gastos producidos por su traslado, alojamiento, y obviamente su salario. También, si el proceso de migración así lo requiere, será necesario un espacio más amplio para instalar nuevos equipos lo que se traduce en mayores gastos.

Por otra parte, no hay que olvidar los costos relacionados con la fibra óptica, aunque en este caso no afectan el estudio ya que, la fibra óptica es re-utilizada, pero es importante tener en consideración el gran ahorro que se produce al lograr aumentar la vida útil de ésta.

Por lo tanto, D_CapEx es la suma de los costos de capital que generan los nodos, los enlaces, y el sistema de gestión y control de la red, esto se puede apreciar en la ecuación (3-1).

$$D_CapEx(t_i)_{A,B} = \sum_{n=1}^{N^{\circ} \text{ nodos}} D_CapEx(t_i)_{A,B}^{nodo} + \sum_{e=1}^{N^{\circ} \text{ enlaces}} D_CapEx(t_i)_{A,B}^{enlace} + D_CapEx(t_i)_{A,B}^{Sist.gestión y control} \quad (3-1)$$

Donde t_i corresponde al período de inversión i debido a la migración desde el escenario A hacia un escenario B .

3.3 OpEx

Como se mencionó, este valor corresponde a los costos incurridos por mantener la red funcionando. Al igual que D_CapEx , es la suma de los costos operacionales que generan tanto los nodos, enlaces, y el sistema de gestión y control de la red desde el momento en que se implementa cierta opción de migración hasta realizar un nuevo proceso de migración. Esto se puede apreciar en la ecuación (3-2).

$$OpEx(T_j)_B = \sum_{n=1}^{N^{\circ} \text{ nodos}} OpEx(T_j)_B^{nodo} + \sum_{e=1}^{N^{\circ} \text{ enlaces}} OpEx(T_j)_B^{enlace} + OpEx(T_j)_B^{Sist.gestión y control} \quad (3-2)$$

En donde T_j corresponde al j -ésimo período de operación del escenario B .

Aquí deben ser considerados los costos producidos por el clima y la energía consumida de los dispositivos que se encuentran operativos, la mantención de dispositivos, reparación de fallas (según el número de dispositivos defectuosos), así como también el costo de arriendo de componentes e infraestructura cuando el operador de la red opte por no comprar.

Para calcular el costo por energía consumida del dispositivo del tipo “ k ” en la parte “ h ” de la red (nodo, enlace, o M&CS), es considerada la siguiente ecuación:

$$C_{energía}(T_j)_B^h = |T_j| \cdot v_{energía}(T_j) \cdot \sum_{\forall k} \{|k|(T_j)_B^h \cdot p[K]\} \quad (3-3)$$

Donde:

- k corresponde al tipo de componente de la red.
- T_j es el j-ésimo período de operación.
- $|T_j|$ es la magnitud del período medido en horas.
- $v_{energía}(T_j)$ es el valor de la energía en el período T_j medido en [USD/kW·h].
- $|k|(T_j)_B^h$ corresponde al número de dispositivos del tipo k en la parte h de la red de la alternativa de migración B que operan durante el período T_j .
- $p[k]$ es la potencia consumida por el dispositivo del tipo k , expresada en [kW].

Para calcular el costo por reparación de fallas, es considerado lo siguiente:

$$C_{Rep. fallas} = N_{fallas}(|k|(T_j)_B^h) \cdot \left(C_{tras}(|k|(T_j)_B^h) + C_{aloj}(|k|(T_j)_B^h) + C_{alim}(|k|(T_j)_B^h) + C_{comp}(|k|(T_j)_B^h) \right) \quad (3-4)$$

Donde:

- $N_{fallas}(|k|(T_j)_B^h)$ es el número de fallas acumuladas durante el periodo T_j de los componentes del tipo k en la parte h de la red.
- $C_{tras}(|k|(T_j)_B^h)$ es el costo promedio que implica trasladarse hasta el punto en donde se encuentra la falla (ida y vuelta) para reparar un dispositivo del tipo k que se encuentra en la parte h de la red.
- $C_{aloj}(|k|(T_j)_B^h)$ es el costo promedio de alojamiento de los trabajadores que se trasladan para reparar alguna falla a la parte h de la red.
- $C_{alim}(|k|(T_j)_B^h)$ es el costo promedio de alimentación de los trabajadores que se trasladan a reparar alguna falla a la parte h de la red.
- $C_{comp}(|k|(T_j)_B^h)$ es el costo al inicio del período T_j de un dispositivo de tipo k necesario como repuesto para la parte h de la red.

Para estimar el número de fallas acumuladas en el período T_j de los componentes del tipo k de la parte h de la red se utiliza la siguiente ecuación:

$$N_{fallas}(|k|(T_j)_B^h) = |k|(T_j)_B^h \cdot |T_j| \cdot FIT[K] \cdot \frac{1}{10^9} \quad (3-5)$$

En donde $FIT[k]$ (*Failure in Time*) corresponde al número promedio de fallas de un dispositivo de tipo k durante 10^9 horas de operación.

Por último, el valor de mantención es obtenido a través de la siguiente expresión:

$$C_{mant}(T_j)_B^h = N_{trab}(T_j)_B^h \cdot S_{trab}(T_j)_B^h \quad (3-6)$$

Donde:

- $N_{trab}(T_j)_B^h$ es el número de trabajadores necesarios para realizar la mantención de dispositivos de la parte h de la red de la alternativa de migración B , que se encuentra operando durante el período T_j .

Las labores de operación y mantención son: monitorear la red (sus componentes) y sus servicios, administrar componentes y reemplazarlos en caso que sea necesario (sea por labores de mantención preventiva o en caso de falla si son dispositivos de los nodos o EDFAs), administrar aplicaciones de *software* y actualizarlas cuando sea requerido, y administrar la seguridad de los elementos de la red (personas que ingresan a la red o intrusos a través del *software*) [27].

- $S_{trab}(T_j)_B^h$ es el salario total acumulado durante el período T_j del encargado de realizar labores de mantención de los dispositivos h en el escenario de migración B .

3.4 Costo total de migración

La metodología propuesta en este trabajo es capaz de evaluar el costo económico total ($CM(T)_{A,B}$) de las diversas alternativas de migración, suponiendo un escenario inicial A y un escenario de migración final B .

El costo asociado a un proceso de migración está conformado por los costos de capital diferencial y por los costos de operación.

Por lo tanto, el costo total de migrar desde un escenario inicial A hacia un escenario B y mantener operando la red en el escenario B durante un período “ T ” se expresa de la siguiente forma:

$$CM(T)_{A,B} = D_CapEx_{A,B} + OpEx(T)_B \quad (3-7)$$

En la Fig. 3-1 es posible apreciar la evolución temporal de los costos de capital diferencial y los costos operacionales al realizar un proceso de migración del tipo “*big bang*”, abarcando el período de operación de la red actualizada. El comportamiento de estos costos dependerá del tipo de operación de la red DWDM. En esta figura se observa que el período de operación de la red parte inmediatamente al momento de implementar la alternativa de migración elegida (t_0) y culmina cuando es requerido un nuevo proceso de migración (t_{max}), los tiempos intermedios, dependiendo de la definición del operador de la red, pueden ser semanas, meses, años u otras unidades temporales.

La Fig. 3-1 también muestra de forma genérica la evolución a través del tiempo de la carga de tráfico de los enlaces ópticos, es decir, el valor del nivel de utilización de éstos. Cuando se implementa la alternativa de migración seleccionada (en t_0) la carga de tráfico es ρ_0 . Posteriormente, a medida que transcurre el tiempo, la carga de tráfico va aumentando hasta alcanzar cierto punto (correspondiente a ρ_{max}) en donde la capacidad de la red se encuentra saturada y necesita de un nuevo proceso de migración, este valor es definido por el operador de la red.

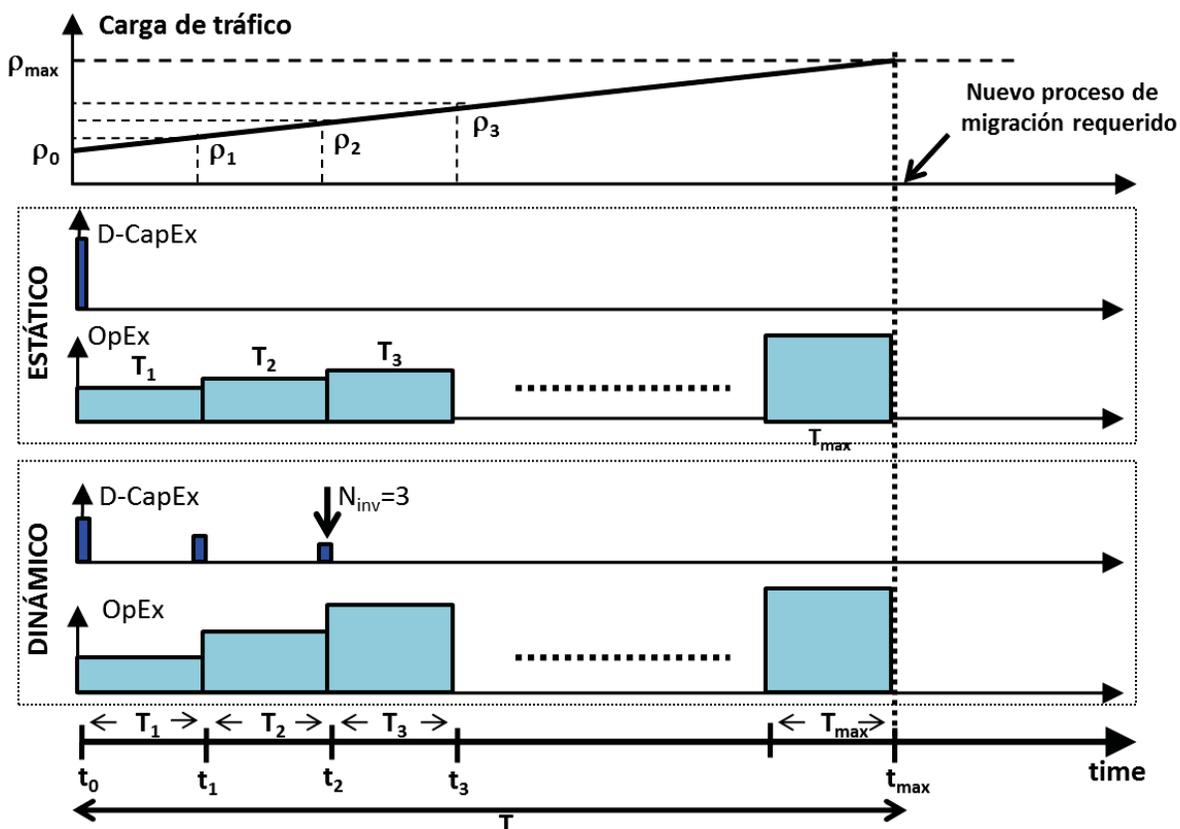


Fig. 3-1 Evolución temporal de la carga de tráfico, D_CapEx y OpEx

Finalmente, podemos observar de la Fig. 3-1, la evolución temporal de D_CapEx y OpEx según el modo de operación de la red. Cuando la red opera de forma estática, todos los nuevos equipos requeridos para llevar a cabo el proceso de migración deben ser instalados en el momento t_0 ya que, se deben asignar los caminos ópticos permanentes antes de poner en funcionamiento la red. Por lo tanto, la evolución temporal de D_CapEx presenta un solo aumento correspondiente al instante t_0 , los demás instantes son igual a cero, porque no es necesario realizar nuevas adquisiciones en dispositivos. En el caso del OpEx, estos costos van aumentando a medida que pasa el tiempo debido al aumento de las variables que influyen en él, por ejemplo, energía, salarios, etc. Por otra parte, cuando la red opera de forma dinámica la instalación de dispositivos se realiza a medida de que

va aumentando la carga de tráfico, es decir, durante el instante t_0 es posible instalar sólo el equipo necesario para operar la red durante un primer período de tiempo y luego, según los requerimientos de red, se instalan los restantes. A raíz de esto, la evolución temporal de D_CapEx, en una red dinámica, presenta varias inversiones (N_{inv} en la Fig. 3-1) a lo largo del período de operación, y en este caso, la disminución de este valor a lo largo del tiempo se debe a que se van requiriendo menos dispositivos y el valor de éstos también disminuye. Para el caso del OpEx, sucede lo mismo que en una red estática, sus valores aumentan período a período, y esto porque aumenta el número de dispositivos a instalar, la energía, salarios, etc.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA

En este capítulo se presenta una metodología de evaluación tecno-económica paso a paso que permite elegir cuál alternativa de migración es más conveniente a la hora de realizar un proceso de migración cuando las redes DWDM logren un nivel de saturación en sus conexiones. Cabe mencionar que dentro de las alternativas de migración se encuentra la novedosa idea reemplazar la actual grilla fija (Rec. G.694.1) por una grilla flexible.

4.1 Metodología paso a paso de evaluación de alternativas

Para que un operador logre determinar qué alternativa de migración es más conveniente, es decir, cuál es la alternativa que presenta un menor costo económico ($CM(T)_{A,B}$) frente a un aumento equivalente en su capacidad, se propone una metodología lo bastante genérica que permitirá al operador de la red tomar tal decisión. En la Fig. 4-1 se pueden observar los 7 pasos a seguir de la presente metodología planteada, éstos son detallados a continuación:

4.1.1 Paso 1

El primer paso consiste en determinar el escenario inicial A y los diversos escenarios de migración B . Para estos escenarios se debe especificar la arquitectura y los componentes usados y a utilizar (del escenario A y B respectivamente) de nodos, enlaces, y del sistema de gestión y control.

4.1.2 Paso 2

Aquí se debe determinar el valor de la tasa de crecimiento de tráfico anual, denotado como “ r ”, así como también la carga de tráfico inicial y la carga de tráfico máxima permitida, ρ_0 y $\rho_{m\acute{a}x}$ respectivamente. Estos valores son de gran importancia para estimar el tiempo en que un escenario de migración se encontrará operativo antes de requerir una nueva actualización y aumento de capacidad de la red. La tasa de crecimiento de tráfico anual se puede estimar considerando el comportamiento del tráfico en los períodos inmediatamente anteriores a la migración. En cuanto a la carga de tráfico inicial ρ_0 , es decir, la carga de tráfico inmediatamente después de la migración, se puede conseguir mediante la división entre el valor de la carga de tráfico antes del aumento de capacidad (escenario A) y el número de veces en que la capacidad de la nueva red aumentó (escenario B). Por último, la carga de tráfico máxima permitida $\rho_{m\acute{a}x}$, como su nombre lo indica, es el tráfico máximo que una red puede soportar en el escenario de migración B , este valor lo define el propio operador de la red según sea su criterio.

Cuando se alcanza $\rho_{m\acute{a}x}$ es necesario realizar un nuevo proceso de migraci3n para as3 nuevamente aumentar la capacidad de la red DWDM.

