



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL DE FI DE CARRERA

**TÍTOL:** Mecanismes de resolució de contencions per a xarxes de commutació òptica de ràfegues (OBS)

**TITULACIÓ:** Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Telemàtica

**AUTOR:** Eva Rodríguez Rodríguez

**DIRECTOR:** Anna Agustí Torra

**DATA:** 5 de setembre de 2005

**Títol:** Mecanismes de resolució de contencions per a xarxes de commutació òptica de ràfegues (OBS)

**Autor:** Eva Rodríguez Rodríguez

**Director:** Anna Agustí Torra

**Data:** 5 de setembre de 2005

## Resum

En aquest treball s'avalua, mitjançant simulació, el comportament de diferents mecanismes de resolució de contencions per a les xarxes de commutació òptica de ràfegues (OBS).

La primera part del treball consisteix en programar i incorporar al simulador els mòduls que permeten simular les funcions dels diferents mecanismes avaluats: conversió de longitud d'ona (Conv), fibres de retard (FDL) i combinacions dels dos mecanismes anteriors (Conv+FDL i FDL+Conv).

A continuació s'avaluen i es comparen els mecanismes de resolució de contencions en termes de retard i probabilitat de pèrdua en dos escenaris diferents: (1) xarxa amb topologia lineal i fonts directament connectades als nodes de la línia i (2) xarxa formada interconnectant el node central de diverses estrelles, els nodes extrems de les quals són les fonts.

Els resultats mostren la diferència de comportament de cada mecanisme de resolució de contencions en funció de la topologia i la ubicació de les fonts a la xarxa. En aquest treball es discuteixen els avantatges i inconvenients d'utilitzar cadascun dels mecanismes per separat així com de manera combinada.

A més a més, el treball es complementa amb un apartat teòric on s'expliquen les bases de la tecnologia de commutació òptica de ràfegues (OBS) i dos models analítics senzills per als casos de conversió de longitud d'ona i de fibres de retard.

**Title:** Contention resolution schemes in Optical Burst Switching (OBS) networks

**Author:** Eva Rodríguez Rodríguez

**Director:** Anna Agustí Torra

**Date:** September, 5th 2500

## Overview

A contention resolution evaluation, through simulation, in Optical Burst Switching networks (OBS) has been done. Evaluating two different contention resolution schemes, full wavelength conversion (Conv) and fiber delay lines (FDL), and combining them (Conv + FDL or FDL + Conv).

A programming task has been done first, equipping an existing OBS simulator with different modules, to allow it to use this contention resolution schemes.

Then, a simulation process has been done. Comparing these different contention resolution schemes in terms of burst loss probability and burst extra delay (introduced by the mechanisms). At this point, two different network topologies have been considered; the first of them consisting in a line topology with direct connected sources to the OBS nodes; the second one is based in this line topology but with the sources increase and they are moved away of the central nodes.

The results show the importance of the network topology in OBS scenarios, the effects of the burst programming schemes and the offsets. In addition, it has been shown the advantages and disadvantages of the different contention resolution schemes, and the good results obtained in the combination of wavelength conversion and fiber delay lines, mainly when wavelength conversion is done first.

Finally, a theorist chapter describing OBS basics, and two simple theorist models of wavelength conversion and fiber delay lines are presented.

*A l'Anna, pel recolzament i ajuda rebuts en tot aquest temps*

*A la meva família, per haver-m'ho aguantat tot*

*I... a qui està quan i on s'ha d'estar*

*“No hi ha coses més o menys difícils,  
sinó més o menys hores de dedicació”*

# ÍNDEX

<b>INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTOL 1. Introducció al simulador de xarxes OBS</b> .....	<b>2</b>
1.1. <b>Mecanismes de resolució de contencions</b> .....	<b>2</b>
1.2. <b>Introducció al simulador de xarxes OBS</b> .....	<b>2</b>
1.2.1. Pla de control.....	3
1.2.2. Mecanismes de resolució de contencions.....	4
1.2.2.1. Conversió de longitud d'ona (Conv) .....	5
1.2.2.2. Fibres de retard (FDL) .....	5
1.2.2.3. Conv + FDL.....	6
1.2.2.4. FDL + Conv.....	7
1.2.3. Pla de dades.....	8
<b>CAPÍTOL 2. Comparativa via simulació</b> .....	<b>9</b>
2.1. <b>Introducció als escenaris i paràmetres avaluats</b> .....	<b>9</b>
2.1.1. Topologies de xarxa .....	9
2.1.2. Temps de procés.....	9
2.1.3. Característiques de les fonts .....	9
2.1.4. Offset .....	10
2.1.5. Paràmetres avaluats.....	10
2.2. <b>Una topologia de xarxa senzilla: la línia</b> .....	<b>11</b>
2.2.1. Xarxa sense mecanismes de resolució de contencions .....	11
2.2.1.1. Probabilitat de pèrdua.....	12
2.2.1.2. Retard .....	13
2.2.2. Conversió de longituds d'ona .....	16
2.2.2.1. Probabilitat de pèrdua.....	16
2.2.2.2. Retard .....	17
2.2.3. Fibres de retard (FDLs) .....	17
2.2.3.1. Probabilitat de pèrdua.....	18
2.2.3.2. Retard .....	21
2.2.4. Offset .....	23
2.2.4.1. Probabilitat de pèrdua.....	24
2.2.4.2. Retard .....	25
2.2.5. Mecanismes combinats en la línia .....	27
2.2.5.1. FDL + Conv.....	27
2.2.5.1.1 Probabilitat de pèrdua.....	27
2.2.5.1.2 Retard .....	29
2.2.5.2. Conv + FDL.....	29
2.2.5.2.1 Probabilitat de pèrdua.....	29
2.2.5.2.2 Retard .....	31
2.2.6. Comparativa de mecanismes a la línia .....	31
2.2.6.1. Cas A .....	31
2.2.6.2. Cas C.....	32
2.3. <b>Línia amb fonts allunyades dels nodes: 20 fonts</b> .....	<b>34</b>
2.3.1. Xarxa sense mecanismes de resolució de contencions .....	35
2.3.1.1. Probabilitat de pèrdua.....	35
2.3.1.2. Retard .....	36
2.3.2. Conversió de longitud d'ona .....	37
2.3.2.1. Probabilitat de pèrdua.....	37

2.3.2.2.	Retard .....	38
2.3.3.	Fibres de retard .....	39
2.3.3.1.	Probabilitat de pèrdua.....	39
2.3.3.2.	Retard .....	41
2.3.4.	Offsets diferenciats.....	42
2.3.4.1.	Probabilitat de pèrdua.....	42
2.3.4.2.	Retard .....	43
2.3.5.	Mecanismes combinats (FDL i Conv) .....	44
2.3.5.1.	FDL + Conv.....	44
2.3.5.1.1	Probabilitat de pèrdua.....	44
2.3.5.1.2	Retard .....	46
2.3.5.2.	Conv + FDL.....	47
2.3.5.2.1	Probabilitat de pèrdua.....	47
2.3.5.2.2	Retard .....	48
2.3.6.	Comparativa de mecanismes a la xarxa amb 20 fonts .....	49
2.3.6.1.	Probabilitat de pèrdua.....	50
2.3.6.2.	Retard .....	51

<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>53</b>
-------------------------	-----------

<b>Referències.....</b>	<b>56</b>
-------------------------	-----------

<b>Annexes .....</b>	<b>61</b>
----------------------	-----------

# INTRODUCCIÓ

La commutació de ràfegues a nivell òptic (*Optical Burst Switching*) és una tecnologia de commutació a mig camí entre la commutació de paquets i la commutació de circuits. La tecnologia òptica encara no és suficientment madura per poder disposar d'una xarxa de commutació de paquets eficient i capaç de suportar els requeriments que els serveis actuals sol·liciten; d'altra banda la commutació de circuits proporciona poca flexibilitat per a canviar de forma dinàmica i àgil els circuits a establir i els seus requisits. La commutació òptica de ràfegues pretén treure profit dels avantatges d'ambdues tecnologies.

El principal problema de la commutació òptica de ràfegues és la contenció de ràfegues, que es tradueix en pèrdua d'informació. Des de la introducció de la tecnologia s'han definit diversos mecanismes per tal d'eliminar-la o, si més no, reduir-la. En aquest treball s'avaluen, mitjançant simulació, dos mecanismes de resolució de contencions: conversions de longitud d'ona i fibres de retard, així com les combinacions d'aquests mecanismes.

Per poder realitzar la simulació, s'han hagut de programar i incorporar al simulador els mòduls necessaris per disposar dels mecanismes de resolució de contencions.

Un cop actualitzat el simulador, s'han avaluat i comparat els mecanismes de resolució de contencions en termes de retard i probabilitat de pèrdua en dos escenaris diferents: (1) xarxa amb topologia lineal i fonts directament connectades als nodes de la línia i (2) xarxa a partir de la interconnexió del node central de diverses estrelles, els nodes extrems de les quals són les fonts.

El treball es complementa amb un capítol teòric on s'expliquen les bases de la tecnologia de commutació òptica de ràfegues (OBS), els factors que hi incideixen de forma més significativa, i els diferents mecanismes de resolució de contencions existents. En el cas de no estar familiaritzat amb la tecnologia, es recomana fer una lectura del capítol teòric introductori ("Introducció a la commutació òptica de ràfegues") per a familiaritzar-se amb la nomenclatura i funcionament d'aquest tipus de xarxes abans d'enfrontar-se amb la comparativa dels diferents mecanismes.

A més a més, en el capítol teòric es desenvolupen dos models analítics senzills per tal de modelar de forma aproximada el comportament dels dos mecanismes de resolució de contencions: la conversió de longitud d'ona i les fibres de retard.

# CAPÍTOL 1. Introducció al simulador de xarxes OBS

## 1.1. Mecanismes de resolució de contencions

La commutació òptica de ràfegues (OBS) és una tecnologia a mig camí entre la commutació òptica de paquets i la commutació de circuits que intenta aprofitar les avantatges d'ambdues tecnologies de commutació. No obstant, encara és una tecnologia immadura i objecte d'estudi. Un dels principals inconvenients que en retarda la seva introducció al mercat és la seva elevada probabilitat de pèrdua. Aconseguir solucions efectives en aquest aspecte és, per tant, un objectiu fonamental.

Tot i que en els darrers anys s'han anat desenvolupant diverses solucions per a resoldre el problema de les contencions entre ràfegues per tal de disminuir la probabilitat de pèrdua a les xarxes OBS, [27] [28-34] [35-41] [42-46], pràcticament tots els mecanismes proposats tenen inconvenients importants.