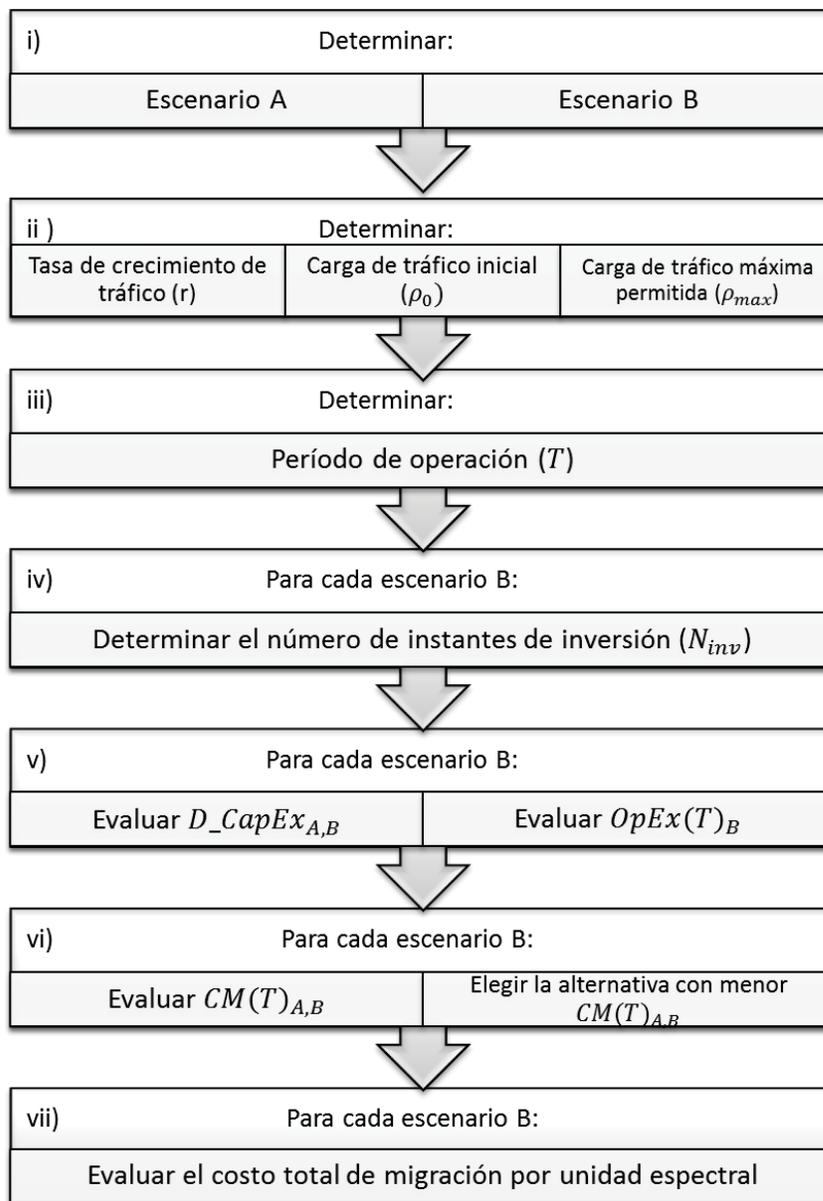


Fig. 4-1 Metodología de evaluación tecno-económica

4.1.3 Paso 3

Este paso, consta en determinar el período de operación de la red, es decir, indicar en cuánto tiempo será necesario realizar un nuevo aumento de capacidad. El tiempo de operación está denotado como T y hace referencia al tiempo que transcurre desde que la

red tiene una carga de tráfico inicial ρ_0 hasta que alcanza el valor de carga de tráfico máximo permitido $\rho_{m\acute{a}x}$. Este período T se puede calcular a partir de la ecuación que indica el valor del nivel de utilización de una conexión (suponiendo un crecimiento exponencial en el tráfico de datos y para un año determinado), la cual es la siguiente:

$$\rho_i = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{r}{100}\right)^i \quad (4-1)$$

Donde ρ_i es la carga de tráfico al final del i -ésimo año, ρ_0 es la carga de tráfico inicial y r es la tasa de crecimiento de tráfico anual en [%/año].

Despejando i es posible obtener el período de operación, por lo tanto T está dado por:

$$T = \left\lceil \frac{\log \rho_{m\acute{a}x} - \log \rho_0}{\log \left(1 + \frac{r}{100}\right)} \right\rceil \quad (4-2)$$

4.1.4 Paso 4

Posteriormente, para cada escenario de migración B se procede a determinar el número de veces en que el operador de la red DWDM debe incurrir en un nuevo costo de capital diferencial, es decir, se debe de determinar el número de instantes de inversión denotado como N_{inv} .

En este paso son introducidos nuevos términos que están asociados con la planificación de redes o *Network Planning*. Esto está dirigido a todas las actividades relacionadas con la definición de la evolución de la red con el fin de permitir el transporte de una cantidad esperada de demanda de tráfico teniendo en cuenta ciertos requisitos y limitaciones [28], en otras palabras, la planificación de redes tiene que ver con la extensión de la red, la manera en que se va aumentando su capacidad la cual se puede llevar a cabo de dos formas:

- *Single-Period Planning*: determina la cantidad de recursos que serán necesarios en la red durante todo el período de operación T . Todos estos dispositivos son instalados al momento de realizar el proceso de migración, es decir, el operador de la red incurre en sólo un instante de inversión, por lo tanto $N_{inv} = 1$.

Cabe mencionar que si la alternativa de migración del escenario B conserva la operación estática necesariamente se tratará de *Single-Period Planning* ya que, todos los dispositivos nuevos necesarios para realizar la migración deben ser instalados al momento de implementar la alternativa seleccionada puesto que se deben asignar los caminos ópticos permanentes.

- *Multi-Period Planning*: en este caso la extensión de la red se puede realizar gradualmente en diferentes instantes de tiempo a lo largo del período de operación T , la capacidad de nodos y enlaces de la red va mejorando de acuerdo a las necesidades del sistema y de la forma en que sea demandado. En este caso N_{inv} es distinto y

mayor a 1, porque en este caso al momento de implementar una alternativa de migración es posible instalar sólo el equipo necesario para operar la red durante el primer período de tiempo y luego de acuerdo a la tasa de crecimiento de tráfico se van adquiriendo e instalando los dispositivos restantes en próximos períodos de tiempo. Por lo tanto, el número de instantes de inversión es función de la carga de tráfico inicial, de la tasa de crecimiento y de la carga de tráfico a la cual los requerimientos de capacidad de la red DWDM dinámica serían iguales a los requerimientos de una red con operación estática (ρ_{th}). El valor de ρ_{th} se obtiene de la curva de requerimientos del número de longitudes de onda de la red vs carga de tráfico [29] y corresponde a la carga de tráfico donde los requerimientos de longitudes de onda de redes DWDM dinámicas alcanzan los requerimientos de las redes DWDM bajo operación estática. De esta forma N_{inv} puede ser obtenido, al igual que T , despejando i (variable que indica el número de períodos para alcanzar ρ_{th} desde ρ_0) de la ecuación (4-1).

Por lo tanto:

$$N_{inv} = |i| = \left| \frac{\log \rho_{th} - \log \rho_0}{\log \left(1 + \frac{r}{100}\right)} \right| \quad (4-3)$$

Las variables que son determinadas a partir del paso 2 hasta este punto pueden ser observadas en la Fig. 3-1.

4.1.5 Paso 5

Consiste en que, para cada alternativa de migración del escenario B, primero se debe evaluar $D_CapEx_{A,B}$ (Ecuación 3-1) para cada instante de inversión. El costo de capital diferencial debe considerar la contribución al costo total por parte de nuevos elementos, ya sea en nodos, enlaces, o en el sistema de gestión y control requeridos por el escenario final.

Luego debe ser evaluado el costo operacional $OpEx_B$ (Ecuación 3-2), en donde son considerados los gastos de energía, reparación de fallas, mantención y arriendo de componentes (en caso de ser necesario), capacitaciones, tanto en nodos, enlaces y en el sistema de gestión y control de la red.

4.1.6 Paso 6

Para cada alternativa de migración B :

Primero debe ser evaluado el costo total de migración $CM(T)_{A,B}$ (Ecuación 3-7) y luego se debe seleccionar la alternativa que presente el menor valor.

4.1.7 Paso 7

Finalmente, para cada escenario de migración B se debe evaluar el costo total por unidad espectral.

Cabe mencionar que al proporcionar el mismo rendimiento de la red y requerir el mismo número de componentes, los escenarios con grilla fija y flexible pueden utilizar una cantidad muy diferente de espectro óptico. Entonces, tomando en cuenta este aspecto, se utiliza el costo por unidad espectral, evaluado como:

$$C_{psu} = \frac{MC}{BW} \quad (4-4)$$

Donde BW es la banda ancha total, medida en GHz, usada por cada escenario de migración B . En el caso estático BW es medido por la suma del ancho espectral de los FSUs/longitudes de onda usados para acomodar la demanda. En el caso dinámico, es la suma del ancho espectral de FSUs/longitudes de onda requeridas para alcanzar cierto valor de probabilidad de bloqueo.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROPUESTA

En el presente capítulo se muestra paso a paso la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior que permite evaluar tecno-económicamente un proceso de migración. En este caso se contempla un proceso de migración desde una red DWDM operando de manera estática con grilla fija hacia tres posibles escenarios de migración finales con mayor capacidad: la primera opción es mantener la operación estática y la grilla fija, una segunda opción es migrar hacia una red dinámica manteniendo la grilla fija, y por último se considera migrar hacia una red elástica.

5.1 Topología de red

Para la aplicación de la metodología, es considerada la topología física de la red norteamericana NSFNet con distancias escaladas por un factor de 0.4. Esta topología está compuesta por 14 nodos que están interconectados por 21 cables [17] con 2 fibras activas cada uno, es decir, cuenta con 42 fibras activas. Esta red puede ser observada en la Fig. 5-1.

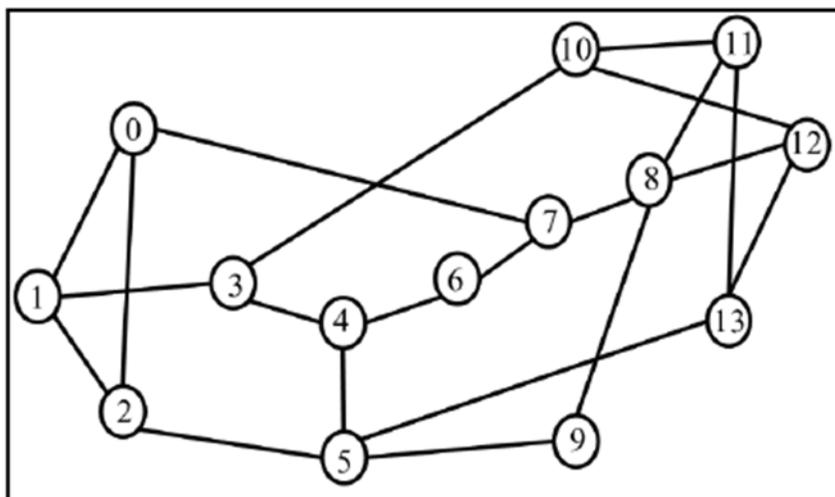


Fig. 5-1 Topología NSFNet

5.2 Paso 1: Definición escenario inicial A y escenarios de migración B_i

Escenario inicial A : el escenario inicial utilizado en este ejemplo tiene las siguientes características:

- Opera de manera estática, por lo tanto, cada conexión es permanente y no cambia en el transcurso del tiempo.

- Se establece una conexión entre cada par de nodos de la red a través de caminos ópticos.
- La tasa de transmisión digital para cada una de las conexiones ópticas es de 10 Gbps.
- La separación espectral entre portadoras está regida por la actual grilla fija DWDM (Rec. G.694.1).
- Presenta una carga homogénea, es decir, las diferentes conexiones ofrecen la misma carga de tráfico de la red.
- El estado de saturación de la red dependerá del criterio de cada operador. En este ejemplo se supone que la red alcanza su estado de saturación cuando la carga de tráfico se encuentra sobre el 90%.
- El operador de la red DWDM es el dueño de la infraestructura de ésta, es decir, del espacio físico utilizado por nodos, enlaces, y por M&CS.
- En el sistema de gestión de la red trabajan jornada completa 14 ingenieros, es decir, 1 en cada nodo de la red (ver Fig. 5-1).

La arquitectura de cada nodo de la red se puede observar en la Fig. 5-2.

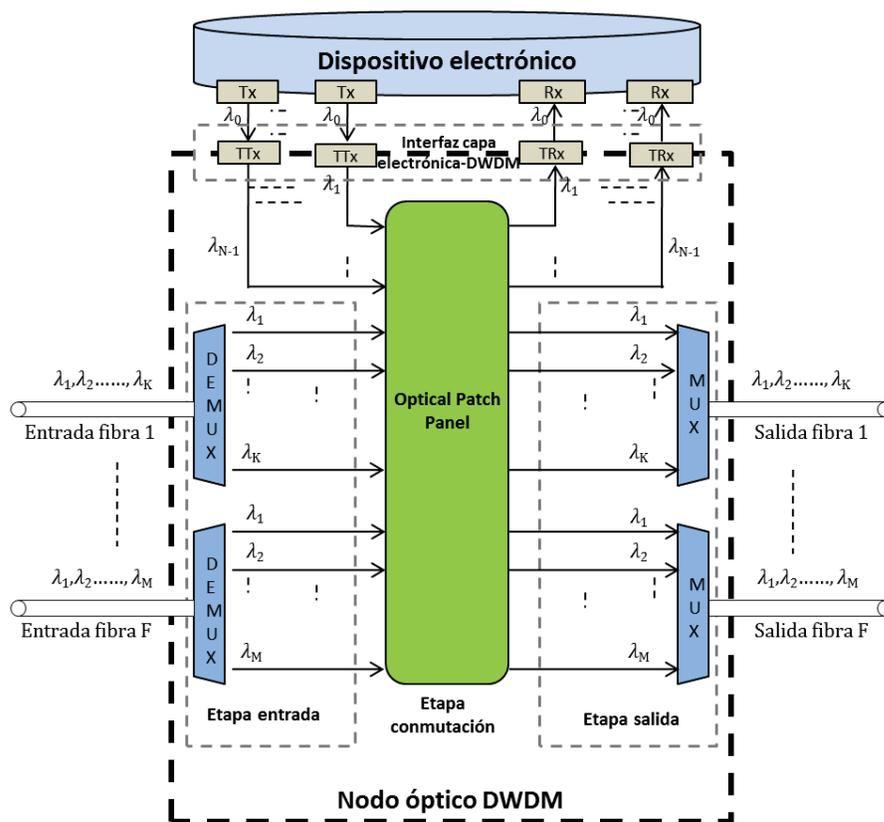


Fig. 5-2 Esquema de nodo para escenario inicial A

Las etapas funcionan de la misma forma como fue descrito en el capítulo 1, pero la diferencia con el nodo genérico presentado en dicho capítulo (ver Fig. 1-3) es que los transpondedores de regeneración en las etapas de entrada y salida no son necesarios al ser una red NSFNet escalada, es decir, las distancias entre enlaces utilizadas en este ejemplo equivalen al 40% de las distancias reales de dicha red.

Los requerimientos de dispositivos de todos los nodos de la red en el escenario inicial A para la red NSFNet se puede observar en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Requerimiento de dispositivos para escenario A

Etapas del nodo	Nombre del dispositivo	Nº de dispositivos en la red
Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (10 Gbps)	$N \cdot (N-1) = 182$
	Transpondedor de recepción fijo (10 Gbps)	$N \cdot (N-1) = 182$
Entrada	Demultiplexor	42 (1 por cada fibra que incide en el nodo)
Conmutación	Dispositivo de conmutación	$N = 14$
Salida	Multiplexor	42 (1 por cada fibra que sale del nodo)

El número de dispositivos en la etapa de interfaz de la capa electrónica-DWDM se debe a la suposición de que existe una conexión entre cada par de nodos de la red a través de un camino óptico o *lightpath*, o sea, $N-1$ transpondedores (N corresponde al número de nodos de la red). Por lo tanto, se tienen 13 transpondedores de transmisión y 13 transpondedores de recepción en cada uno de los nodos de la red.

En tanto para la etapa de entrada y salida, el número de demultiplexores y multiplexores respectivamente, está determinado y es igual al número de fibras que llegan o salen del nodo. Por último, cada nodo está compuesto por un conmutador óptico pasivo (*Optical Patch Panel*).

En cuanto a las características de los enlaces del escenario inicial A, se tiene:

- En el inicio de cada enlace se instala un *booster* (físicamente instalado en los nodos a continuación de la etapa de salida).
- Un EDFA se instala cada 80 km por cada fibra óptica activa del cable. Estos son instalados en cámaras o contenedores intermedios. Cada uno de estos dispositivos cuenta con un sistema de control de ganancia (AGC) el cual mantiene constante la ganancia ante variaciones de potencia de entrada.
- Al final de cada enlace se instala un pre-amplificador (físicamente instalado en los nodos antes de la etapa de entrada).

Escenario de migración B_1 : corresponde a la primera alternativa de migración. Este escenario presenta las mismas características que el escenario inicial A, es decir, mantiene la operación estática y la grilla fija, salvo que la velocidad de transmisión de las portadoras ópticas aumenta de 10 a 100 Gbps.

En este caso, sólo los dispositivos dependientes de la tasa de transmisión digital deben ser reemplazados, por ende los transpondedores de transmisión y recepción que operan a 10 Gbps se deben cambiar por unos nuevos que operen a 100 Gbps. Y en cuanto a los multiplexores, demultiplexores, y dispositivos de conmutación se conservan, pues el *bit rate* no influye en su funcionamiento. Con respecto a la configuración de los enlaces, éstos no sufren mayores cambios pues se supone que la red cuenta con técnicas que minimizan los efectos producidos por la transmisión a través de la fibra óptica.

Los dispositivos que se deben adquirir para realizar la migración desde el escenario A hacia el escenario B_1 se pueden observar en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Requerimiento de dispositivos para escenario B1

Etapas del nodo	Nombre del dispositivo	Nº de dispositivos en la red
Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	$N \cdot (N-1) = 182$
	Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	$N \cdot (N-1) = 182$
Entrada	Demultiplexor	0
Conmutación	Dispositivo de conmutación	0
Salida	Multiplexor	0

Escenario de migración B_2 : el segundo escenario de migración que es considerado en este ejemplo tiene las siguientes características:

- La red opera de forma dinámica, es decir, las conexiones se establecen y se liberan bajo demanda.
- Cada una de las conexiones ópticas de la red aumenta su *bit rate* de 10 a 100 Gbps, es decir, aumenta 10 veces la capacidad del sistema.
- La asignación de espectro óptico se basa en la grilla fija DWDM (Rec. G.694.1).
- Al igual que el caso estático, el número de conexiones posibles entre cada par de nodos se supone igual a 1. Debido a la naturaleza dinámica del establecimiento y liberación de conexiones, el número máximo de conexiones activas en un instante particular en este escenario de migración se encuentra en el rango de $[0; N \cdot (N-1)]$.
- Al igual que escenarios anteriores, se supone una carga homogénea.
- Se utilizan las mismas instalaciones físicas del escenario inicial A, recordando que el operador es su dueño.
- Para establecer conexiones y respectivas desconexiones, se agrega un plano de control que atienda la naturaleza dinámica de la red NSFNet. A raíz de esto el número de trabajadores de planta disminuye a 9 ingenieros de jornada completa (la red NSFNet es dividida en tres zonas y cada zona está a cargo de 3 ingenieros).
- La estructura de enlaces del escenario A se conserva.

La arquitectura de cada nodo de la red dinámica del escenario B_2 se basa en el esquema presentado en la Fig. 5-3, las etapas correspondientes al nodo se describen a continuación:

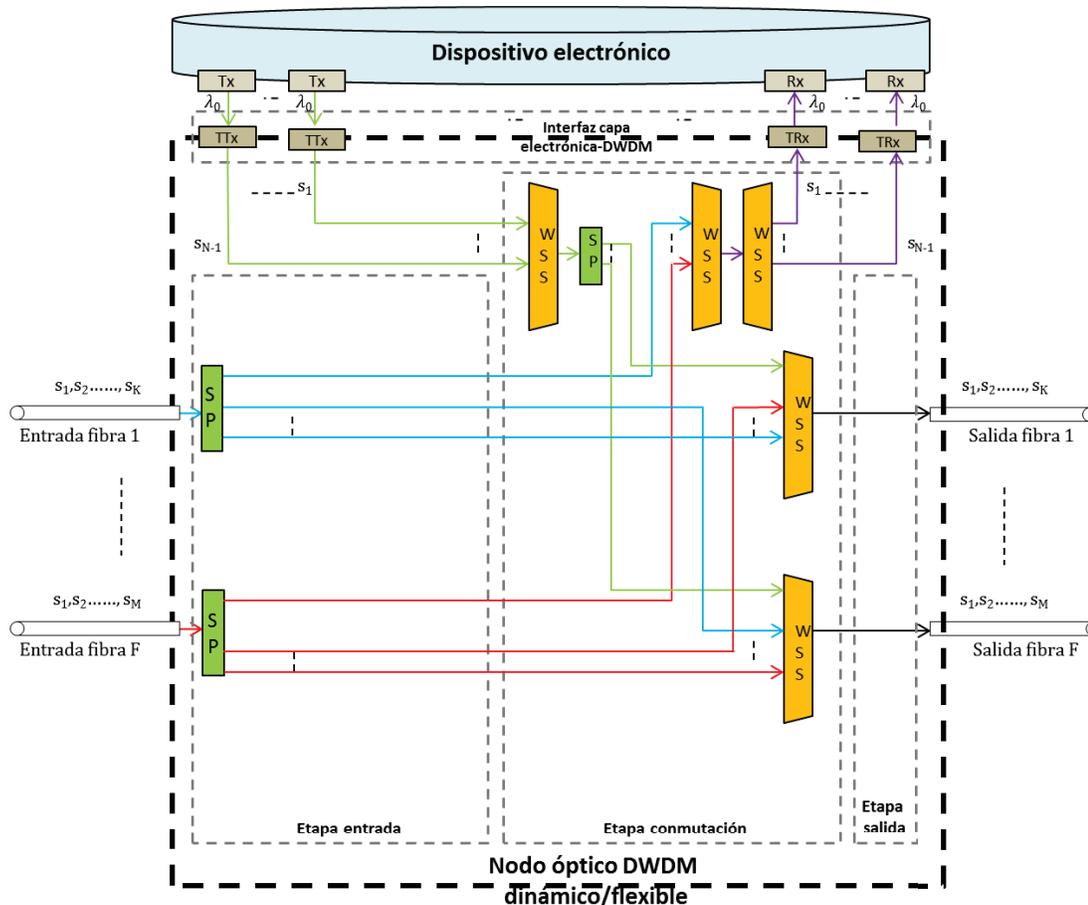


Fig. 5-3 Esquema de nodo para escenarios B2 y B3

- Etapa de interfaz capa electrónica-DWDM: esta etapa se compone de transpondedores sintonizables (TTx en la Fig. 5-3) ubicados al lado izquierdo de esta etapa y por transpondedores de recepción fijos ubicados al lado derecho. Todos estos transpondedores funcionan de la misma forma que los transpondedores correspondientes a esta misma etapa del nodo de los escenarios A y B_1 y operan a una velocidad de transmisión de 100 Gbps. El número de dispositivos en cada nodo dependerá de la carga de tráfico y de la probabilidad de bloqueo aceptable por las conexiones de la red.
- Etapa de entrada: está compuesta por *splitters* ópticos (SP en la Fig. 5-3). Estos dispositivos permiten dividir la señal de entrada en diversas ramas de salidas las cuales poseen esta misma señal (de entrada) y luego las envía a sus destinos correspondientes. El número de dispositivos requeridos en esta etapa dependerá del

número de fibras incidentes al nodo, es decir, para toda la red se necesitarán 42 *splitters*.

- Etapa de conmutación: esta etapa se compone por un *Optical Cross Connect* (OXC) basado en WSS (*Wavelength Selective Switch*) no flexible. Estos dispositivos son interruptores que proporcionan un espectro de transmisión continuamente sintonizable y variable, cada lado de salida de estos WSS transmite selectivamente los flujos ópticos [29]. Estos son los encargados de conectar los flujos ópticos provenientes de la etapa de entrada a sus respectivos destinos. Si algún flujo óptico que viene de la etapa de entrada se dirige a la capa electrónica, ingresa a un WSS donde son multiplexados los diversos flujos de tráfico provenientes de distintas fibras ópticas, luego estos flujos son demultiplexados en sus diferentes espectros ópticos para luego ingresar a la etapa de interfaz capa electrónica-DWDM, en cambio si el flujo va destinado a otro nodo de la red, éste ingresa a un WSS para luego pasar a la etapa de salida. En último caso, espectros ópticos provenientes de la capa electrónica, es decir, ingresarán a un WSS donde serán multiplexados para luego ingresar a un *splitter* el cual replicará estos flujos y los enviará a los WSS para pasar a la etapa de salida y luego enviar la señal por su ruta correspondiente.

Se requiere de 1 WSS no flexible por cada fibra óptica activa (42), a esto se suman 3 WSS en cada nodo para conectar con la etapa de interfaz capa electrónica-DWDM ($3 \cdot N = 42$), por lo tanto, el número total de dispositivos requeridos en la etapa de conmutación es de 84 WSS no flexibles.

- Etapa de salida: la etapa de salida de este nodo no posee dispositivos, aquí las señales de salida se envían a través de la fibra óptica o enlace correspondiente.

A continuación en la Tabla 5-3 se puede observar los requerimientos de dispositivos para todos los nodos que forman parte del escenario de migración B_2 .

Tabla 5-3 Requerimiento de dispositivos escenario B2

Etapas del nodo	Nombre del dispositivo	Nº de dispositivos de la red
Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (100 Gbps)	Depende de la carga de tráfico
	Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	Depende de la carga de tráfico
Entrada	Splitter óptico	42
Conmutación	WSS no flexible	84
	Splitter óptico	14

En cuanto al número de dispositivos requeridos en la etapa de interfaz de la capa electrónica-DWDM, estos se pueden obtener a partir de la Tabla 5-4, esta tabla indica el número de transpondedores de transmisión y recepción ($TX(\rho)$ y $RX(\rho)$ respectivamente) necesarios para distintas cargas de tráfico y con una probabilidad de bloqueo para cada conexión de 10^{-3} (criterio de calidad de servicio que es considerado aceptable, aunque

puede ser bastante mayor), estos valores se obtuvieron a través del método de dimensionamiento propuesto en [31].

Tabla 5-4 Requerimiento total de transpondedores [21]

	Carga de tráfico (ρ)				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5-0,9
$TX(\rho) = RX(\rho)$	98	126	154	168	182

Escenario de migración B_3 : el tercer y último escenario de migración considerado posee las siguientes características:

- Opera de manera dinámica, al igual que el escenario de migración B_2 , es decir, las conexiones se establecen durante el tiempo necesario para transmitir la información, finalizando el envío de datos las conexiones se desconectan liberando los recursos de red utilizados.
- Al igual que el escenario B_2 , el número de conexiones posibles entre cada par de nodos se supone igual a 1 y el número máximo de conexiones activas se encuentra en el rango $[0; N \cdot (N-1)]$.
- La asignación de espectro óptico se realiza según sea la demanda de tráfico, la velocidad de transmisión requerida, la distancia que se desea abarcar, etc. En este escenario la grilla fija es reemplazada por una nueva grilla flexible.
- La tasa de transmisión digital para cada una de las conexiones ópticas es de hasta 100 Gbps. El sistema al operar con grilla flexible, puede ofrecer distintas tasas de transmisión para las diferentes conexiones ópticas, es decir, puede ser de 10, 40, ó hasta 100 Gbps, dependiendo de los requerimientos de cada una de ellas.
- Se supone carga homogénea, al igual que los casos anteriores.
- Las instalaciones tales como edificios o estaciones correspondientes al escenario A son propiedad del operador de la red y en este escenario son re-utilizadas.
- Al ser una red flexible y que opera de forma dinámica, para el establecimiento y desconexiones de sus conexiones se agrega un nuevo plano de control. Por ende, el número de ingenieros que trabajan jornada completa, al igual que el escenario anterior, disminuye a 9.
- Los enlaces conservan la misma estructura que el escenario inicial A .

La arquitectura de cada nodo de la red flexible es igual a la arquitectura del nodo del escenario de migración B_2 (ver Fig. 5-3), salvo que en lugar de WSS no flexibles se utilizan WSS que sí lo sean. A continuación en la Tabla 5-5 se pueden observar los requerimientos de dispositivos para todos los nodos que forman parte del escenario B_3 .

Definido el escenario inicial A y los posibles escenarios de migración B_1 , B_2 , y B_3 , se da por finalizado el primer paso de la metodología.

Tabla 5-5 Requerimiento de dispositivos para escenario B3

Etapas del nodo	Nombre del dispositivo	N° de dispositivos de la red
Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (hasta 100 Gbps)	Depende de la carga de tráfico
	Transpondedor de recepción sintonizable (hasta 100 Gbps)	Depende de la carga de tráfico
Entrada	Splitter óptico	42
Conmutación	WSS flexible	84
	Splitter óptico	N=14

5.3 Paso 2: Definición tasa de crecimiento de tráfico, carga de tráfico inicial y carga de tráfico máxima permitida

Tasa de crecimiento de tráfico (r): los estudios indican un crecimiento exponencial en tasas que van del 30% al 60% anual [1]. Por lo tanto, en este ejemplo se considera una tasa de crecimiento de $r = 40\%$, la cual se encuentra dentro de los rangos descritos.