Els estudis i projectes realitzats fins ara es basen en estudiar i aportar modificacions als esquemes bàsics de resolució de contencions, és a dir: Fibres de retard (*Fiber Delay Lines*, FDLs), Conversions de Longitud d'Ona, *Deflection Routing* i Segmentació de Ràfegues. I pel que fa a les comparatives d'aquests mecanismes de resolució de contencions i les seves combinacions, sovint es realitzen utilitzant xarxes amb topologies poc simètriques, fet que en dificulta l'anàlisi degut a l'elevada dependència entre la topologia de la xarxa i el rendiment del mecanisme de resolució de contencions utilitzat.

L'objectiu principal d'aquest treball és realitzar una comparativa d'alguns dels mecanismes bàsics de resolució de contencions mitjançant simulació i a través de models analítics senzills.

## 1.2. Introducció al simulador de xarxes OBS

Les simulacions dels mecanismes de resolució de contencions que es presenten en aquest treball s'han dut a terme utilitzant un simulador de xarxes OBS per events programat en llenguatge C. Part de la feina d'aquest projecte ha consistit en incorporar al simulador dos mòduls de resolució de contencions: un per a la conversió de longituds d'ona i un altre per a les fibres de retard; així com funcions addicionals per tal de combinar ambdós mecanismes.

En aquest apartat es presenta el funcionament bàsic del simulador així com les principals funcions del pla de control, el pla de dades i els mòduls de resolució de contencions introduïts.

El simulador utilitzat accepta dos fitxers d'entrada: el primer descriu la topologia de la xarxa i el segon especifica la ubicació i les característiques de les fonts. En aquests fitxers també es descriuen les característiques dels enllaços



(longitud i nombre de longituds d'ona disponibles) i les característiques dels paquets o de les ràfegues que genera cada font, juntament amb els seus processos d'arribada associats.

La descripció de la programació de les ràfegues sobre els diferents enllaços de la xarxa es realitza utilitzant un conjunt de vectors on cada posició equival a un determinat interval de temps que s'introdueix com a paràmetre. La selecció d'aquest paràmetre té una influència directa en el rendiment de la xarxa ja que només es poden reservar recursos utilitzant un valor enter de posicions d'aquests vectors. En certa manera es pot considerar que l'ús d'aquests vectors implica que la xarxa funcioni en mode ranurat, tot i que, escollint una resolució dels vectors suficientment petita, el comportament de la xarxa s'aproxima al d'una xarxa OBS no ranurada. Per a les proves realitzades en aquest projecte, s'ha fixat aquest paràmetre a  $10\mu s$ .

D'entre els mecanismes d'*scheduling* disponibles al simulador, s'ha utilitzat el LAUC-VF conjuntament amb una funció que ordena de forma aleatòria les longituds d'ona d'un determinat enllaç de sortida abans d'aplicar el mecanisme d'*scheduling*, d'aquesta manera s'afavoreix l'ús equitatiu de totes les longituds d'ona.

### 1.2.1. Pla de control

El pla de control engloba la generació, processat i propagació de cada paquet de control per tal de programar tots els nodes intermedis i permetre que la posterior transmissió de la ràfega associada es realitzi de forma transparent en el domini òptic a través de la xarxa OBS.

El procés associat al pla de control es desencadena quan un node d'entrada a la xarxa OBS vol transmetre una ràfega. En aquest instant, el node d'entrada (*ingress node*) ha de comprovar si la transmissió de la ràfega es pot programar sobre algun enllaç de sortida en direcció al destí utilitzant un mecanisme d'*scheduling*. En cas que la transmissió sigui possible, es realitza la reserva i s'envia el paquet de control amb la informació pertinent al següent node OBS en direcció al node de sortida de la xarxa OBS (*egress node*). Per altra banda, si la transmissió de la ràfega no es pogués realitzar, es retarda la seva programació per tal d'intentar-ho novament passat un cert interval de temps.

Quan un node intermedi de la xarxa OBS rep un paquet de control, n'analitza el contingut per tal de comprovar si els recursos sol·licitats (interval de transmissió i longitud d'ona) estan disponibles en algun enllaç en direcció al node de sortida de la xarxa. En cas que els recursos sol·licitats estiguin disponibles, es realitza la reserva i es transmet el paquet de control al següent node de la xarxa. Si els recursos no estan disponibles, cal aplicar un mecanisme de resolució de contencions per tal d'intentar encabir la transmissió de la ràfega, ja que en cas contrari la ràfega serà descartada quan arribi al node que no ha pogut programar-ne la transmissió sobre cap dels enllaços de sortida.

A continuació es presenten, en forma de pseudo-codi, les principals funcions que duu a terme el simulador i que estan associades a la generació del paquet de control al node d'entrada a la xarxa OBS i al processat, per part d'un node intermedi, d'aquest paquet de control.

### *Generació del paquet de control*

```

while ( enllaços de sortida per comprovar ) {
  if ( destí entrada de taula de routing = destí de ràfega ) {
    calcular l'offset entre paquet de control i ràfega;
    if ( mecanisme d'scheduling pot programar la ràfega ) {
      generar i enviar el paquet de control;
      return(true);
    }
  }
}

retardar la petició de programació de la ràfega;
return(false);

```

### *Processat del paquet de control*

```

if ( node que processa el paquet de control = node de sortida )
  alliberar paquet de control;

else {
  while ( ports de sortida per comprovar ) {
    if ( destí entrada de taula de routing = destí de ràfega ) {

      if ( la reserva és pot realitzar ) {
        reserva realitzada;
        enviar paquet de control al següent node;
        return(true);
      }

      else if ( mecanisme de resolució de contencions ) {
        if ( reserva possible aplicant resolució de contencions ) {
          reserva realitzada;
          enviar paquet de control;

          return(true);
        }
      }
    }
  }
  eliminar paquet de control;
}

```

## **1.2.2. Mecanismes de resolució de contencions**

Els mecanismes de resolució de contencions s'apliquen quan, al processar el paquet de control, no es disposa dels recursos sol·licitats per a programar la transmissió de la ràfega associada.

Els mecanismes de resolució de contencions que s'han incorporat al simulador són els següents:

- Conversió de Longitud d'Ona (Conv)
- Fibres de Retard (FDL)
- Mecanismes combinats:
  - Conv + FDL
  - FDL + Conv

La disponibilitat d'un o altre mecanisme de resolució de contencions en cada node es fixa utilitzant un paràmetre que s'ha incorporat al fitxer de descripció de la topologia de la xarxa.

A continuació s'especifica la implementació que s'ha realitzat de cadascun dels mecanismes acompanyada d'una descripció en format pseudo-codi de les funcions principals.

#### 1.2.2.1. *Conversió de longitud d'ona (Conv)*

El mecanisme de conversió de longitud d'ona que s'ha incorporat al simulador permet realitzar conversió total, és a dir, en cas de contenció s'analitzen totes les longituds d'ona de l'enllaç de sortida per tal d'intentar programar la transmissió de la ràfega.

Un cop programada la transmissió de la ràfega sobre un enllaç de sortida, fent servir una longitud d'ona diferent de la utilitzada per arribar al node que realitza la conversió, es modifica la informació del paquet de control per tal que el següent node en direcció al destí intenti reservar els recursos necessaris sobre la nova longitud d'ona, reduint així el nombre de conversions que cal realitzar.

*Mecanisme de resolució de contencions utilitzant conversió de longitud d'ona*

```
while ( quedin longituds d'ona per comprovar a l'enllaç de sortida ) {  
  if ( longitud d'ona lliure en l'interval sol·licitat ) {  
    programar la transmissió a la longitud d'ona analitzada;  
    canviar l'identificador de longitud d'ona del paquet de control;  
    return(true);  
  }  
}  
return(false);
```

#### 1.2.2.2. *Fibres de retard (FDL)*

El mecanisme de resolució de contencions basat en l'ús de fibres de retard que s'ha programat al simulador permet configurar una o més fibres de retard per a totes les longituds d'ona d'un enllaç de sortida. A més, cada FDL té associat un determinat retard constant i configurable.

Quan un node processa un paquet de control i els recursos sol·licitats no estan disponibles, comprova si l'enllaç de sortida disposa de FDLs. En aquest cas, el node comprova si la longitud d'ona està disponible per a la transmissió de la ràfega tenint en compte el retard que proporcionen les FDLs.

En cas de disposar de més d'una FDL, s'intenta utilitzar les FDLs en ordre creixent de retard, de manera que el retard addicional en la transmissió de la ràfega sigui el menor possible. En aquest esquema no es realitza conversió de longitud d'ona, és a dir, només es pot utilitzar una FDL si la longitud d'ona utilitzada per a la transmissió de la ràfega està disponible a la fibra de retard en l'instant requerit.

Si s'utilitzen FDLs per a la transmissió d'una ràfega, cal modificar la informació del paquet de control, ja que la diferència temporal entre l'arribada del paquet de control al següent node i l'arribada de la ràfega es modifica degut al retard introduït per la FDL. Per tant, abans d'enviar el paquet de control al següent node cal sumar, al temps previst d'arribada de la ràfega, el temps que la ràfega romandrà confinada a la FDL.

#### *Mecanisme de resolució de contencions utilitzant fibres de retard*

```

if ( l'enllaç de sortida disposa de FDLs ) {
  while ( quedin FDLs per comprovar ) {
    if ( longitud d'ona a l'enllaç lliure en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$  ) {
      programar ús de la FDL en  $t_{arribada}$ ;
      programar enllaç de sortida en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$ ;
      actualitzar  $t_{arribada}$  del paquet de control;
      return(true);
    }
  }
}
return(false);

```

#### *1.2.2.3. Conv + FDL*

Aquest mecanisme combina la conversió de longitud d'ona amb l'ús de les fibres de retard, aplicant primer conversió de longitud d'ona i utilitzant després les fibres de retard només en el cas que la programació de la transmissió de la ràfega no hagi estat possible.

El procés que es segueix és el següent: quan un node intermedi, en processar un paquet de control, determina que els recursos sol·licitats no estan disponibles, intenta programar la transmissió de la ràfega realitzant conversió de longitud d'ona. En el cas que no sigui possible programar la transmissió en cap de les longituds d'ona d'algun enllaç de sortida en direcció al destí, s'intenta fer ús de les FDLs. És a dir, s'escull la FDL amb un menor retard i s'intenta programar la transmissió de la ràfega utilitzant alguna longitud d'ona tenint en compte el retard de la FDL analitzada. El procés es repeteix fins que es realitza la programació de la transmissió de la ràfega o fins que s'han comprovat totes les FDLs (per ordre creixent de retard).