Carga de tráfico inicial (ρ_0): la carga de tráfico inicial se obtiene a partir de la división entre la carga de tráfico inmediatamente anterior al proceso de migración y el número de veces en que se aumenta la capacidad de la red. La carga de tráfico anterior a la actualización de la red DWDM es fijada según los criterios del operador en la red. En esta evaluación la carga de tráfico inmediatamente antes del proceso de migración es considerada igual a 1. Por otra parte, el escenario A se encuentra operando a 10 Gbps y todos los posibles escenarios de migración aumentan esta tasa de transmisión a 100 Gbps, por lo tanto la red aumenta su capacidad en 10 veces. De esta manera la carga de tráfico inmediatamente después de realizar el proceso de migración, es decir, la carga de tráfico inicial ρ_0 es igual a 0.1.

Carga de tráfico máxima permitida ($\rho_{m\acute{a}x}$): este valor, como se mencionó anteriormente, queda a criterio del operador. En este ejemplo se considera una carga de tráfico máxima permitida igual a 0.9, punto en el cual la red ya se encuentra en condiciones de realizar un nuevo proceso de actualización.

5.4 Paso 3: Estimación del tiempo de operación (T)

Con una tasa de crecimiento de tráfico anual de $r = 40\%$, una carga de tráfico inicial $\rho_0 = 0,1$ y con una carga de tráfico máxima permitida igual a 0,9, y de acuerdo a la ecuación (4-2) se obtiene un tiempo de operación de 6 años. En la Fig. 5-4 se puede apreciar el tiempo de operación a medida que la carga de tráfico va variando en función del tiempo (línea azul), la que luego de aproximadamente 6 años alcanza su valor máximo permitido (línea roja).

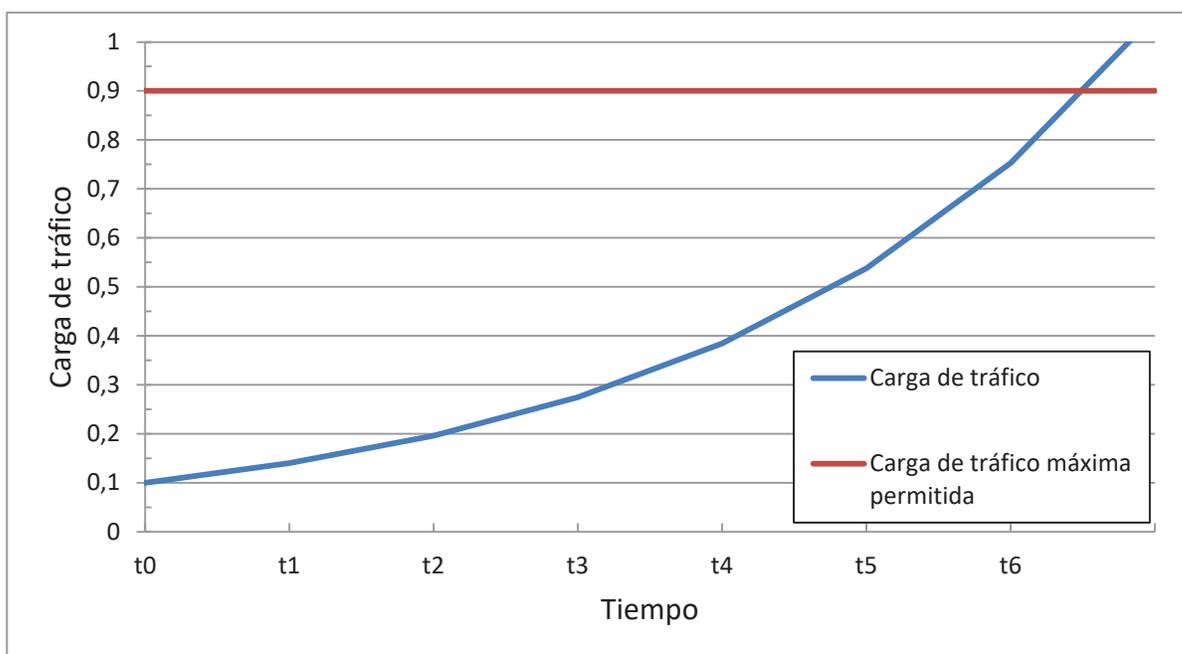


Fig. 5-4 Evolución de la carga de tráfico de las conexiones en el tiempo

5.5 Paso 4: Determinación del número de instantes de inversión

Número de instantes de inversión para el escenario de migración B_1 : al migrar desde el escenario inicial A hacia el escenario B_1 , se mantiene el tipo de operación estática, por ende el número de instantes de inversión es igual a 1 ($N_{inv} = 1$) ya que, todos los nuevos dispositivos necesarios para llevar a cabo el proceso de migración deben ser instalados al momento de implementar la alternativa de migración seleccionada puesto que se deben asignar los caminos ópticos antes de poner en funcionamiento la red.

Este proceso de migración está basado en la estrategia *big bang*.

Número de instantes de inversión para los escenarios de migración B_2 y B_3 : estos escenarios de migración contemplan la operación dinámica, por lo tanto la extensión de la red se puede realizar gradualmente en diferentes instantes de tiempo a lo largo del período de operación T . Utilizando la ecuación (4-3) y obteniendo ρ_{th} de la Tabla 5-4 (carga de tráfico igual a 0,5, donde los requerimientos de capacidad de la red se igualan, ya sea operando de forma dinámica o de forma estática y cuyo valor corresponde a 182) se obtiene que son en total cuatro los instantes en los cuales se debe incurrir en un costo de capital diferencial, es decir, $N_{inv} = 4$ (en t_0, t_2, t_3, t_4).

5.6 Paso 5: Evaluación de costos

La suma de $D_CapEx_{A,B}$ y $OpEx_B$ entrega el costo de migrar desde un escenario inicial A hacia otro escenario de mayor capacidad.

En la Tabla 5-6 es posible observar el tipo, la cantidad, y el costo unitario (incluye costo de adquisición, instalación y configuración) de los dispositivos requeridos en los diferentes escenarios de migración, obteniendo los costos de [32] y [33].

Tabla 5-6 Tipo, número y costo de nuevos dispositivos requeridos en Bi

Escenario de migración	Etapas del nodo	Nombre del dispositivo	N° de dispositivos necesarios	Costo unitario (UN)
B_1	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	182	15
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	182	15
B_2	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (100 Gbps)	$TX(\rho_0)$ Ver Tabla 5-4	18
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	$RX(\rho_0)$ Ver Tabla 5-4	15
	Entrada	Splitter óptico	42	$0,05 \cdot N^\circ$ de puertos
	Conmutación	WSS no flexible	56 (1x8) 28 (1x20)	4 6
		Splitter óptico	14	$0,05 \cdot N^\circ$ de puertos
B_3	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (hasta 100 Gbps)	$TX(\rho_0)$ Ver Tabla 5-4	18
		Transpondedor de recepción sintonizable (hasta 100 Gbps)	$RX(\rho_0)$ Ver Tabla 5-4	18
	Entrada	Splitter óptico	42	$0,05 \cdot N^\circ$ de puertos
	Conmutación	WSS flexible	56 (1x8) 28 (1x20)	5,2 7,8
		Splitter óptico	14	$0,05 \cdot N^\circ$ de puertos

Por otra parte, la Tabla 5-7 muestra el número de componentes que son requeridos y que se deben adquirir para instalar en cada inicio de período de operación o instantes de inversión t_i basándose en el comportamiento de la carga de tráfico en función del tiempo de la Fig. 5-4 y los requerimientos de transpondedores de la Tabla 5-4.

Tabla 5-7 Número total de nuevos dispositivos requeridos en ti

Escenario de migración	Etapa del nodo	Nombre del dispositivo	N° de dispositivos requeridos a instalar						
			t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
B_1	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	182	0	0	0	0	0	0
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	182	0	0	0	0	0	0
B_2	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (100 Gbps)	126	0	28	14	14	0	0
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	126	0	28	14	14	0	0
	Entrada Conmutación	Splitter óptico	42	0	0	0	0	0	0
		WSS no flexible	84	0	0	0	0	0	0
		Splitter óptico	14	0	0	0	0	0	0
B_3	Interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (hasta 100 Gbps)	126	0	28	14	14	0	0
		Transpondedor de recepción sintonizable (hasta 100 Gbps)	126	0	28	14	14	0	0
	Entrada Conmutación	Splitter óptico	42	0	0	0	0	0	0
		WSS flexible	84	0	0	0	0	0	0
		Splitter óptico	14	0	0	0	0	0	0

Evaluación del costo de capital diferencial (D_CapEx):

Cabe mencionar que los costos mostrados en la Tabla 5-6 están normalizados al costo de un transpondedor de 10 Gbps de 750 km de alcance, dicha unidad es denominada como “Unidad Normalizada” o UN cuya equivalencia es a 7500 USD [34].

Al migrar desde un escenario que está operando de forma estática a uno que opera de manera dinámica es necesario incorporar un plano de control, cuyo valor se supone de 20 UN [35].

En cuanto a los enlaces, debido a que su configuración no varía en ningún escenario de migración, no es necesario incurrir en costos de capital puesto que no se deben adquirir nuevos equipos ya que, cuentan con la tecnología adecuada para atenuar los efectos de transmisión.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el número de dispositivos necesarios en cada escenario de migración y el valor de cada uno de estos componentes es posible obtener el

costo de capital diferencial para los 3 diferentes escenarios de migración, esto se logra aplicando la ecuación (3-1) utilizando los valores entregados en las tablas anteriores.

En la Fig. 5-5 es posible observar los resultados de los costos de capital diferencial en donde se realiza una diferenciación de la contribución de los diferentes componentes al costo total en los diferentes escenarios de migración (transpondedores de transmisión y recepción barra celeste, *splitters* barra verde, WSS no flexibles barra amarilla, WSS flexibles barra púrpura, y el plano de control (M&CS) barra anaranjada). Sabido es, que la tecnología a medida que transcurre el tiempo se abarata, por ende, se supone que los costos de todos los componentes disminuyen un 5% cada año. También se aprecia que el D_CapEx total del escenario B_1 es menor al del escenario B_2 (5460 UN vs 6187 UN), es decir, que el costo de inversión en nuevos dispositivos para el escenario dinámico con grilla fija es un 13% mayor que el costo de inversión para implementar el escenario B_1 estático. La razón de esto se debe a que al momento de conservar la operación estática sólo se deben adquirir nuevos transpondedores de transmisión y de recepción fijos, en cambio al migrar hacia una red dinámica se debe cambiar toda la estructura de los nodos, o sea, aparte de adquirir nuevos transpondedores de transmisión y recepción se deben comprar una serie de nuevos dispositivos que forman parte de esta nueva configuración de nodo dinámico (ver Fig. 5-3). Como se dijo, si bien, el número total de transpondedores a instalar a lo largo del período de operación de la red (T) es el mismo (sólo que en B_2 se van adquiriendo e instalando a diferentes tiempos), la diferencia en la contribución al costo total de estos dispositivos se genera a raíz de que al ser comprados e instalados en tiempos posteriores su costo va decreciendo y también por el hecho de que los transpondedores de transmisión sintonizables utilizados en la etapa de la interfaz de la capa electrónica-DWDM de B_2 son de un costo mayor comparado con los transpondedores fijos usados en B_1 .

También contribuye en aproximadamente un 6% al D_CapEx total del escenario B_2 la adquisición de WSS no flexibles para la etapa de conmutación, y en menor magnitud la implementación de un nuevo plano de control (0,3%) y los *splitters* utilizados en la etapa de entrada y en la etapa de conmutación (0,18%), cosa que no ocurre en el escenario B_1 ya que, en este escenario estático con grilla fija se sucede equipamiento del escenario inicial A (M&CS y dispositivo de conmutación).

Ahora bien, el costo de inversión de un nuevo equipamiento para el escenario dinámico con grilla flexible B_3 es un 25% mayor que la inversión de conservar la operación estática en B_1 (6829 UN vs 5460 UN). Esto sucede por la misma razón explicada previamente, al cambiar el modo de operación, y en este caso la grilla, se debe cambiar completamente la estructura de los nodos de la red. La adquisición de WSS flexibles contribuye en un 7,5% al total de D_CapEx del escenario B_3 , a lo que también se suma la implementación de un nuevo plano de control contribuyendo de manera mínima al coste total (0,3%).

Por último, implementar la alternativa con grilla flexible B_3 es un 10% más costosa que migrar hacia un escenario dinámico con grilla fija B_2 (6829 UN vs 6187 UN). Si bien en ambos casos se incluye un nuevo plano de control y se realizan las mismas modificaciones en sus nodos, la diferencia la marca el costo de los transpondedores de transmisión/recepción sintonizables utilizados ya que, son más costosos que aquellos

fijos, al igual que los WSS flexibles presentan un valor más elevado que aquellos WSS no flexibles.

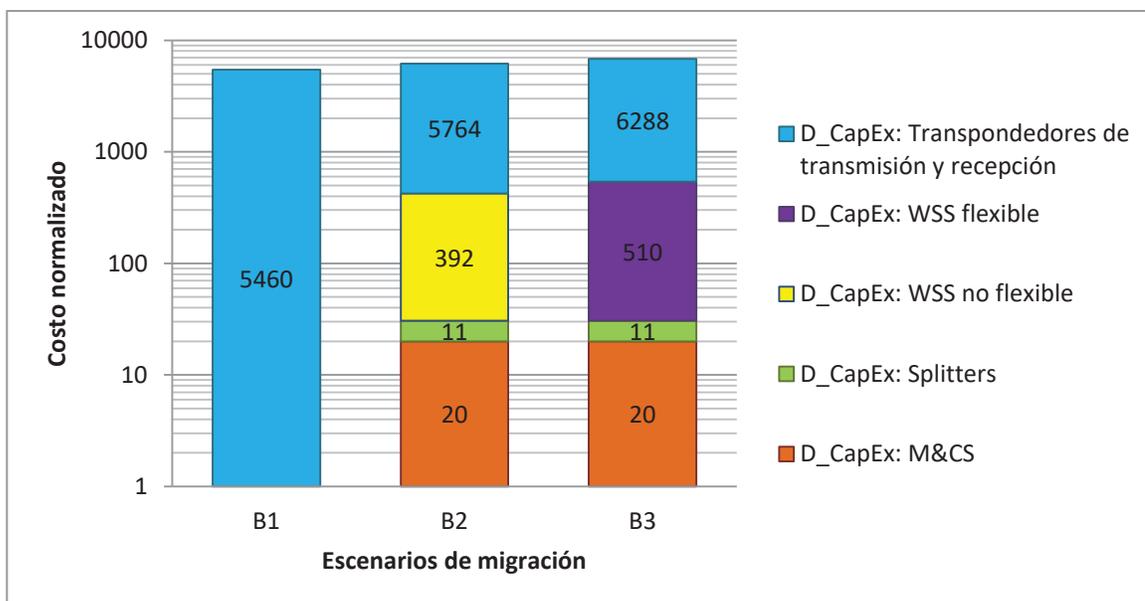


Fig. 5-5 D_CapEx normalizado para los diferentes escenarios de migración

En las siguientes figuras (de la Fig. 5-6 a la Fig. 5-8) es posible observar la magnitud de las distintas inversiones en los diversos escenarios de migración y en los diferentes instantes de inversión t_i . En B_1 el número de instantes de inversión es igual a 1 (t_0) y corresponde al desembolso de 5460 UN.

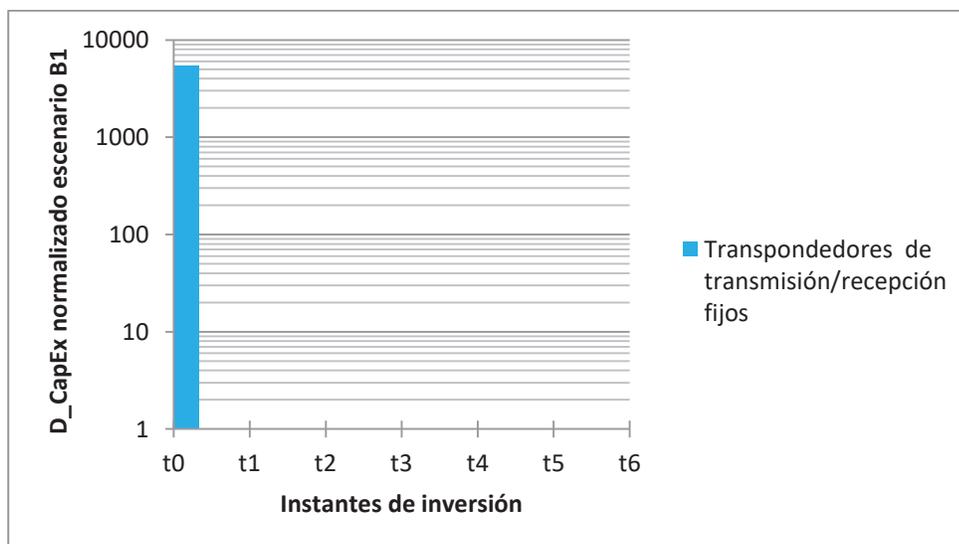


Fig. 5-6 Evolución temporal de la inversión de los componentes del escenario B1

En cambio, en los escenarios B_2 y B_3 se presentan 4 instantes de inversión correspondientes a t_0, t_2, t_3 y t_4 . Tal como en la Fig. 5-7 se puede apreciar que para el escenario de migración dinámica con grilla fija, estas inversiones corresponden a 4581, 834, 396, y 376 UN. Y en el caso del escenario dinámico con grilla flexible, Fig. 5-8, estas inversiones corresponden a 5077, 910, 432, y 410 UN. En ambos casos se puede notar que la inversión va decreciendo año a año, esto sucede porque se van necesitando menos transpondedores extras (comparados al año anterior) y también a causa de que la tecnología se abarata (disminuye en 5% cada año el valor de los dispositivos).

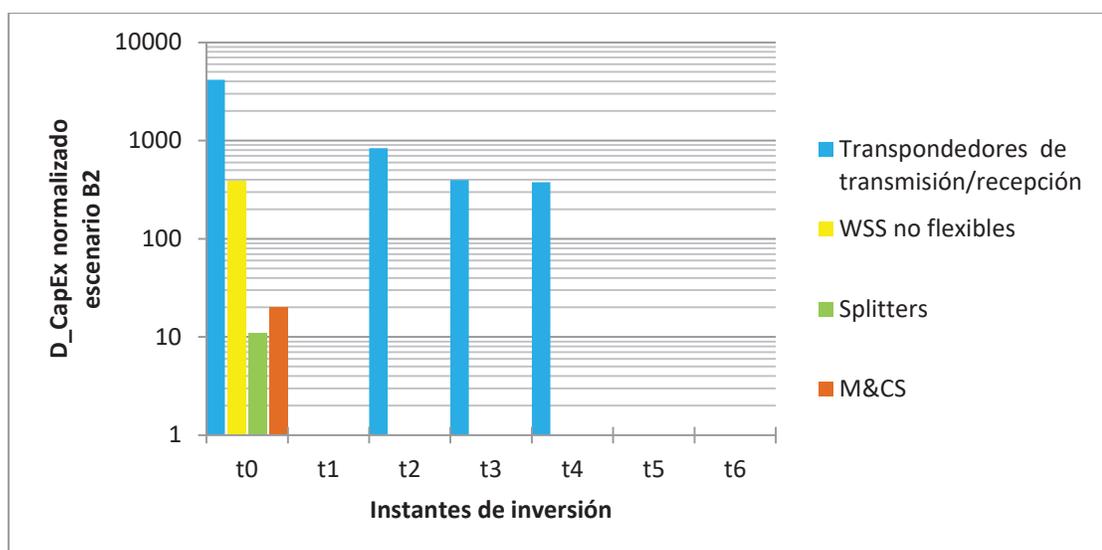


Fig. 5-7 Evolución temporal de la inversión de componentes del escenario B2

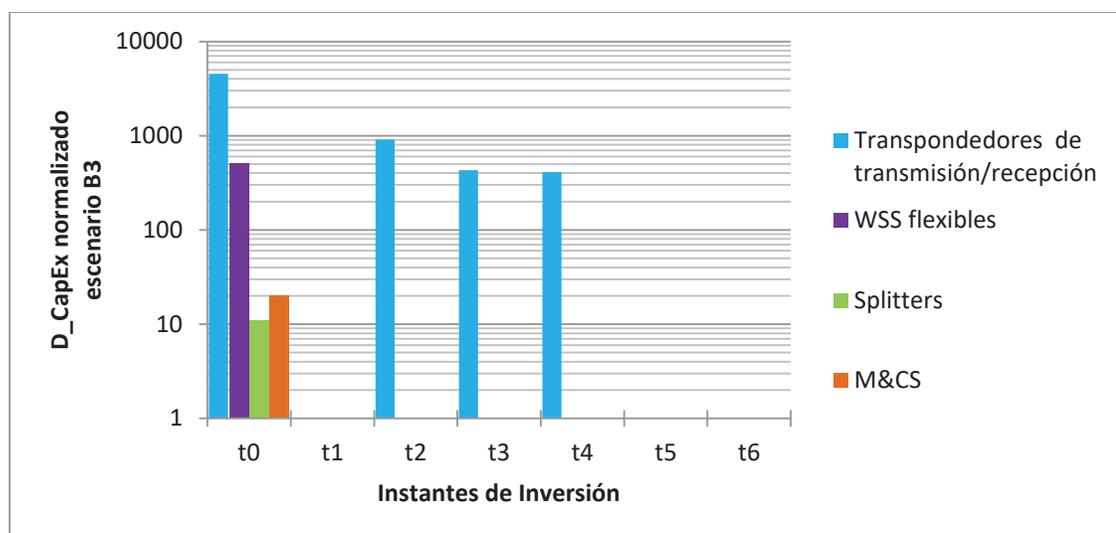


Fig. 5-8 Evolución temporal de la inversión de los componentes del escenario B3

Evaluación del costo operacional (OpEx):

Para calcular los costos operacionales en las distintas alternativas de migración se han hecho las siguientes suposiciones:

- El costo de energía es igual a 0,18 USD/kWh (www.chilectra.cl)
- El salario mensual de los ingenieros de jornada completa que se encuentran a cargo del sistema de gestión y establecimiento de conexiones es de \$1000000 aproximadamente (Estudio de Sueldos de Ingenieros 2014) al mes. Normalizado tiene un valor de 0,22 UN/mes.
- El costo de la energía y los salarios presentan un aumento del 2,5% cada año.
- Para el caso del escenario B_1 , al suponer que se encuentra en cada nodo de la red un ingeniero trabajando jornada completa, el tiempo medio de viaje para llegar a algún punto de falla de la NSFNet es de 4,8 h.
- En el caso de un escenario de migración dinámico con grilla fija o con grilla flexible, la red NSFNet es dividida en tres zonas. En cada zona se encuentran 3 ingenieros trabajando jornada completa. Cada zona estará a cargo de ciertos puntos de la red, y que según lo estimado, el tiempo medio de viaje para llegar a algún punto de falla de la red es de 7,9 h.
- Los ingenieros son los encargados de realizar la reparación de fallas en los componentes de los nodos, así como también en los EDFAs, por lo tanto, el costo de reparación de fallas para dispositivos de los nodos y EDFAs considera el traslado del ingeniero al punto en donde se encuentra la falla (incluyendo arriendo del vehículo y el costo del combustible), el costo de alojamiento, costo de alimentación y el costo del componente necesario para realizar la reparación.
- En el caso de reparaciones por cortes de cables, eso estará a cargo de una empresa externa, la cual tendrá a disposición cuadrillas con un promedio de 3 técnicos, ubicados en las 3 diferentes zonas que ha sido dividida la NSFNet. Esta empresa es contratada de forma permanente durante el período de operación de la red, por lo tanto, paga mensualmente por el costo de reparación de fallas de los cables de fibra óptica. En este punto son considerados tanto el sueldo mensual de los técnicos, como el costo que implica desplazarse y realizar alguna reparación, incluyendo también un 40% de ganancia para la empresa que entrega tales servicios.
- El costo de componentes de reemplazo pasa a formar parte de los costos de reparación de fallas y el número a adquirir en cada período de operación dependerá de la estimación del número de fallas. Esto se calcula utilizando la ecuación (3-5).

La Tabla 5-8 indica los valores de FIT y potencia eléctrica medida en W, de los elementos que forman parte de la red de los diversos escenarios de migración [36], [37], [38], [39], [40].

Tabla 5-8 Valores de FIT y potencia media de los dispositivos escenarios Bi

Escenario de migración	Sección de la red	Nombre del dispositivo	FIT	p[W]
B_1	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	320	150
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	320	150
	Nodo: Etapa de entrada	Demultiplexor DWDM	1E+03	0
	Nodo: Etapa de conmutación	Optical Patch Panel	200	0
	Nodo: Etapa de salida	Multiplexor DWDM	1E+03	0
	Cables	Cables de fibra óptica EDFA	200/km 2850	0 15
B_2	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (100 Gbps)	1,04E+0,3	150
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	320	150
	Nodo: Etapa de conmutación	WSS no flexible	1250	20
	Cables	Cables de fibra óptica EDFA	200/km 2850	0 15
B_3	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión sintonizable (hasta 100 Gbps)	1,04E+03	150
		Transpondedor de recepción sintonizable (hasta 100 Gbps)	1,04E+03	150
	Nodo: Etapa de conmutación	WSS flexible	1250	20
	Cables	Cables de fibra óptica EDFA	200/km 2850	0 15

Luego la Tabla 5-9 entrega la estimación del número de fallas de cada componente de los nodos y de los enlaces en los diferentes períodos de operación de las diferentes alternativas de migración. En esta tabla es posible observar que el número de fallas anuales de los dispositivos de los nodos del escenario B_1 es relativamente bajo (0 a 3), esto se debe al bajo valor de FIT de estos componentes. En cambio el número de fallas anuales para los dispositivos de los escenarios restantes es mayor que el caso estático (entre 3 y 9 fallas anuales), debido a un FIT mayor de los dispositivos sintonizables y

también en que en los casos dinámicos (con grilla fija o flexible) son requeridos dispositivos que el escenario estático no necesita.

Tabla 5-9 Número de fallas de los dispositivos en los escenarios Bi

Escenario de migración	Sección de la red	Nombre del dispositivo	N° de fallas por período					
			T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
B_1	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	0	1	0	1	0	1
		Transpondedor de recepción fijo (100 Gbps)	0	1	0	1	0	1
	Cables	Cables de fibra óptica EDFAs	15 7	16 7	16 7	16 7	16 7	16 7
B_2	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedores de transmisión sintonizables (100 Gbps)	1	1	2	2	2	1
		Transpondedor de transmisión fijo (100 Gbps)	0	1	0	1	0	1
	Nodo: Etapa de conmutación	WSS no flexible (1x8)	0	1	0	1	1	0
		WSS no flexible (1x20)	0	0	0	1	0	0
	Cables	Cables de fibra óptica EDFA	15 7	16 7	16 7	16 7	16 7	16 7
B_3	Nodo: Etapa interfaz capa electrónica-DWDM	Transpondedores de transmisión sintonizables (hasta 100 Gbps)	1	1	2	2	2	1
		Transpondedor de transmisión sintonizable (hasta 100 Gbps)	1	1	2	2	2	1
	Nodo: Etapa de conmutación	WSS flexible (1x8)	0	1	0	1	1	0
		WSS flexible (1x20)	0	0	0	1	0	0
	Cables	Cables de fibra óptica EDFA	15 7	16 7	16 7	16 7	16 7	16 7

También a partir de las tablas anteriores se puede notar que el número de fallas de cables y EDFAs, considerando un largo total de 9130 km aproximadamente y 286 amplificadores ópticos (tomando en cuenta amplificadores de línea cada 80 km y *booster* y pre-amplificadores al inicio y final de cada enlace), es el mismo tanto para un escenario estático o dinámico (fijo o flexible) ya que todos los escenarios utilizan la misma configuración en los cables.

Posteriormente, a partir de los datos de las tablas que indican el FIT, la potencia consumida, y el número de fallas en los diferentes períodos de operación, sumado a las suposiciones hechas anteriormente se obtiene el OpEx normalizado de los diferentes escenarios de migración, utilizando diversas ecuaciones (de la (3-2) a la (3-6)).

La Fig. 5-9 presenta el OpEx normalizado desagregado en costos por reparación de fallas (barra púrpura), de mantenimiento (barra azul), y de energía (barra anaranjada). Se puede apreciar también, que los mayores costos de reparación de fallas se presentan en el caso dinámico con grilla flexible, esto se debe a que este valor se ve afectado por el costo de los dispositivos de repuestos (escenario con los valores de dispositivos más elevados) y también por contar con equipos que presentan un mayor número de fallas. Por otra parte, el escenario de migración estático presenta los mayores costos de energía debido a que desde que se implementa esta alternativa se ponen en funcionamiento todos los dispositivos de la red durante todo el período de operación T , en cambio en las otras alternativas es posible instalar sólo el equipo necesario para operar la red durante un primer período de tiempo y después según sean las necesidades la red se van instalando los dispositivos restantes.