*Mecanisme de resolució de contencions per a conversió + fibres de retard*

```

while ( quedin longituds d'ona per comprovar a l'enllaç de sortida ) {
  if ( longitud d'ona lliure en l'interval sol·licitat ) {
    programar la transmissió a la longitud d'ona analitzada;
    canviar l'identificador de longitud d'ona del paquet de control;
    return(true);
  }
}
if ( l'enllaç de sortida disposa de FDLs ) {
  while ( quedin FDLs per comprovar ) {
    while ( quedin longituds d'ona per comprovar ) {
      if ( longitud d'ona a l'enllaç lliure en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$  ) {
        programar ús de la FDL en  $t_{arribada}$ ;
        programar enllaç de sortida en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$ ;
        actualitzar  $t_{arribada}$  del paquet de control;
        canviar identificador de longitud d'ona al paquet de control;
        return(true);
      }
    }
  }
}
return(false);

```

*1.2.2.4. FDL + Conv*

Aquest mecanisme combina l'ús de fibres de retard i la tècnica de conversió de longitud d'ona, en aquest ordre. És a dir, quan es produeix contenció, s'intenta resoldre utilitzant les FDLs de l'enllaç de sortida i només en el cas que la contenció no es pugui resoldre amb les FDLs, s'intenta resoldre utilitzant conversió de longitud d'ona.

*Mecanisme de resolució de contencions basat en conversió + fibres de retard*

```

if ( l'enllaç de sortida disposa de FDLs ) {
  while ( quedin FDLs per comprovar ) {
    if ( longitud d'ona a l'enllaç lliure en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$  ) {
      programar ús de la FDL en  $t_{arribada}$ ;
      programar enllaç de sortida en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$ ;
      actualitzar  $t_{arribada}$  del paquet de control;
      return(true);
    }
  }
}
while ( quedin longituds d'ona per comprovar a l'enllaç de sortida ) {
  if ( longitud d'ona lliure en l'interval sol·licitat ) {
    programar la transmissió a la longitud d'ona analitzada;
    canviar l'identificador de longitud d'ona del paquet de control;
    return(true);
  }
  while ( quedin FDLs per comprovar ) {
    if ( longitud d'ona a l'enllaç lliure en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$  ) {
      programar ús de la FDL en  $t_{arribada}$ ;
      programar enllaç de sortida en  $t_{arribada} + \text{retard FDL}$ ;
      actualitzar  $t_{arribada}$  del paquet de control;
      canviar identificador de longitud d'ona al paquet de control;
      return(true);
    }
  }
}
return(false);

```

### **1.2.3. Pla de dades**

El pla de dades en una xarxa OBS engloba el procés de transmissió de les ràfegues d'informació entre el punt d'entrada (*ingress node*) i el punt de sortida (*egress node*). La transmissió de cada ràfega es realitza de forma transparent en el domini òptic sempre i quan el paquet de control hagi pogut reservar prèviament els recursos necessaris en tots els enllaços del camí.

## **CAPÍTOL 2. Comparativa via simulació**

### **2.1. Introducció als escenaris i paràmetres avaluats**

En aquest capítol es descriuen els escenaris i els paràmetres utilitzats per a realitzar la comparativa dels diferents mecanismes de resolució de contencions i es presenten els resultats obtinguts via simulació.

#### **2.1.1. Topologies de xarxa**

Les dues topologies utilitzades per avaluar els mecanismes de resolució de contencions en aquest projecte són les següents:

- Línia amb fonts connectades directament als nodes de la línia.
- Línia que interconnecta diverses estrelles amb fonts connectades als nodes externs d'aquestes

A continuació es detallen els paràmetres genèrics utilitzats en les simulacions. Les característiques específiques de cada topologia s'expliquen més endavant, al comentar els resultats obtinguts de les simulacions.

#### **2.1.2. Temps de procés**

Els principals events que requereixen temps de procés són els següents:

- Processat de la petició de transmissió d'una ràfega al node frontera d'entrada a la xarxa que genera la ràfega.
- Processat del paquet de control per part d'un node interior de la xarxa.

En ambdós casos, el temps de procés escollit per realitzar les simulacions és de 0.1 ns. Els motius pels quals s'ha escollit aquest temps de procés són els següents:

- Per raons d'eficiència, el temps de procés dels paquets de control ha de ser de l'ordre dels  $\mu$ s o inferior [5].
- Per tal d'avaluar els mecanismes de resolució de contencions, el temps de procés s'ha escollit suficientment petit per a que no influeixi en la probabilitat de pèrdua de ràfegues.

#### **2.1.3. Característiques de les fonts**

Les fonts utilitzades en les simulacions generen ràfegues de longitud constant seguint una distribució de Poisson. La longitud de les ràfegues està fixada a

12500 bytes. La transmissió d'aquestes ràfegues utilitzant longituds d'ona de 10 Gbps suposa un temps de transmissió de 10  $\mu$ s per ràfega. Cadascuna de les posicions dels vectors que els simulador utilitza per descriure la ocupació dels enllaços de la xarxa s'ha fixat a 10  $\mu$ s, valor que coincideix amb la longitud d'una ràfega.

El simulador permet configurar fonts que generen paquets, que posteriorment s'agrupen generant ràfegues en base a algun mecanisme d'agregació (*burst assembly*) basat en la longitud de la ràfega, en un temporitzador o en una solució híbrida de les dues anteriors. No obstant, en aquest cas el procés de generació de ràfegues pot no coincidir amb el procés d'arribada dels paquets, és per això que en aquest treball s'han configurat les fonts de manera que generin ràfegues seguint un procés d'arribada conegut.

#### 2.1.4. Offset

L'offset base, és a dir, els temps entre l'enviament del paquet de control i l'inici de la transmissió de la ràfega associada, s'ha fixat a 20  $\mu$ s per a tots els nodes de la xarxa.

Quan es processa una petició de transmissió d'una ràfega, en cas que no es pugui programar sobre cap enllaç de sortida en direcció al destí, la petició de transmissió es col·loca en una cua de peticions del node d'entrada a la xarxa per tal d'intentar programar la transmissió de la ràfega més endavant.

Per tal d'incrementar la possibilitat d'ubicar la transmissió de la ràfega, processant el mínim nombre de vegades possible la petició de transmissió, el simulador permet configurar un cert valor d'offset adicional a l'offset base. En les simulacions presentades en aquest projecte s'han realitzat proves utilitzant tres valors d'aquest offset adicional a l'offset base:

- Cas A. Offset base + 0  $\mu$ s d'offset adicional.
- Cas B. Offset base + 10  $\mu$ s d'offset adicional.
- Cas C. Offset base + 20  $\mu$ s d'offset adicional.

En la presentació dels resultats de la simulació s'avalua l'impacte de l'ús d'aquest offset adicional utilitzant cadascun dels mecanismes de resolució de contencions.

#### 2.1.5. Paràmetres avaluats

Els paràmetres avaluats en la comparativa dels diferents mecanismes de resolució de contencions són els següents:

- Probabilitat de pèrdua.

Per tal d'avaluar i comparar les diferents propostes i analitzar la diferència, en cas d'existir, entre les pèrdues de ràfegues de cada font,



s'ha calculat la probabilitat de pèrdua de ràfegues per font. L'expressió utilitzada per a realitzar aquest càlcul és la següent:

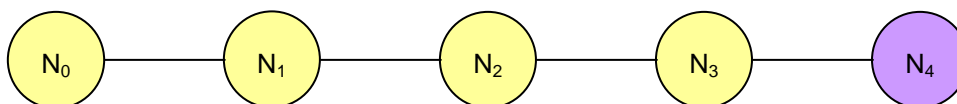
$$PP = \frac{N^{\circ} \text{ Ràfegues Perdudes}}{N^{\circ} \text{ Ràfegues Generades}}$$

- Retard.

El retard es comptabilitza des de l'instant que es genera la petició d'enviament d'una ràfega fins que la ràfega arriba al destí. No obstant, com que el retard de propagació no depèn del mecanisme de resolució de contencions utilitzat i la longitud de les ràfegues és constant, els resultats que es presenten com a resultats de les simulacions no inclouen el retard de propagació entre la font i el destí ni el temps de transmissió d'una ràfega. D'aquesta manera és possible comparar els resultats de les diferents fonts i avaluar exclusivament el retard addicional que introdueix cada mecanisme de resolució de contencions.

## 2.2. Una topologia de xarxa senzilla: la línia

La topologia del primer escenari utilitzat en les simulacions, per a realitzar la comparativa dels diferents mecanismes de resolució de contencions, consisteix en 5 nodes interconnectats linealment, tal i com mostra la **Fig. 2.1**.



**Fig. 2.1** Topologia de xarxa en línia amb 5 nodes i 4 fonts

En aquest escenari, els nodes N0, N1, N2 i N3 disposen d'una font directament connectada (en total 4 fonts); mentre que N4 és el destí per a tot el tràfic generat. Resultats previs de simulació van demostrar que, tot i que la probabilitat de pèrdua de ràfegues per font en aquest escenari depèn directament de la posició dels nodes a la línia (les fonts més allunyades tenen una probabilitat de pèrdua major), el fet d'incrementar el nombre de nodes no feia variar els resultats, és a dir, per a les fonts més allunyades s'obtenien probabilitats de pèrdua del mateix ordre independentment del nombre de nodes (sempre que les fonts tinguessin totes un comportament equivalent). Aquest és el motiu pel qual s'ha escollit l'escenari amb 5 nodes per a presentar els resultats.

### 2.2.1. Xarxa sense mecanismes de resolució de contencions

Prèviament a l'avaluació dels diferents mecanismes de resolució de contencions, es presenten els resultats obtinguts sobre la xarxa amb topologia

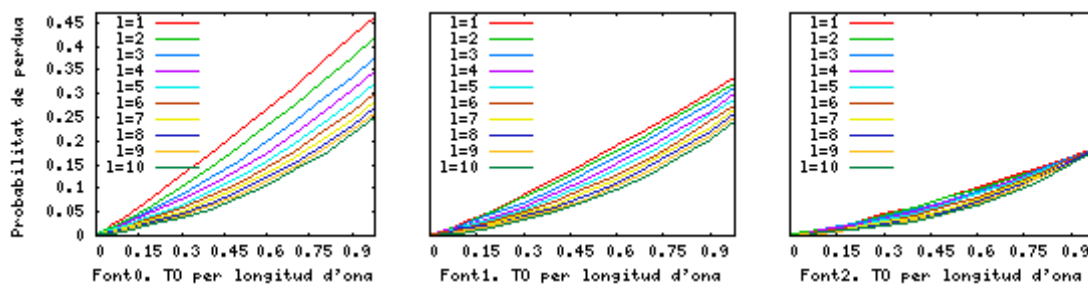
lineal quan no es disposa de cap tipus de mecanisme de resolució de contencions.

Els resultats presentats són els obtinguts per a  $L = \{1-10\}$  (on  $L$  o  $l$  denota el nombre de longituds d'ona presents a cada enllaç), i un tràfic ofert per longitud d'ona que varia entre 0.001 i 0.98. Aquest tràfic és el que s'oferiria per longitud d'ona sobre l'enllaç més carregat si no hi haguessin pèrdues. En aquest escenari s'ha avaluat el retard extrem a extrem i la probabilitat de pèrdua de ràfegues en funció del tràfic ofert en cadascun dels tres esquemes d'inserció de ràfegues comentats anteriorment (A,B,C).