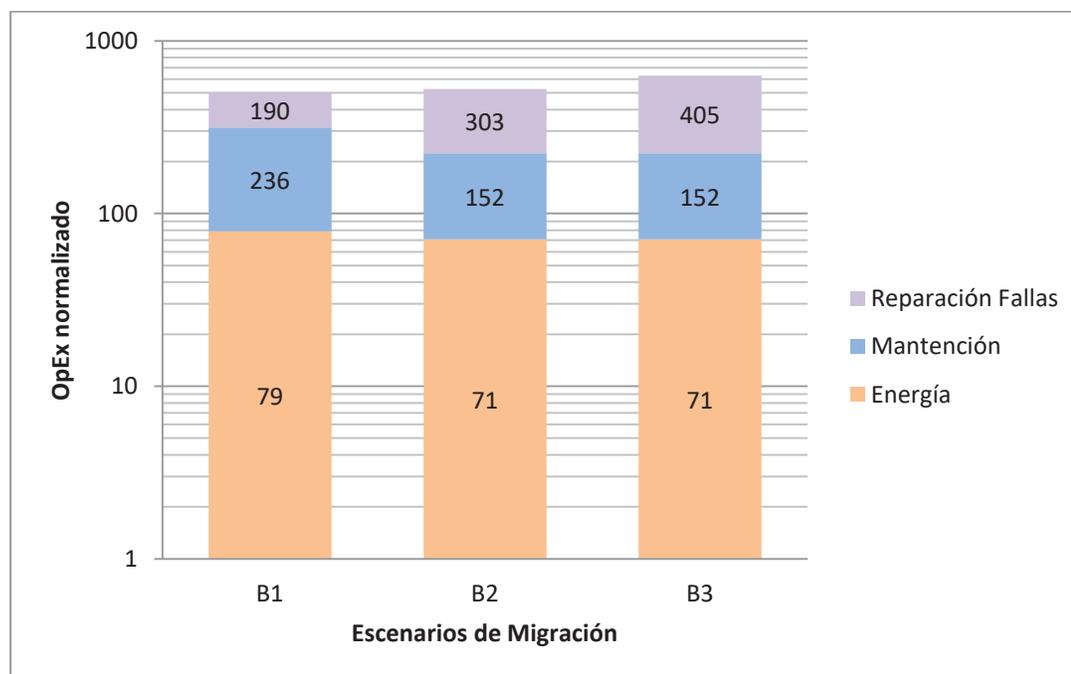


Fig. 5-9 OpEx total normalizado para los diferentes escenarios de migración

Aunque presenta los mayores costos de energía (aunque poco significativo) y de mantenimiento, el escenario de migración estático presenta el menor valor de OpEx normalizado (505 UN) comparado con el escenario dinámico con grilla fija B_2 (527 UN) y con el escenario elástico B_3 (629 UN). Si bien ambos escenarios dinámicos presentan los mismos valores en los costos de energía y mantenimiento, la diferencia surge de los elevados valores en los costos de reparación en el caso del escenario con grilla flexible, esto puede ser debido a que los equipos de mayor tecnología tienden a fallar más veces.

La Fig. 5-10 expone la contribución de los diversos componentes de red en el costo operacional total de los diferentes escenarios de migración. Se puede observar que las mayores diferencias entre los 3 posibles escenarios de migración apuntan a la

contribución del M&CS (236 UN en el escenario B_1 vs 152 UN tanto para el escenario B_2 como B_3) y a la contribución de los transpondedores de la etapa de la interfaz de la capa electrónica-DWDM de los nodos (147 UN para el escenario estático, 235 UN para el caso dinámico con grilla fija, y 333 UN para el caso flexible). Todo esto se debe, en el caso de M&CS al número de ingenieros de planta requeridos, y en el caso de los transpondedores a que los transpondedores sintonizables tienen un mayor costo unitario.

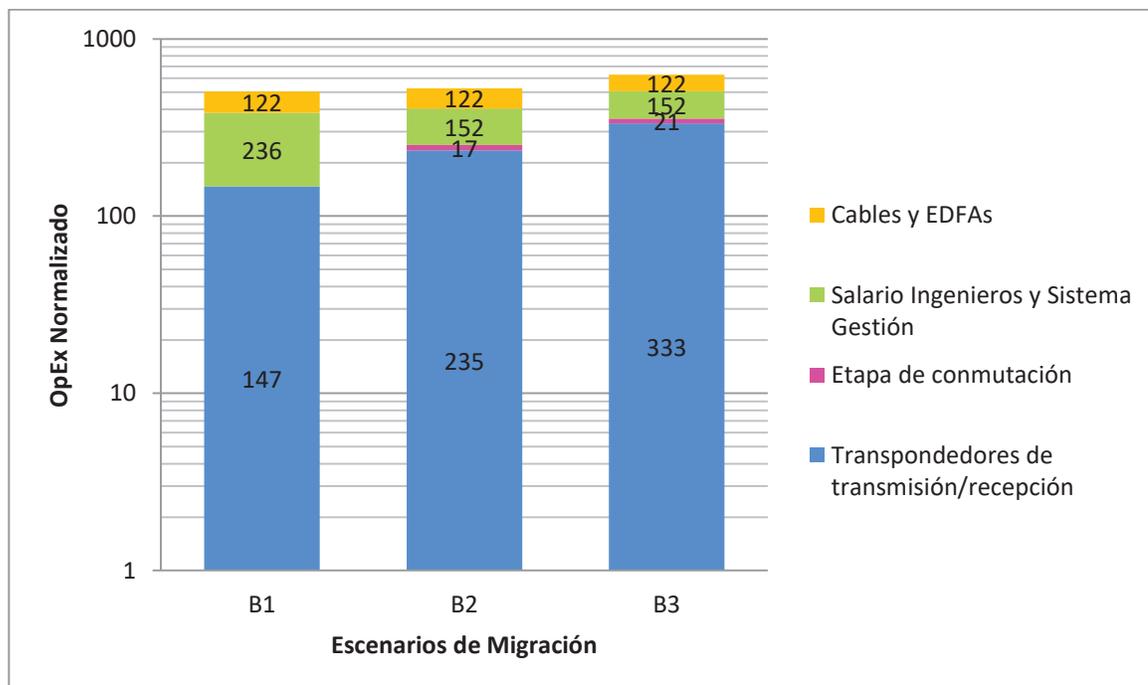


Fig. 5-10 OpEx total normalizado desagregado de los escenarios B_i

En las Fig. 5-11, Fig. 5-12 y Fig. 5-13 se puede observar la contribución de los costos de consumo energético (barra anaranjada), reparación de fallas (barra púrpura) y de mantenimiento (barra celeste) en el costo operacional total en función de los períodos de operación (T_1 a T_6) para los diferentes escenarios de migración. Cabe mencionar que el consumo energético y el costo de mantenimiento van aumentando año a año debido a que el salario de los trabajadores y el valor de la energía aumentan en un 2,5% anualmente, en cuanto al costo de reparación de fallas se puede observar que se comporta de manera diferente, esto sucede porque este valor dependerá del número de fallas que experimente la red durante cierto período de operación.

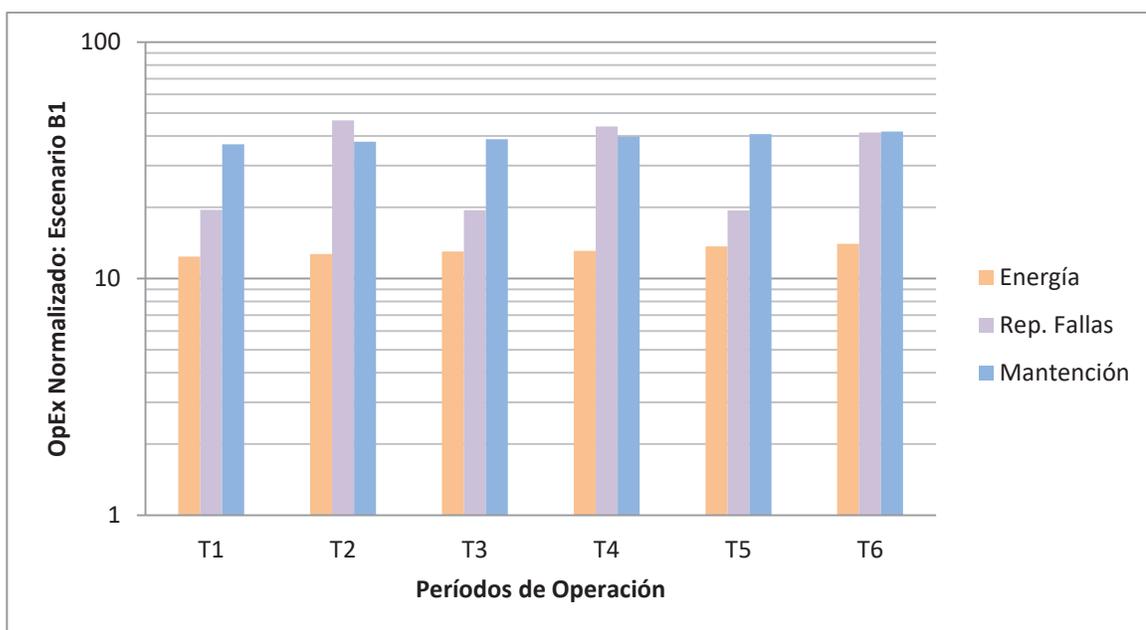


Fig. 5-11 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B1

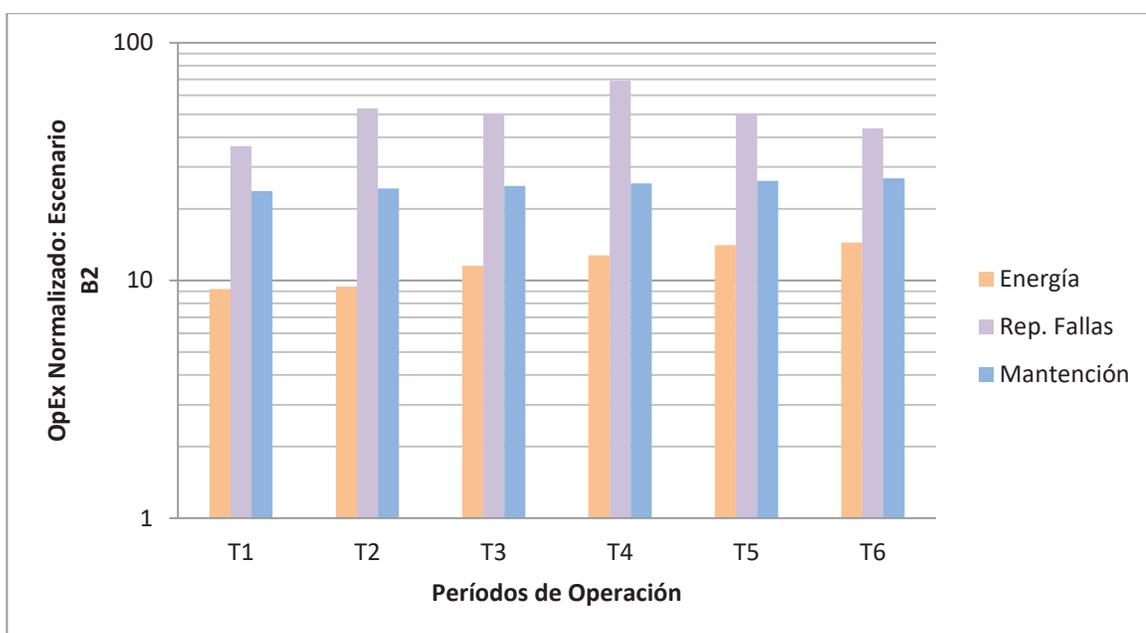


Fig. 5-12 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B2

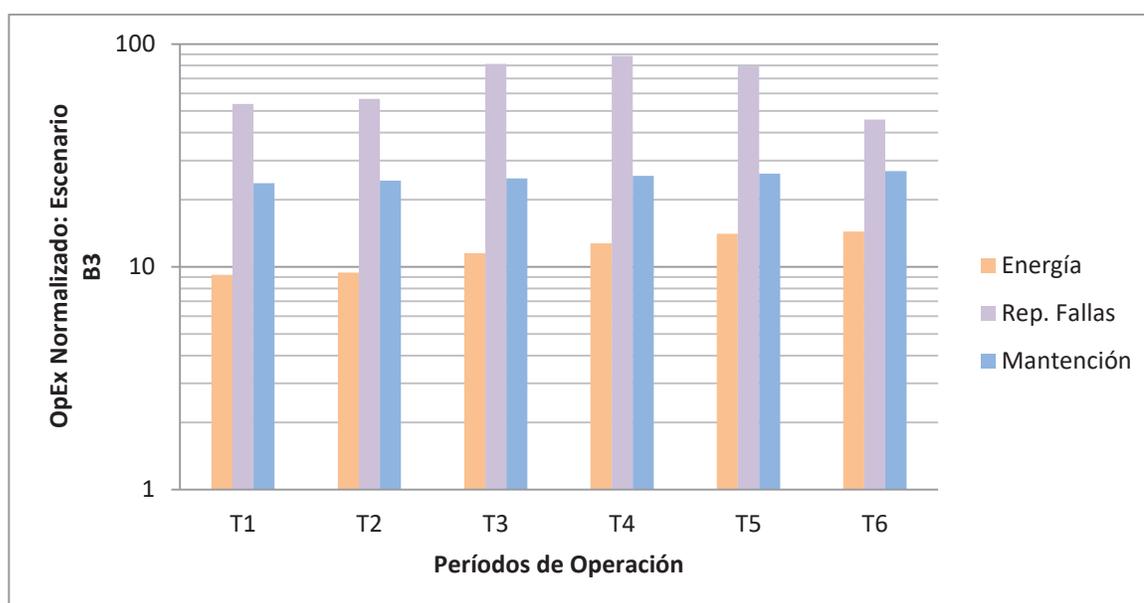


Fig. 5-13 Evolución temporal de los costos operacionales en escenario B3

5.7 Paso 6: Comparación del costo total de las alternativas de migración

El costo total de migración (CM) es mostrado en la Fig. 5-14 en donde son considerados los costos de capital diferencial (D_CapEx) y los costos operacionales (OpEx) obtenidos a partir de la aplicación de la metodología tecno-económica que permite evaluar diferentes alternativas de migración (en el paso 5 específicamente). A partir de esta imagen se puede apreciar que realizar un proceso de migración hacia una red flexible resulta más costoso que mantener la red operando de forma estática (7456 UN vs 5965 UN), en cuanto a la alternativa de migrar hacia una red dinámica manteniendo la grilla fija también presenta un costo más elevado que permanecer con la red operando de manera estática (6713 UN vs 5965 UN), pero menor que aplicar grilla flexible (6713 UN vs 7456 UN).

Por lo tanto, al no producirse ahorros significativos en el escenario de migración B_3 en cuanto a los costos operacionales, los que pudieran contrarrestar la gran e importante inversión en dispositivos para poner en funcionamiento la red, la opción de migrar hacia una red dinámica implementando la grilla flexible es la menos conveniente.

En la Fig. 5-14 es posible apreciar que los costos operacionales sólo representan un muy pequeño porcentaje dentro del costo total de migración (CM), en ningún escenario superan el 9%, siendo el costo de capital diferencial aquel que representa prácticamente el 90% del costo total, esto sucede en cualquiera de las 3 alternativas de migración.

La evolución temporal del costo total de migración normalizado se puede observar en la Fig. 5-15, Fig. 5-16 y Fig. 5-17 en donde se muestra el gráfico desagregado en D_CapEx y OpEx donde se aprecia claramente los instantes de inversión durante el período T y el bajo aporte del costo operacional al costo total de migración.

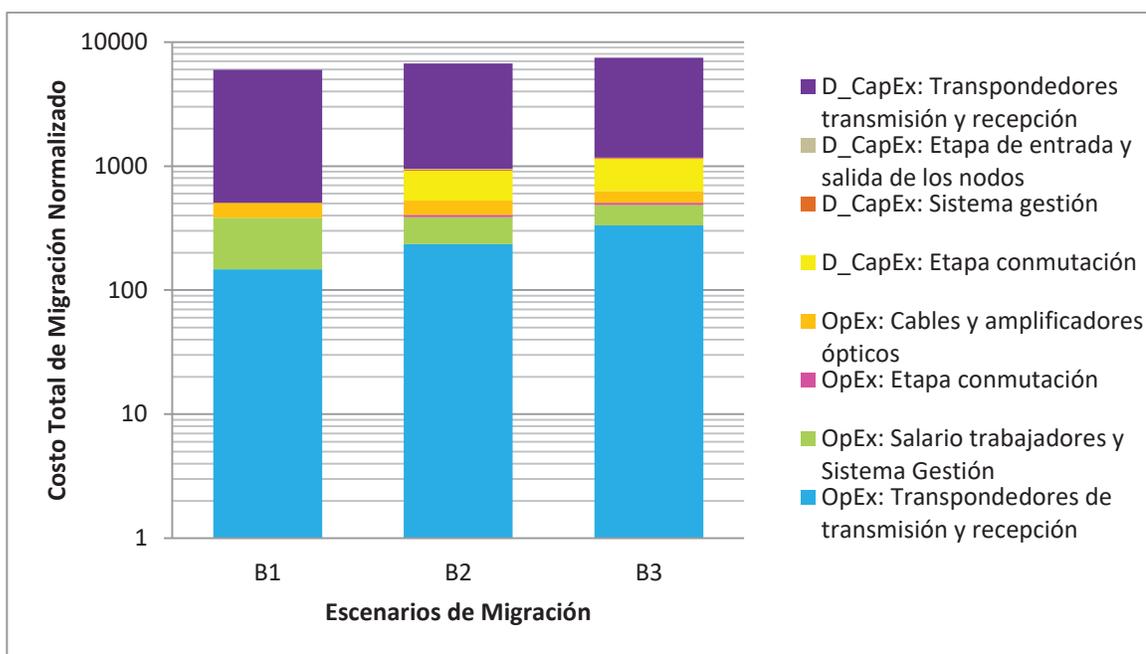


Fig. 5-14 Costo total de migración normalizado, indicando diferentes aportes

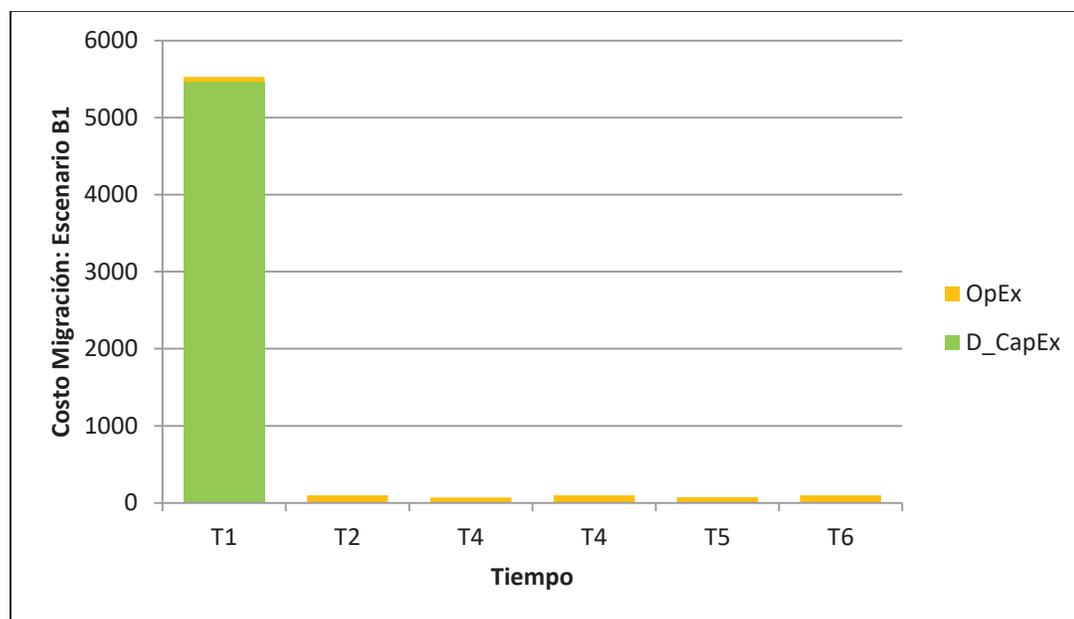


Fig. 5-15 Evolución temporal CM normalizado desagregado para el escenario B1

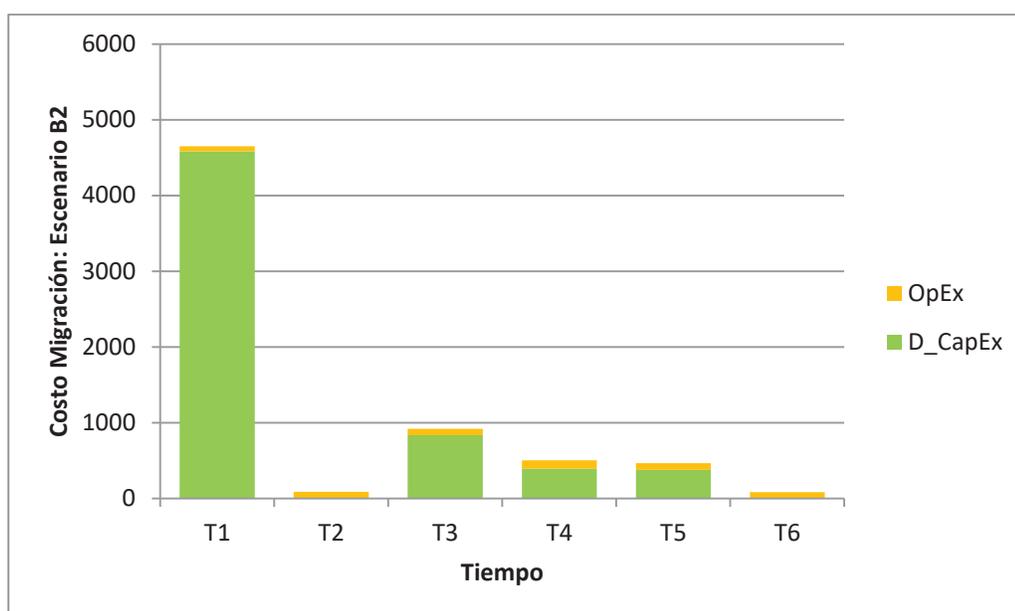


Fig. 5-16 Evolución temporal CM normalizado desagregado para escenario B2

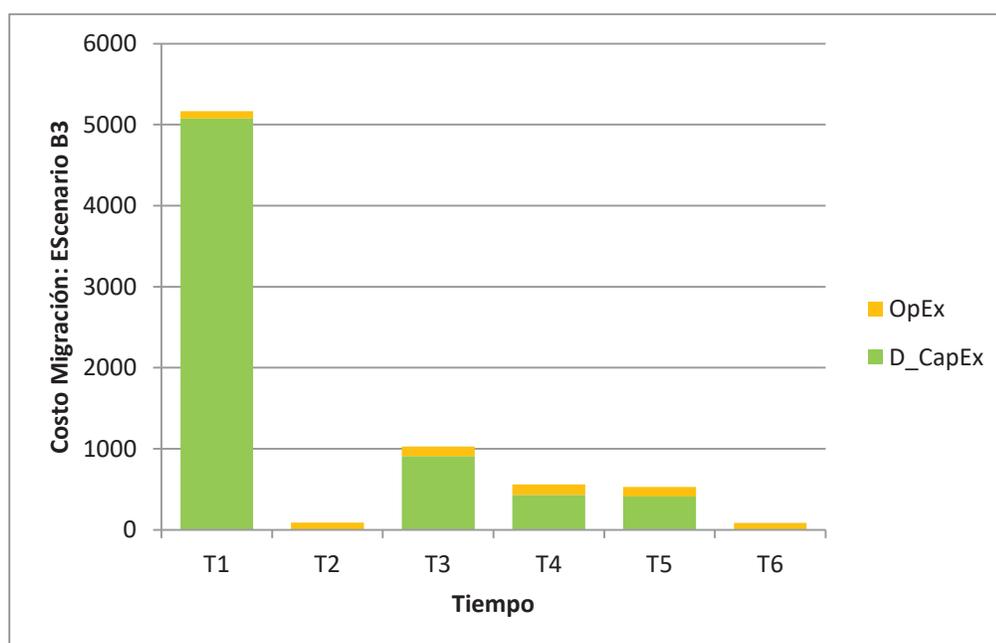


Fig. 5-17 Evolución temporal CM normalizado desagregado para escenario B3

5.8 Paso 7: Evaluar el costo total de migración por unidad espectral

Como se mencionó en el capítulo anterior, que los escenarios con grilla fija y flexible, a pesar de estar proporcionados por el mismo rendimiento de la red y requerir el mismo número de componentes, difieren en la cantidad de espectro óptico utilizado ya que, el objetivo de implementar grilla flexible es ocupar de manera eficiente el espectro, permitiendo satisfacer de mejor forma las grandes demandas para un tráfico heterogéneo en el futuro. Por lo tanto, para poder definir desde un punto de vista técnico cuál es la alternativa de migración más conveniente, es decir, qué escenario emplea de mejor forma el espectro óptico, se debe evaluar el costo total por unidad espectral en donde el costo total de migración de cierto escenario es dividido por el ancho de banda realmente utilizado durante su período de operación.

Para llevar esto a cabo, luego de obtener el $CM(T)_{A,B}$ de cada escenario de migración se procedió a realizar simulaciones para obtener el espectro óptico total utilizado en cada alternativa, en estas simulaciones se utilizan algoritmos de asignación (RWA y RSA dependiendo del escenario) en donde el ruteo se realiza a través de 3 *shortest path*, es decir, las primeras rutas más cortas y para la asignación de longitudes de onda y FSUs es utilizado *First Fit* [41].

La simulación consistió en lo siguiente: se inicia este proceso utilizando el espectro completo de la banda C, correspondiente a 80 longitudes de ondas, con una rejilla de 50 GHz lo que multiplicado da un valor de 4000 GHz o 320 FSUs. Entonces para el caso dinámico teniendo 80 longitudes de onda y con una carga de tráfico inicial determinada se toma un registro en la simulación que indica las longitudes de onda que realmente son utilizadas, luego a partir de ese valor se va reduciendo el número de portadoras o FSUs para obtener una probabilidad de bloqueo igual a cero. Obteniendo esto, se procede a correr otra simulación con las longitudes de onda y FSUs realmente utilizados y se comienza a disminuir el número de transpondedores en cada nodo hasta alcanzar una probabilidad de bloqueo igual a 10^{-3} (la probabilidad de bloqueo sólo se debe al número de transpondedores, no tiene relación con la capacidad de la red). Cabe recordar que cada portadora es de 50 GHz y en el caso de la red flexible para 10 Gbps son utilizados 2 FSUs, al igual que a 40 Gbps, en el caso de transmitir a 100 Gbps son utilizados 3 FSUs.

De los resultados obtenidos se tiene que para una red operando con grilla fija, el total de espectro utilizado es de 1250 GHz, correspondiente a 25 portadoras ópticas, en el caso de una red elástica el espectro total utilizado durante un período de operación T es de 900 GHz, correspondiente a 72 FSUs, cada uno de 12.5 GHz. Estos valores corresponden al instante en que la red presenta una carga de tráfico igual a 0.9. Es decir, corresponde a la carga de tráfico máxima permitida. Utilizando estos valores en la ecuación (4-4) se obtienen los costos de migración por unidad espectral que se pueden observar en la Fig. 5-18. La alternativa de grilla flexible sigue siendo la menos conveniente, puesto que presenta el mayor costo por unidad espectral, si bien un escenario elástico deja una mayor cantidad de espectro óptico disponible lo que se puede traducir en atender más conexiones y también puede significar alargar el tiempo de vida de la red, los costos económicos son elevados por ende aún no significa una opción factible a la hora de realizar un proceso de migración.

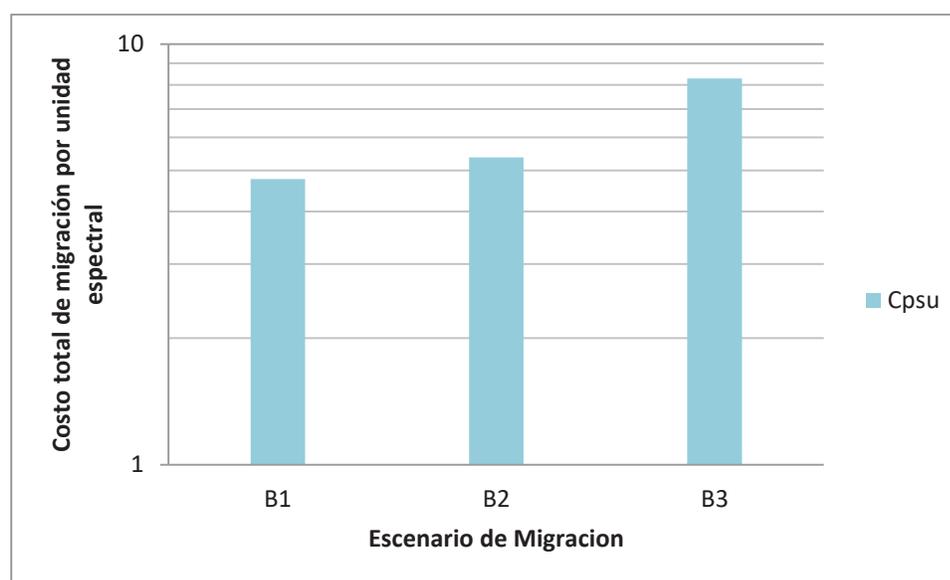


Fig. 5-18 Costo de migración por unidad espectral normalizado

5.9 Análisis de sensibilidad

La metodología planteada en este proyecto, además de cuantificar el D_CapEx y OpEx de un proceso de migración también permite reconocer aquellos factores que más contribuyen a la hora de evaluar el costo total de migración, estos factores son identificados detallados a continuación.

5.9.1 Factores claves

En el ejemplo analizado en el presente capítulo se pueden identificar aquellos factores importantes que presentan una mayor contribución en el costo total de migración, estos son:

- Costos de los dispositivos de la red.
- Salario de los ingenieros que trabajan jornada completa.
- Número de fallas de los transpondedores sintonizables.