### 2.2.1.1. Probabilitat de pèrdua

#### Situació de les fonts a la xarxa

Els resultats de la simulació mostren que la probabilitat de pèrdua de ràfega per font augmenta conforme les fonts estan més allunyades del destí (**Fig. 2.2**). La probabilitat de pèrdua de la font connectada a N3 és sempre zero, ja que, degut a la topologia de línia, aquest node veu les reserves de tots els nodes  $i$ , per tant, pot retardar la transmissió de les ràfegues pròpies fins que l'enllaç de sortida estigui lliure. Conforme més lluny estan les fonts, menys coneixement tenen de l'ocupació dels enllaços posteriors i per tant, com més nodes intermedis hagi de travessar la transmissió d'una ràfega, més s'incrementa la probabilitat de trobar l'enllaç ocupat i major és la seva probabilitat de pèrdua.



**Fig. 2.2** Probabilitat de pèrdua per font en funció de  $L$  sense resolució de contencions (Cas B)

#### Increment del nombre de longituds d'ona

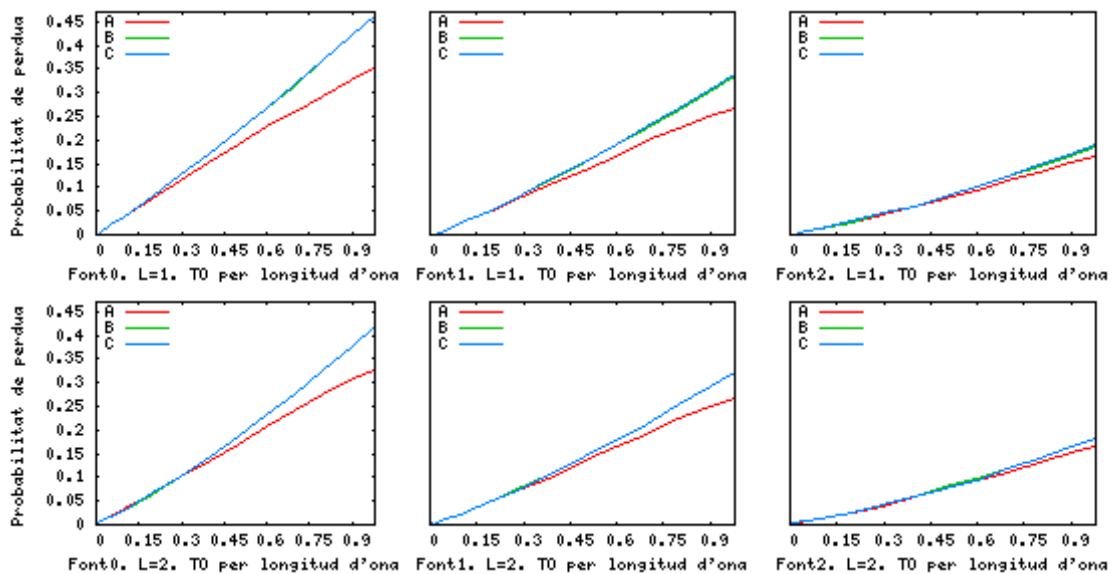
A la **Fig. 2.2** s'observa que la probabilitat de pèrdua disminueix a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona dels enllaços, ja que els nodes OBS programen la transmissió de les ràfegues de forma balancejada. Quan els enllaços de sortida disposen de múltiples longituds d'ona, en el cas que una font generi un conjunt de peticions d'enviament de ràfega molt seguides en temps, el node que en programa la transmissió les distribueix sobre les diferents longituds d'ona de les que disposa l'enllaç de sortida. Amb una única longitud d'ona, en canvi, les ràfegues es programen l'una rera l'altra sobre la mateixa longitud d'ona, generant grups de ràfegues consecutives d'una mateixa

font sobre una mateixa longitud d'ona, fet que n'incrementa la probabilitat de col·lisió.

### Comparativa per als diferents casos d'offset adicional (A, B, C)

Comparant la probabilitat de pèrdua de ràfegues obtinguda en els tres casos d'offset adicional avaluats (**Fig. 2.3**), s'observa que l'increment del nombre de longituds d'ona no influeix en els resultats obtinguts per a cada cas.

No obstant, la probabilitat de pèrdua en el cas A és inferior que en els casos B i C. Aquesta diferència de comportaments és atribuïble a la manera com es programen les ràfegues en cadascun dels casos. La combinació de la distribució del tràfic d'entrada juntament amb la variació de l'instant de procés del paquet de control pot explicar els resultats obtinguts. Als casos B i C, el fet de poder programar les ràfegues amb offset adicional fa que els paquets de control per a varies programacions arribin amb menys d'un slot temporal de separació entre ells al següent node, que al comportar-se de la mateixa manera, possiblement hagi programat més d'una ràfega, la qual cosa fa que el conjunt de ràfegues del node anterior no pugui ser programat i es perdi. En el cas A, en canvi, al fer-se les programacions d'una en una, existeixen més possibilitats de programar una segona ràfega, disminuint així la probabilitat de pèrdua respecte dels casos B i C.



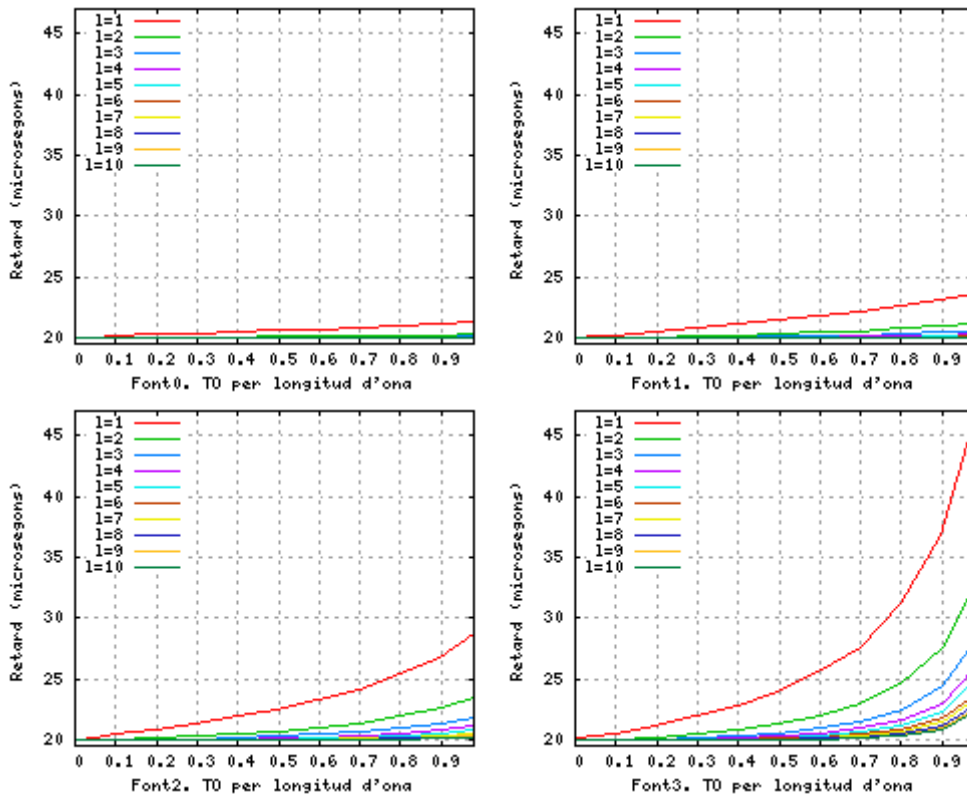
**Fig. 2.3** Comparativa de probabilitat de pèrdua per a A, B i C sense resolució de contencions (L=1 i L=2)

#### 2.2.1.2. Retard

##### Posició de les fonts a la xarxa

En funció de la posició de les fonts a la xarxa el retard adicional varia. El mínim valor d'aquest retard adicional és de 20  $\mu$ s per a totes les fonts, que es correspon amb el temps d'offset base.

Per altra banda, la font que pateix un major retard és la Font3 (**Fig. 2.4**), i això és degut a que és l'última font de la línia (connectada a N3) i com que tot el tràfic restant de la xarxa (el de les Fonts 0, 1 i 2) passa a través de N3, el node manté les seves ràfegues en cua fins que les pot programar; per tant, les ràfegues de la Font3 tenen una probabilitat de pèrdua nul·la a canvi d'un major retard en relació a la resta de fonts.



**Fig. 2.4** Retard per font en funció de L sense resolució de contencions (Cas A)

### *Increment del nombre de longituds d'ona als enllaços*

A mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona, el retard per a les ràfegues d'una font disminueix (**Fig. 2.4**). Aquest resultat és degut a que l'estadística de la generació de ràfegues correspon a un procés de Poisson, de manera que en un mateix slot de durada  $10\mu\text{s}$  es pot produir més d'una arribada, en base a:

(2.1)

$$\text{Pr ob}(k \text{ arribades en } T) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}$$

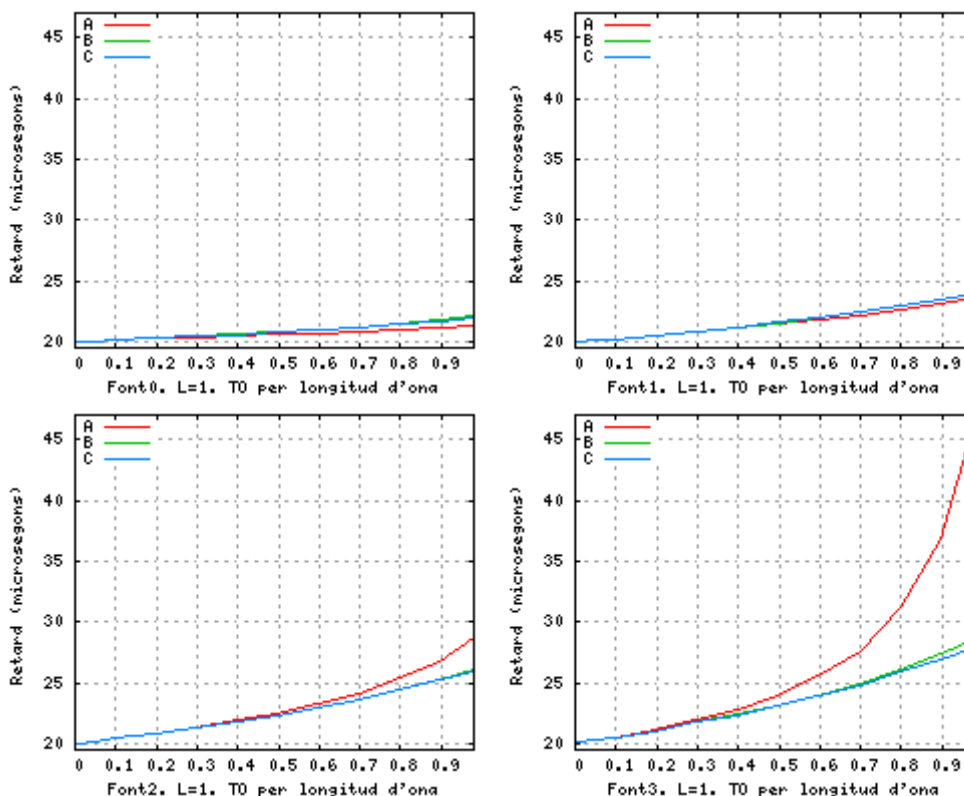
Quan es produeix més d'una arribada en un mateix slot i es disposa d'un nombre suficient de longituds d'ona, les ràfegues es poden programar sense haver-les de retardar.

Pel mateix motiu, la disminució del retard és menor a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona ja que la probabilitat que es produeixin k arribades en un interval T disminueix a mesura que k augmenta.

### Comparativa per als diferents casos d'offset adicional (A, B i C)

Comparant el retard obtingut per als tres casos d'offset adicional s'observa que en tots tres casos el retard augmenta conforme les fonts estan més pròximes al destí. No obstant, aquest augment és diferent en funció de l'offset adicional utilitzat (**Fig. 2.5**).

Per a la Font0 i la Font1 el retard és pràcticament igual en els tres casos d'offset adicional avaluats. No obstant, per a la Font2 i encara més per a la Font3, el retard és major en el cas A que en els casos B i C. Les fonts més allunyades, com la Font0 o la Font1, veuen els enllaços pràcticament buits, per tant programen en base a l'esquema configurat, en funció del seu procés d'arribada, i amb independència de l'estat de la xarxa, la qual cosa fa que el seu retard sigui menor i que la diferència entre casos sigui mínima. Per altra banda, les fonts més properes al destí es veuen més afectades per l'esquema utilitzat ja que l'ús d'un offset adicional modifica el rang de visibilitat de l'enllaç de sortida així com l'ordre de processat dels paquets de control i això es reflexa en la programació de les ràfegues sobre la línia.



**Fig. 2.5** Comparativa de retard per A, B i C sense resolució de contencions

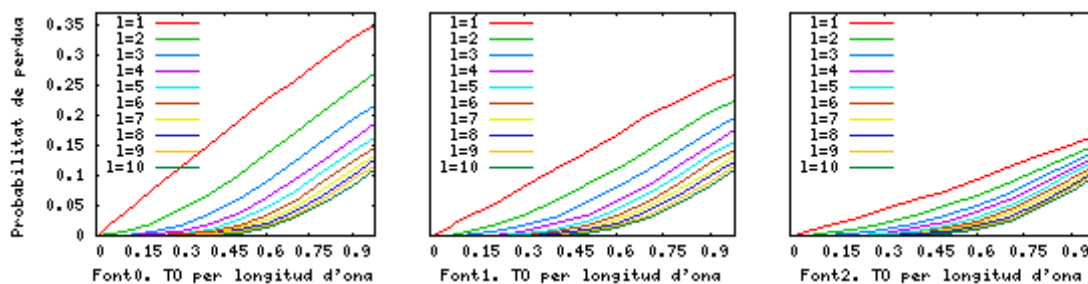
## 2.2.2. Conversió de longituds d'ona

El primer mecanisme de resolució de contencions avaluat és la conversió total de longitud d'ona. En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts via simulació.

En les proves realitzades, tots els nodes de la xarxa disposen de convertidors de longitud d'ona, és a dir, quan es produeix contenció de ràfegues en qualsevol enllaç intermedi, el node que la detecta intenta utilitzar qualsevol de les longituds d'ona restants del port de sortida per programar la transmissió de les ràfegues. El nombre de longituds d'ona varia entre 1 i 10 a tots els enllaços, i el valor de TO s'incrementa des de 0.001 fins a 0.98 per longitud d'ona (TO és el tràfic que s'oferiria a l'enllaç més proper al destí si no hi haguessin pèrdues).

### 2.2.2.1. Probabilitat de pèrdua

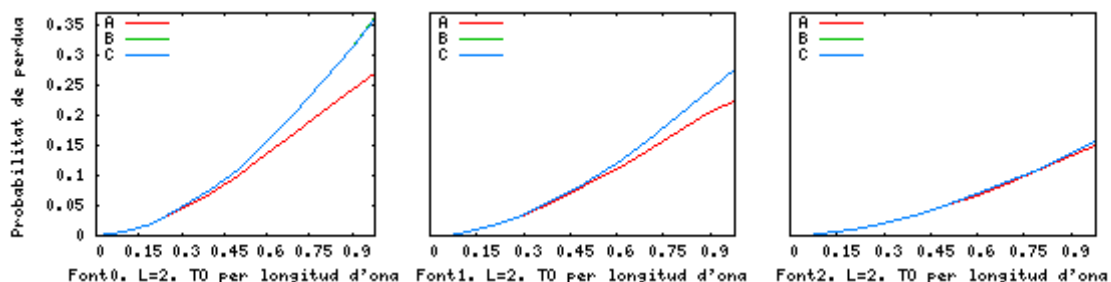
Pel que fa a la probabilitat de pèrdua de ràfegues (**Fig. 2.6**), igual que succeeix sense mecanismes de resolució de contencions, disminueix a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona; i és menor conforme les fonts estan més properes al destí. És a dir, les observacions realitzades quan no es disposa de mecanismes de resolució de contencions continuen sent vàlides.



**Fig. 2.6** Probabilitat de pèrdua per font en funció de L amb conversió de longitud d'ona (Cas A)

A més, tal com és d'esperar, a igual nombre de longituds d'ona, sempre que  $L > 1$ , la probabilitat de pèrdua de ràfegues és menor utilitzant conversió de longitud d'ona que en el cas de no utilitzar cap mecanisme de resolució de contencions.

### Comparativa per als diferents casos d'offset addicional (A, B, C)



**Fig. 2.7** Comparativa de probabilitat de pèrdua per A, B i C amb conversió de longitud d'ona ( $L=2$ )

Analitzant els resultats obtinguts per a cadascun dels casos d'offset adicional (**Fig. 2.7**) s'observa el mateix comportament obtingut en el cas de no utilitzar cap mecanisme de resolució de contencions, és a dir, la diferència entre esquemes es redueix a mesura que la font està situada en un node més proper al destí. Aquest comportament es manté encara que s'incrementi el nombre de longituds d'ona tot i que la probabilitat de pèrdua es redueix.

### 2.2.2.2. Retard

El mecanisme de conversió de longituds d'ona no introdueix cap tipus de retard adicional en la transmissió de les ràfegues; els valors de retard obtinguts a partir de les simulacions coincideixen amb els del cas en que no es fan servir mecanismes de resolució de contencions i no es mostren en aquest apartat.

### 2.2.3. Fibres de retard (FDLs)

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts via simulació utilitzant el mecanisme de resolució de contencions basat en l'ús de fibres de retard.

En aquest cas, els cinc nodes de la xarxa disposen de FDLs amb les mateixes característiques, és a dir, quan es parla d'una única FDL de retard fix significa que tots els nodes disposen d'aquesta FDL i amb aquest retard. D'altra banda, les FDLs estan associades a un port de sortida i cada FDL té el mateix nombre de longituds d'ona que l'enllaç de sortida; per exemple, si es configuren 2FDL a un node, amb retard  $\tau_1$  i  $\tau_2$  respectivament, cada port de sortida disposarà de 2FDLs, una amb un retard  $\tau_1$  i l'altra amb un retard  $\tau_2$ , i a cadascuna d'aquestes FDLs hi haurà un nombre de longituds d'ona igual al nombre de longituds d'ona que hi ha a l'enllaç de sortida. Es defineix  $\tau = 1\tau = 10\mu\text{s}$ .

El nombre de longituds d'ona en les simulacions varia entre 1 i 4, es consideren els tres casos d'offset adicional (A, B i C) explicats anteriorment i es defineixen les següents configuracions de fibres de retard per a cada cas:

- Cas A.
  - Offset base de  $20\mu\text{s} + 0\mu\text{s}$  d'offset adicional.
  - Nodes amb 1FDL amb retard  $1\tau$ .
- Cas B
  - Offset base de  $20\mu\text{s} + 10\mu\text{s}$  d'offset adicional.
  - Nodes amb 1FDL amb retard  $1\tau$  i  $2\tau$ .
  - Nodes amb 2FDLs amb retard  $\tau = \{1,2\}$ .
- Cas C
  - Offset base de  $20\mu\text{s} + 20\mu\text{s}$  d'offset adicional.
  - Nodes amb 1FDL amb retard  $1\tau$ ,  $2\tau$  i  $3\tau$ .
  - Nodes amb 2FDLs amb retard  $\tau = \{1,2\}$ .
  - Nodes amb 3FDLs amb retard  $\tau = \{1,2,3\}$ .

### 2.2.3.1. Probabilitat de pèrdua

#### Cas A

Partint de l'esquema A, i equipant tots els nodes amb una fibra de retard  $1\tau$  ( $10\ \mu\text{s}$ ) la probabilitat de pèrdua per a totes les fonts de la xarxa és nul·la.

Aquest fenomen es produeix per dos motius: la topologia de xarxa i la manca d'offset addicional a l'offset base. La disposició de les fonts a la xarxa i el fet que estiguin directament connectades als nodes, implica que cada node tingui constància de les programacions dels nodes precedents, de manera que pot retardar les programacions de les pròpies ràfegues. Per altra banda, al no disposar d'offset addicional, únicament es poden programar les ràfegues utilitzant l'offset base (i no més enllà en el temps). A més, si l'enllaç està ocupat el node que té la font connectada pot retardar-ne la programació sense que hi hagi pèrdues.

Per tant, en aquest escenari, l'únic cas possible de contenció és aquell en el qual un node ha programat la transmissió d'una ràfega pròpia, i rep un paquet de control del node anterior que vol reservar els mateixos recursos. Com que aquests recursos ja han estat reservats per la ràfega del propi node, si no es disposa de mecanismes de resolució de contencions la ràfega del node anterior es perd. Però al treballar amb un sistema ranurat i disposant d'1FDL amb un retard de  $10\ \mu\text{s}$  (que es justament la longitud de les ràfegues), és possible retardar la ràfega del node anterior sobre l'enllaç de sortida a la ranura següent a la sol·licitada. Aquest fenomen es produeix node a node, donant com a resultat una probabilitat de pèrdua nul·la. Es pot dir per tant, que les ràfegues que utilitzen les fibres de retard es surten de la finestra de transmissió dels nodes, on la finestra de transmissió es defineix com l'interval temporal on un node és capaç de programar la transmissió de les seves ràfegues.