La Fig. 5-19 muestra el valor del costo de migración para el escenario B_3 cuando se vería, por separado, el costo de los componentes, el salario de los ingenieros, y el número de fallas de los dispositivos (factores claves) en un $\pm 10\%$ y $\pm 50\%$ respectivamente. En el caso de los otros escenarios de migración, la variación que se produce es similar a la mostrada en la figura pero presenta distintas dimensiones. También se puede observar que el factor que produce variaciones mayores es el de costos de los componentes, provoca un crecimiento casi lineal del costo total de migración, por ejemplo al variar en un 10% el costo de los componentes, el costo de migración también varió en aproximadamente un

9% y en el caso de aumentar en un 50% los costos de los componentes, el costo de migración varió un 46% aproximadamente. En cuanto a las variaciones en el salario de los ingenieros de la red, o las variaciones del número de fallas de los componentes, afectan mínimamente el costo total de migración, en ambos casos las variaciones de estos factores provocan variaciones no mayores al 2%.

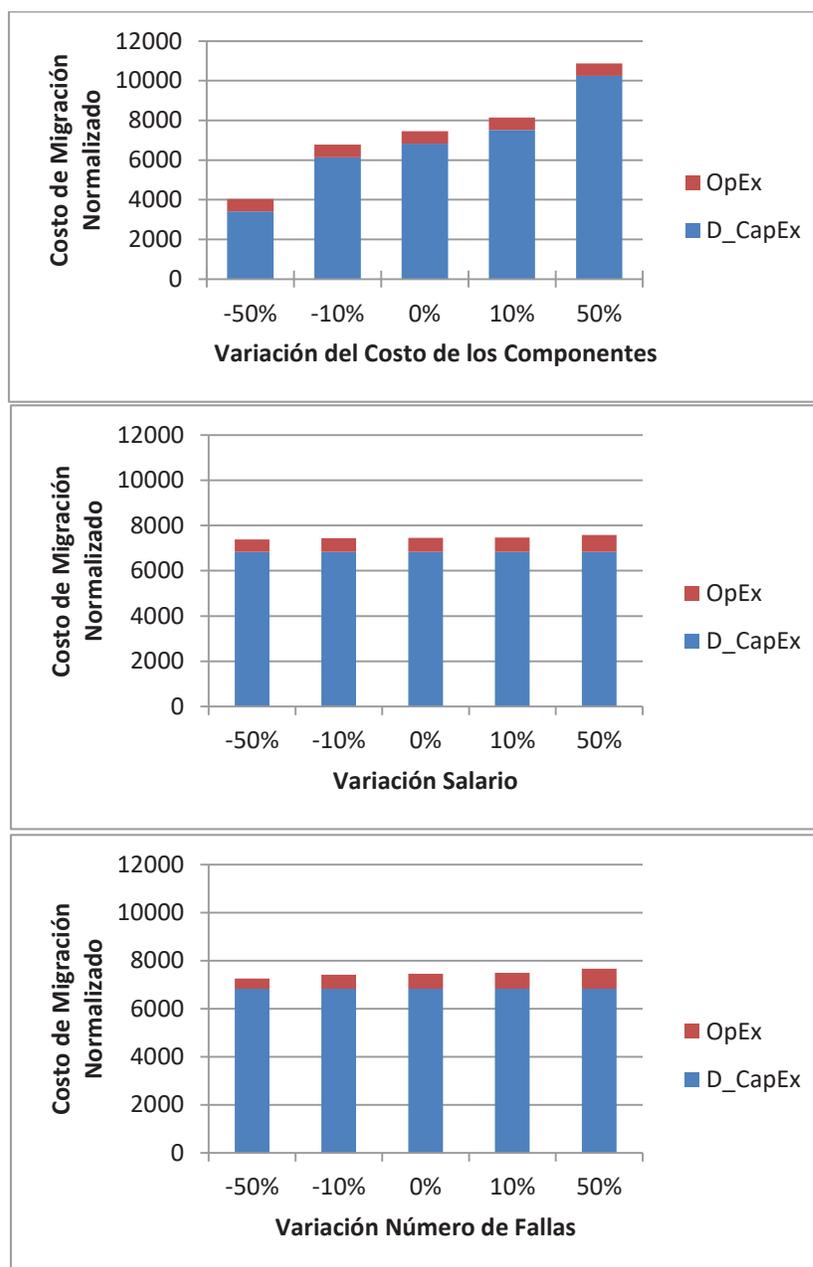


Fig. 5-19 CM normalizado para escenario B3 con diversas variaciones

CONCLUSIONES

La metodología de evaluación tecno-económica propuesta en este proyecto permite evaluar diferentes posibles escenarios de migración genéricos entre los cuales se considera una red que utiliza grilla flexible (red elástica). Esta metodología permite seleccionar aquellas alternativas más convenientes desde el punto de vista tecno-económico frente a un aumento en la capacidad de sus enlaces, y cuyo factor es el mismo para todos los casos. Son considerados los costos de capital como también los costos operacionales. Y desde el punto de vista técnico es posible cuantificar el espectro total utilizado en la red.

En el ejemplo aplicado fueron analizados tres posibles escenarios de migración: el primero de ellos conservaba la operación estática y grilla fija, pero aumentaba la velocidad de transmisión de sus conexiones de 10 a 100 Gbps. En el segundo escenario de migración se consideraba cambiar el modo de operación al del tipo dinámico, conservando la grilla fija y aumentando también su tasa de transmisión a 100 Gbps. En el último caso el escenario de migración considerado fue aquel que opera de manera dinámica, pero utilizando la nueva propuesta de grilla flexible y la tasa de transmisión de sus conexiones aumentaba hasta 100 Gbps. Se estimó una tasa de crecimiento anual de tráfico del 40%, con una carga de tráfico inicial igual a 0.1, y un período de operación para la red de alrededor de 6 años, en cuanto al número de instantes de inversión, dependerá del tipo de escenario de migración que se esté analizando (si es estático o si es dinámico).

En cuanto a resultados de costos de migración, el mayor costo de capital diferencial o D_CapEx , lo presenta el escenario de migración con grilla flexible, es decir B_3 . Es un 25% mayor que el costos de capital diferencial al conservar la operación estática (B_1). Por otra parte, el mayor costo operacional también lo presenta el escenario de migración con grilla flexible, si bien el número de trabajadores disminuye, al igual que los gastos energéticos, los componentes presentan un mayor número de fallas, por ende los costos por reparación se elevan.

El valor que más contribuye al costo total de migración es el D_CapEx , el costo operacional no es lo suficientemente influyente para lograr contrarrestar los elevados gastos de adquisición de nuevos componentes para la red.

La opción de la grilla flexible, al ser la que posee los mayores valores de D_CapEx y $OpEx$, resulta ser la alternativa menos conveniente al momento de realizar un proceso de migración desde un punto de vista netamente económico. A esto se suma que también presenta el mayor valor de costo de migración por unidad espectral, pero una ventaja es que utiliza una cantidad menor de espectro óptico en comparación con la grilla fija, lo que permite atender más conexiones y extender el tiempo útil de vida de fibra óptica y la red. En este punto, es muy importante mencionar, aunque en este caso no fue considerado en el análisis, el gran ahorro que puede significar aumentar la vida útil de la fibra óptica al incrementar el espectro óptico disponible, esto a causa de la grilla flexible que utiliza de manera eficiente el ancho de banda disponible. Tomar en cuenta esta variable puede marcar la diferencia a la hora de evaluar y decidir la alternativa más conveniente.

Por último, se espera que esta metodología sea una herramienta útil para los operadores de redes ópticas DWDM al momento de tomar diferentes decisiones, permitiendo identificar la opción de menor costo y los diversos factores claves que la afectan.

REFERENCIAS

- [1] J. Winze, «Optical Networking Beyond WDM,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, n° 2, pp. 647-651, 2012.
- [2] K. Laudon y J. Laudon, *Sistemas de Información Gerencial*, México: Pearson Educación, 2004.
- [3] Recommendation ITU-T G.694.1 , «Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid,» 2012.
- [4] I. Tomkos, E. Palkopoulou y M. Angelou, «A Survey of Recent Developments on Flexible/Elastic Optical Networking,» *Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on. IEEE*, 2012.
- [5] I. Tomkos, M. Angelou, R. Durán, I. de Miguel, R. Lorenzo, D. Siracusa, E. Salvadori, A. Tymecki, Y. Ye y I. Tafur, «Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks Supporting the Evolution to the Future Internet,» de *In The Future Internet* (pp. 225-236), Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [6] A. Mayoral, O. Gonzalez de Dios, V. Lopez y J. Fernandez-Palacios, «Migration Steps Towards Flexi-grid Networks,» *Future Network & Mobile Summit 2013 Conference Proceedings*, 2013.
- [7] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord y S. Ben Yoo, «Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n° 2, pp. S12-S20, 2012.
- [8] M. Ruiz, L. Velasco, A. Lord, D. Fonseca, M. Pióro, R. Wessály y J. Fernández-Palacios, «Planning Fixed to Flexgrid Gradual Migration: Drivers and Open Issues,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, n° 1, pp. 70-76, 2014.
- [9] A. Leiva, C. Machuca, A. Beghelli y R. Olivares, «Migration Cost Analysis for Upgrading WDM Networks,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n° 11, pp. 87-93, 2013.
- [10] M. Tahon, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet, P. Wright y A. Lord, «Valuing Flexibility in the Migration to Flexgrid Networks,» de *National Fiber Optic Engineers Conference (pp. NTh11-6)*, Optical Society of America, 2013.
- [11] J. Huidobro, *Redes y servicios de telecomunicaciones*, S.A Ediciones Paraninfo, 2006.
- [12] R. Gutiérrez Castrejón, *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico*, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- [13] J. Capmany Franco y B. Ortega Tamarit, *Redes ópticas*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [14] R. Ahumada, A. Leiva, F. Alonso, S. Fingerhuth y G. Farías, «Spectrum Allocation Algorithms for Elastic DWDM Networks on Dynamic Operation,» *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 12, n° 6, pp. 1012-1018, 2014.
- [15] P. Yuan y A. Xu, «The Influence of Physical Network Topologies on Wavelength Requirements in Optical Networks,» *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*,

vol. 28, n° 9, 2010.

- [16] A. Saleh y J. Simmons, «Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, n° 1, pp. 126-132, 2011.
- [17] A. Zapata y S. Ahumada, «Static vs. Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks under Time-Varying Traffic,» de *National Fiber Optic Engineers Conference*, Optical Society of America, 2008.
- [18] C. Meusburger, D. Schupke y A. Lord, «Optimizing the Migration of Channels With Higher Bitrates,» *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 28, n° 4, pp. 608-615, 2010.
- [19] O. Renais, G. Yven y E. Le Rouzic, «Migrating To a Next Generation WDM Core Network,» *Infocommunications Journal*, vol. 65, n° 2, pp. 11-19, 2010.
- [20] A. Leiva, C. Machuca y A. Beghelli, «Upgrading Cost Modelling of Capacity-Exhausted Static WDM Networks,» de *Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2012 16th International Conference on. IEEE, 2012.
- [21] Infinera Corporation, «Infinera Case Study: Migration of a Pan-European Optical Network,» 2012.
- [22] T. Michaelis, M. Duelli, M. Chamania, B. Lichtinger, F. Rambach y S. Türk, «Network Planning, Control and Management Perspectives on Dynamic Networking,» de *European Conference on Optical Communication (ECOC 2009)*, 2009.
- [23] N. Geary, A. Antonopoulos, E. Drakopoulos y J. O'Reilly, «Analysis Of Optimisation Issues In Multi-Period DWDM Network Planning,» de *INFOCOM 2001*, Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. Vol. 1. IEEE, 2001.
- [24] M. Ruiz, L. Velasco, J. Comellas y G. Junyent, «A Traffic Intensity Model for Flexgrid Optical Network Planning under Dynamic Traffic Operation,» de *Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America*, 2013.
- [25] I. Stiakogiannakis, E. Palkopoulou y I. Tomkos, «On the Cost Efficiency of Flexible Optical Networking Compared to Conventional SLR/MLR WDM Networks,» de *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2013 15th International Conference on. IEEE, 2013.
- [26] S. Pasqualini, S. Verbrugge, A. Kirstädter, A. Iselt, D. Colle, M. Pickavet y P. Demeester, «Influence of a Control Plane on Network Expenditures,» de *Asia-Pacific Optical Communications*, International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [27] B. Decocq, «Planning of Full Optical network,» Deliverable 3, EURESCOM Project P709, 2000.
- [28] A. Zapata y P. Bayvel, «Do We Really Need Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks?,» de *High Performance Computing and Communications*, Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [29] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga y A. Hirano, «Multiflow Optical Transponder for Efficient Multilayer Optical Networking,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n° 5, pp. 56-65, 2012.

- [30] A. Leiva, J. Finochietto, B. Huiszoon, V. López, M. Tarifeño, J. Aracil y A. Baghelli, «Comparison in Power Consumption of Static and Dynamic WDM Networks,» *Optical Switching and Networking*, vol. 8, n° 3, pp. 149-161, 2011.
- [31] T. Tanaka, A. Hirano y M. Jinno, «Advantages of IP Over Elastic Optical Networks Using Multi-Flow Transponders From Cost And Equipment Count Aspects,» *Optics Express*, vol. 22, n° 1, pp. 62-70, 2014.
- [32] M. De Groote, K. Monousakis, P. Kokkinos, D. Colle, M. Pickavet, K. Christodouloupoulos, E. Varvarigos y P. Demeester, «Cost Comparison of Different Translucent Optical Network Architectures,» de *Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE)*, 2010 9th Conference on. IEEE, 2010.
- [33] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger y D. Schupke, «Cost Modeling and Evaluation of Capital Expenditures in Optical Multilayer Networks,» *Journal of Optical Networking*, vol. 7, n° 9, pp. 814-833, 2008.
- [34] A. Hassan, J. Altmann y V. Lopez, «Control Plane Framework Emergence and its Deployment Cost Estimation,» de *Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE 2012)*, 2012.
- [35] ADVA Optical Networking , «FSP 3000 Coherent Transponder,» 2012. [En línea]. Available:
<http://www.advaoptical.com/~media/Innovation/Efficient%20100G%20Transport/>.
- [36] P. Winzer y M. Duelk, «Reliability Considerations for Parallel 100G Carrier-Grade Ethernet Transport,» de *IEEE HSSG Meeting*, Monterey, CA, 2007.
- [37] D. Schupke, «Guaranteeing Service Availability in Optical Network Design,» de *International Society for Optics and Photonics*, 2005.
- [38] S. Verbrugge, D. Colle, P. Demeester, R. Huelsermann y M. Jaeger, «General Availability Model for Multilayer Transport Networks,» de *Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, 2005.
- [39] Finisar Corporation, «Finisar,» 2011. [En línea]. Available:
http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/DWP100_Wavelength_Selective_Switch_Product_Brief_9_2011_V6.pdf..
- [40] R. Ahumada, A. Leiva, F. Alonso, S. Fingerhuth y G. Farias, «Spectrum Allocation Algorithms for Elastic DWDM Networks on Dynamic Operation,» *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 12, n° 6, pp. 1012-1018, 2014.