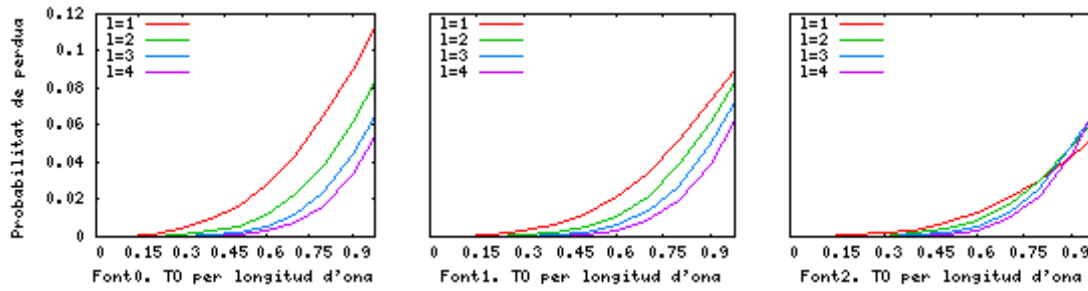
#### Cas B

L'observat a l'esquema A és aplicable als resultats de l'esquema B, on els nodes disposen d'un offset addicional de  $10\ \mu\text{s}$ .

En aquest cas, equipar els nodes amb una fibra de retard  $10\ \mu\text{s}$  no elimina la probabilitat de pèrdua, ja que la finestra de transmissió dels nodes s'ha ampliat, per tant les ràfegues que siguin retardades a les FDL també poden patir col·lisions degut a les ràfegues programades fent ús de l'offset addicional. A més a més, conforme s'incrementa el nombre de longituds d'ona, la probabilitat de pèrdua evoluciona seguint un comportament diferent per a cada font (**Fig. 2.8**).

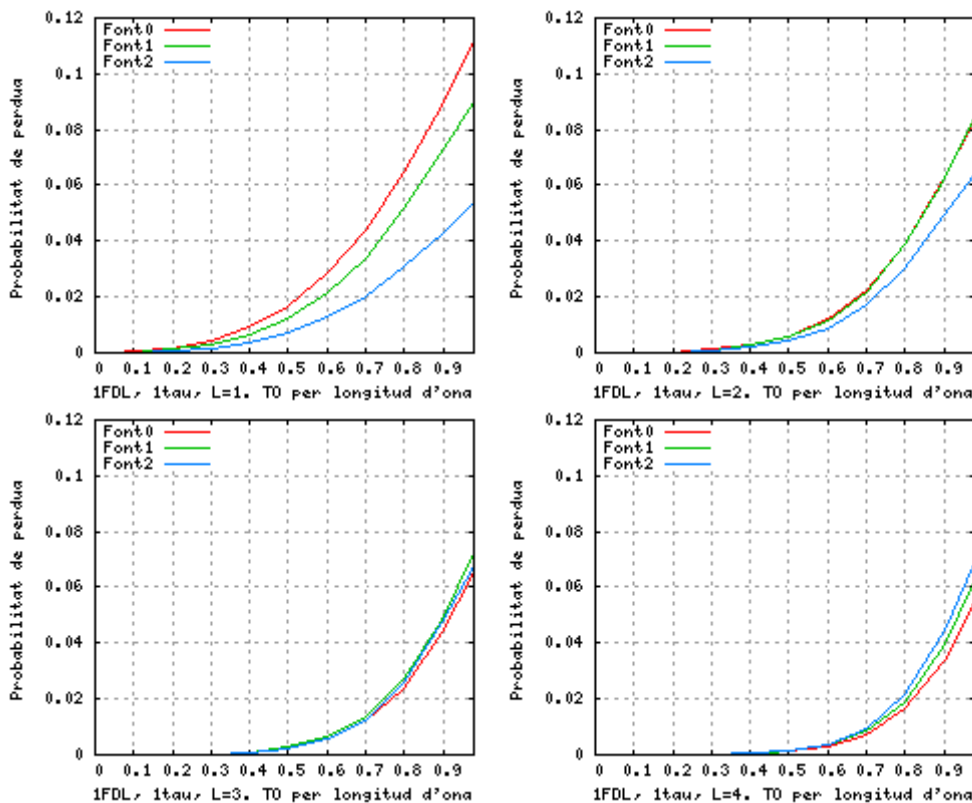
Incrementant el retard a  $20\ \mu\text{s}$  es torna a produir l'efecte explicat per al cas A i la probabilitat de pèrdua torna a ser nul·la. Aquest efecte s'ha comprovat per a dos casos: (1) amb una única FDL de retard  $20\ \mu\text{s}$  i (2) amb dues FDLs de  $10\ \mu\text{s}$  i  $20\ \mu\text{s}$ , respectivament. En ambdós casos la probabilitat de pèrdua de ràfegues per a totes les fonts és zero, no obstant hi ha variacions en el retard.





**Fig. 2.8** Probabilitat de pèrdua en funció de  $L$  amb 1FDL de retard  $10\mu\text{s}$  (Cas B)

Representant la probabilitat de pèrdua de ràfegues per font en funció del nombre de longituds d'ona de cada enllaç, s'observa que la Font0 experimenta un reducció de la probabilitat de pèrdua superior que la resta de fonts, sobretot per valors alts de tràfic. Aquest fenomen pot ser degut a que la variació de comportament en la programació de les ràfegues a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona es magnifica degut a la presència de les FDLs i, entre totes les fonts, la Font0, la més allunyada del node destí, és la que en treu un major benefici.



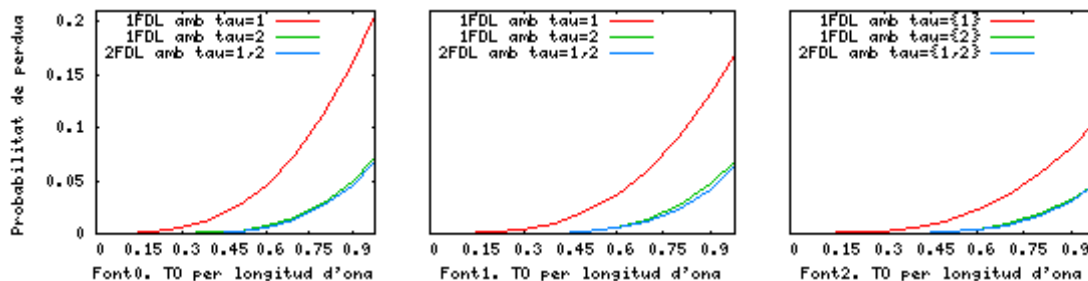
**Fig. 2.9** Probabilitat de pèrdua per  $L$  amb 1FDL de retard  $10\mu\text{s}$  (Cas B)

### Cas C

A l'esquema C, on es disposa d'un offset addicional de fins a  $20\mu\text{s}$ , la probabilitat de pèrdua és nul·la quan els nodes disposen d'1FDL amb retard de  $30\mu\text{s}$  o de tres FDLs de  $10$ ,  $20$  i  $30\mu\text{s}$ , respectivament. Com que la finestra de

transmissió és més gran, l'interval temporal on es possible que es produeix col·lisió també és superior; de manera que conforme s'augmenta l'offset addicional també cal augmentar el nombre de retardadors per aconseguir una probabilitat de pèrdua igual a zero.

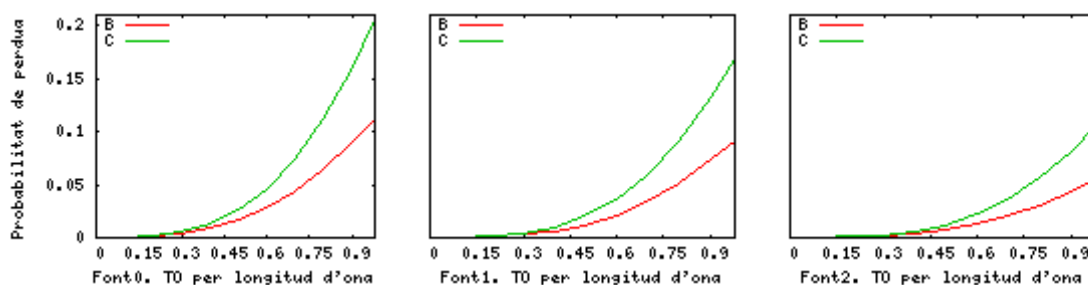
La **Fig. 2.10** mostra les diferents probabilitats de pèrdua de ràfega en funció del nombre de fibres de retard i de la seva longitud per a les diferents fonts. Es pot observar que la probabilitat de pèrdua de ràfegues és molt semblant quan es disposa d'una fibra amb retard 20  $\mu\text{s}$  o de dues fibres amb retards 10 i 20  $\mu\text{s}$ , respectivament. D'altra banda, la probabilitat de pèrdua de ràfegues en aquests dos casos és inferior a la que s'obté quan es disposa d'una única FDL amb un retard de 10  $\mu\text{s}$ ; aquest fet és degut a que hi ha una diferència real en la capacitat de retardar ràfegues d'una FDL d'1tau, respecte d'una FDL de 2tau o de 2FDLs; ja que aquestes últimes permeten retardar més ràfegues de forma simultània.



**Fig. 2.10** Probabilitat de pèrdua per font en funció del nombre i tipus de FDLs (Cas C i  $L=1$ )

#### *Comparativa per als diferents casos d'offset addicional (A, B, C)*

A continuació es comparen els resultats obtinguts utilitzant els esquemes B i C amb una única FDL que proporciona un retard de 10  $\mu\text{s}$ .



**Fig. 2.11** Comparativa de probabilitat de pèrdua per B i C amb 1FDL de retard 10  $\mu\text{s}$  ( $L=1$ )

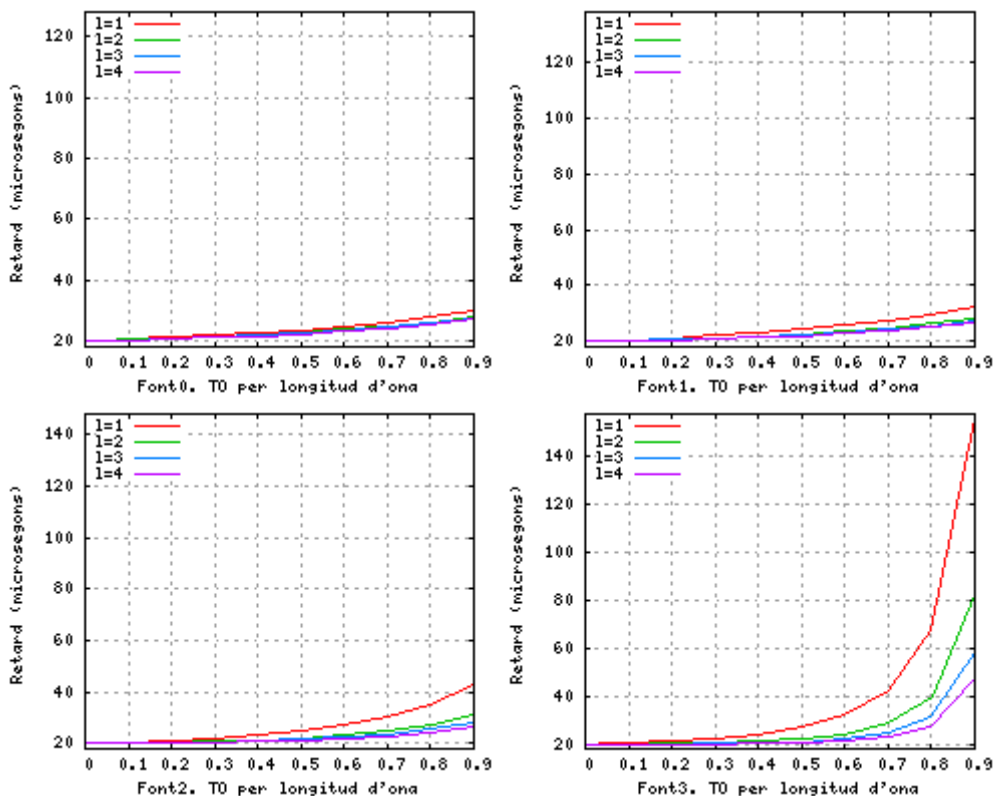
A la **Fig. 2.11** s'observa que la probabilitat de pèrdua de ràfegues per cada font és inferior en el cas B que en el cas C. El mateix comportament s'observa per a  $L>1$ . En el cas C, un node pot programar les seves ràfegues abans, ja que pot fer programacions amb un offset addicional de 10 o 20  $\mu\text{s}$ , mentre que en el cas

B únicament ho pot fer utilitzant un offset addicional de 10  $\mu$ s. Això fa empitjorar la probabilitat de pèrdua en el cas C respecte el cas B, ja que els nodes poden programar més ràfegues pròpies, perjudicant així el tràfic que prové d'altres nodes situats més lluny del node destí.

### 2.2.3.2. Retard

Analitzant el retard per font per a cada cas particular d'offset addicional, s'observa que la font més perjudicada és la Font3 (**Fig. 2.12**) ja que el node al qual està directament connectada ha de cursar el tràfic provinent de la resta de fonts de la línia i per tant li resulta més difícil ubicar la transmissió de les seves pròpies ràfegues. La seva posició (és la font més propera al node destí) provoca que tingui pèrdues nul·les a canvi d'experimentar el major retard addicional en la transmissió de les seves ràfegues.

El retard per a la Font0 és pràcticament el mateix en tots els casos, donat que és la font més allunyada i el node al qual està connectada no ha de gestionar més tràfic que el propi. A mesura que nodes estan situats més a prop del node destí, han de cursar més tràfic i, per tant, el retard que experimenten les ràfegues de la font que tenen directament connectada és superior.



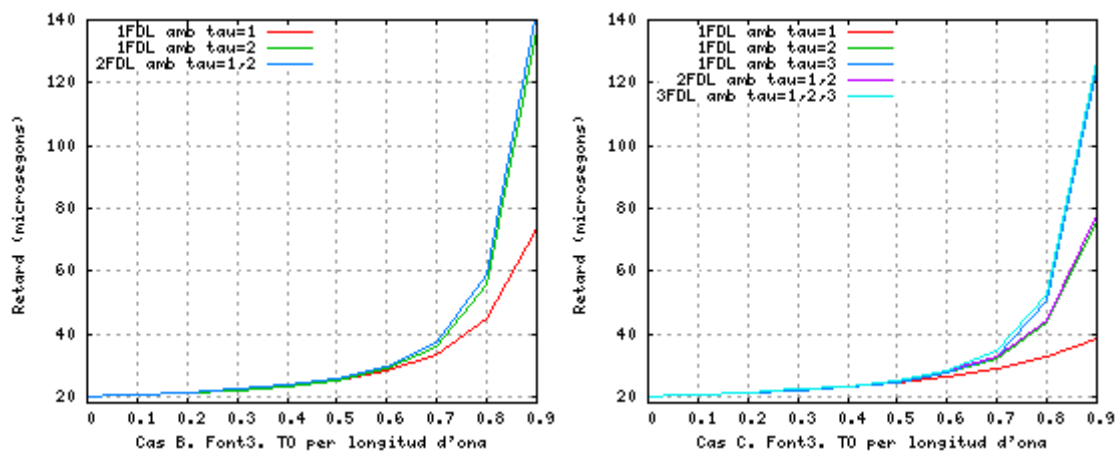
**Fig. 2.12** Retard per font en funció de L amb 1FDL de retard 10  $\mu$ s (Cas A)

A més a més, a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona disponibles a l'enllaç de sortida, disminueix el retard per font (tal com succeeix sense mecanismes de resolució de contencions).

### Retard en funció de la longitud i el nombre de fibres de retard

Tant en el cas B com en el cas C, comparant el retard obtingut quan es disposa d'una FDL de 20  $\mu\text{s}$  amb el retard obtingut quan es disposa de dues FDLs de 10 i 20  $\mu\text{s}$ , respectivament, s'observa que la diferència és molt petita (i major en el cas de dues FDL). Quan es disposa de dues FDLs es poden retardar ràfegues que necessitin 10 o 20  $\mu\text{s}$  de retard i aquest fet implica una reducció de la probabilitat de pèrdua respecte al cas d'utilitzar una única FDL de 20  $\mu\text{s}$ , a canvi d'un lleuger increment del retard.

Aquest fenomen es torna a manifestar en el Cas C contrastant els resultats de retard obtinguts utilitzant 3FDLs de 10, 20 i 30  $\mu\text{s}$ , respectivament, i utilitzant 1FDL de 30  $\mu\text{s}$ . No obstant, en aquest cas la probabilitat de pèrdua de ràfegues associada és zero.



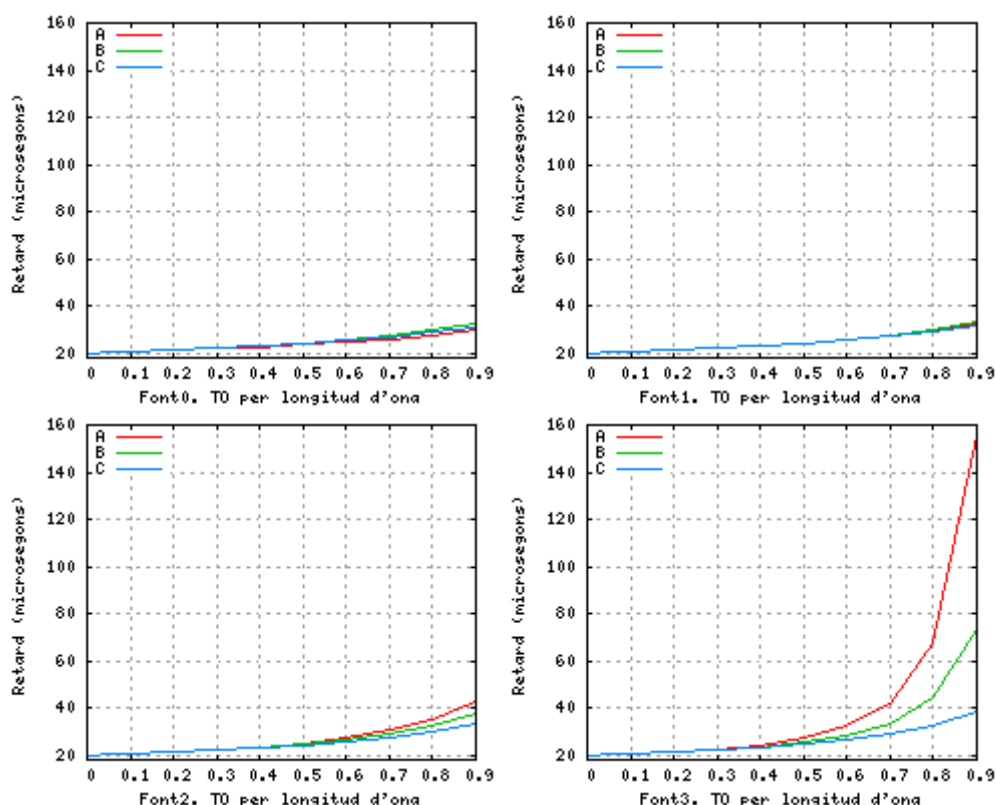
**Fig. 2.13** Retard en funció del nombre i tipus de FDLs (Font3, L=1)

### Comparativa per als diferents casos d'offset addicional (A,B,C)

La **Fig. 2.14** mostra el retard addicional per font en els casos A, B i C, amb L=1 i 1FDL de 10  $\mu\text{s}$ .

La Font3 és la que experimenta un major retard en tots els casos, tal i com es produeix en el cas de no disposar de mecanismes de resolució de contencions o utilitzant conversió de longitud d'ona. No obstant, la Font0 té un retard superior a l'obtingut en els altres dos casos ja que la Font0, al ser la més allunyada del destí, és la que utilitza més vegades les fibres de retard.

A diferència del que succeïa sense mecanismes de resolució de contencions o amb conversió de longitud d'ona, utilitzant fibres de retard existeix diferència entre els casos B i C en termes de retard. Aquest fet posa de manifest la incidència de l'elecció de l'offset addicional en el retard final en una xarxa com l'avaluada utilitzant FDLs.



**Fig. 2.14** Comparativa de retard per A, B i C amb 1FDL de retard  $10 \mu\text{s}$  ( $L=1$ )

### 2.2.4. Offset

Els resultats de l'apartat anterior, obtinguts utilitzant diferents esquemes d'offset addicional i FDLs de diferents longituds, revelen la possibilitat de reduir les pèrdues de ràfegues jugant amb l'offset base i els offsets addicionals. La topologia considerada i la posició de les fonts a la xarxa tenen una particularitat important: un determinat node té coneixement de totes les programacions de transmissió de ràfegues del node o nodes anteriors. Tenint en compte aquesta característica, és possible definir un esquema basat en definir offsets base diferents per a cada font en funció de la seva posició a la xarxa de tal manera que es redueixi la probabilitat de pèrdua de ràfegues. L'ús d'offsets base diferents per font apareix en algunes propostes per proporcionar QoS [22][23].

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts definint offsets base majors a mesura que la font està més allunyada del destí. Els valors fixats són:

- Font0: offset base de  $40 \mu\text{s}$
- Font1: offset base de  $30 \mu\text{s}$
- Font2: offset base de  $20 \mu\text{s}$
- Font3: offset base de  $10 \mu\text{s}$

Amb aquesta configuració i sense utilitzar offset addicional (cas A) es pot aconseguir que les finestres de transmissió de cada font siguin disjunctes i per

tant no hi hagi pèrdues. En aquest apartat també es presenten els resultats obtinguts per al cas B (amb un offset addicional de 10  $\mu$ s).

### 2.2.4.1. Probabilitat de pèrdua

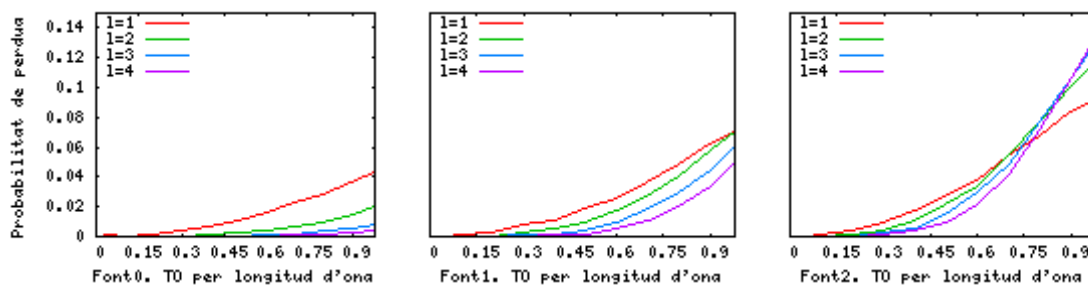
#### Cas A

En aquest cas la probabilitat de pèrdua és zero per a totes les fonts.

Sense offset addicional i utilitzant el mateix offset base per a totes les fonts, la programació d'una ràfega només es descarta quan el node que processa el paquet de control associat a la transmissió de la ràfega comprova que els recursos sol·licitats ja estan ocupats. No obstant, degut a la diferenciació de l'offset base, aquesta situació no es produeix, ja que els recursos sol·licitats queden fora de la finestra de transmissió dels nodes posteriors de la línia i per tant no és possible que hagin estat reservats.

#### Cas B

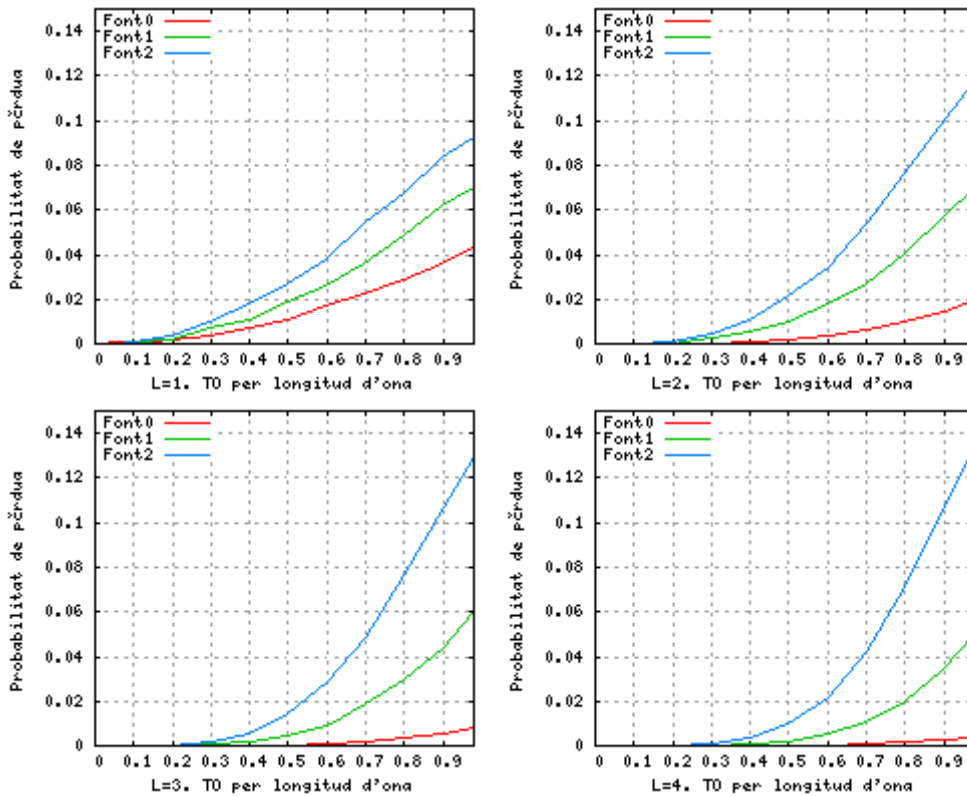
En aquest punt la probabilitat de pèrdua deixa de ser zero, i s'observa que, per a un mateix nombre de longituds d'ona, les fonts més allunyades del destí tenen una probabilitat de pèrdua menor que les més properes (**Fig. 2.15** i **Fig. 2.16**), a excepció de la Font3 que continua tenint pèrdues nul·les.



**Fig. 2.15** Probabilitat de pèrdua per font en funció del nombre de longituds d'ona utilitzant offsets base diferenciats (Cas B)

En el cas B s'utilitza un offset addicional de 10  $\mu$ s, per tant, tenint en compte la configuració d'offsets base utilitzats, les finestres de transmissió de les diferents fonts es solapen parcialment. Per aquest motiu hi ha pèrdues. No obstant, com que el solapament és parcial, la probabilitat de pèrdua és menor per a les fonts més llunyanes.

Per tal d'aconseguir pèrdues nul·les en el cas B caldria utilitzar offsets base separats 20  $\mu$ s.

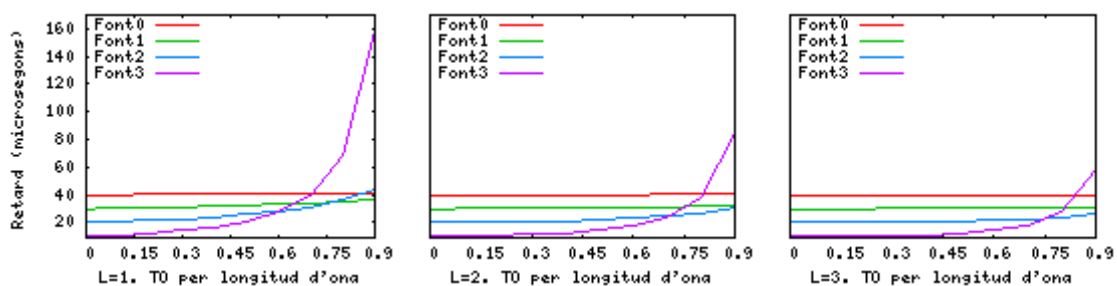


**Fig. 2.16** Probabilitat de pèrdua en funció del nombre de longituds d'ona utilitzant offsets base diferenciats (Cas B)

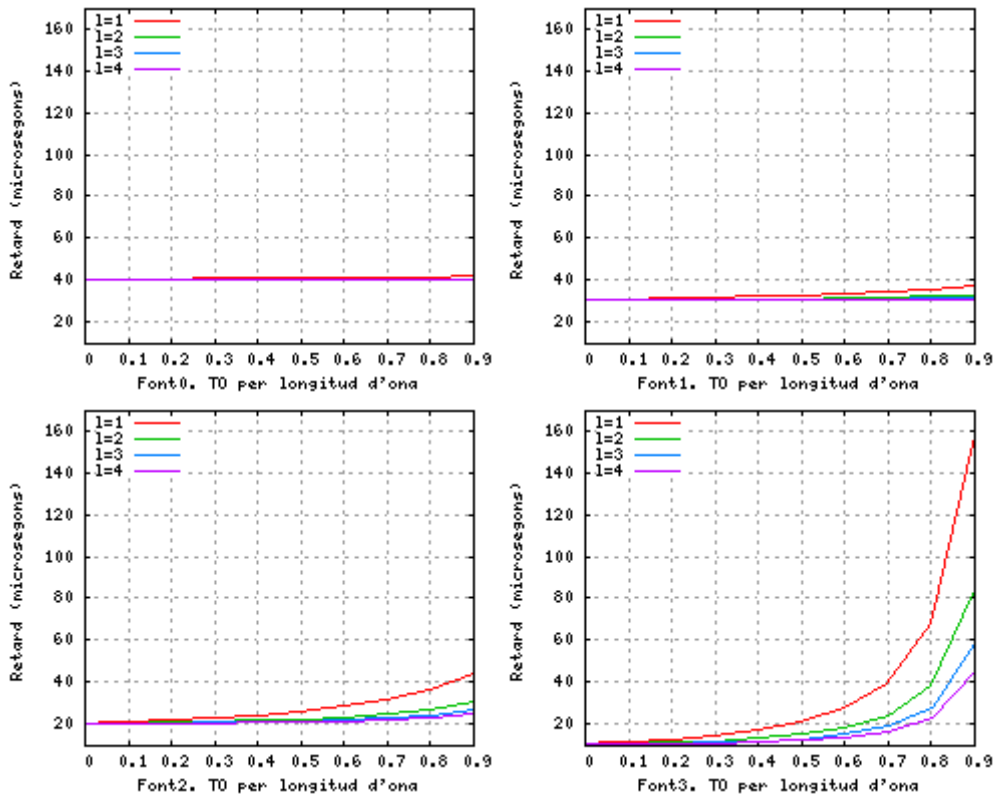
### 2.2.4.2. Retard

La diferenciació d'offsets té l'inconvenient que el retard addicional mínim per font, depèn de la seva ubicació a la xarxa: les fonts més allunyades del destí tenen un offset base major i per tant el retard addicional mínim és superior.

Per altra banda, a mesura que s'incrementa el tràfic, les fonts més properes al destí tenen un major increment del retard addicional degut a que els costa més trobar recursos disponibles per programar la transmissió de les seves pròpies ràfegues i, per tant, s'incrementa el temps d'espera en cua de les ràfegues abans d'iniciar-ne la transmissió. Aquest temps d'espera en cua és inferior per a un major nombre de longituds d'ona (**Fig. 2.17** i **Fig. 2.18**).



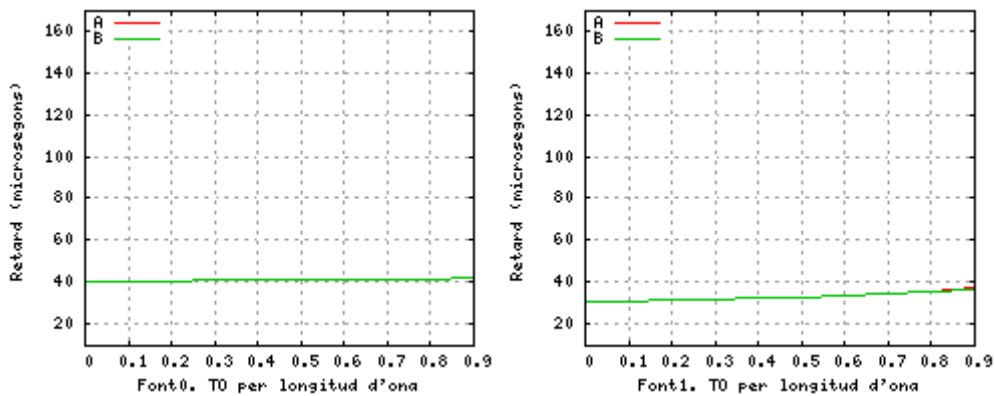
**Fig. 2.17** Retard per L amb offsets diferenciats (Cas A i L =1)



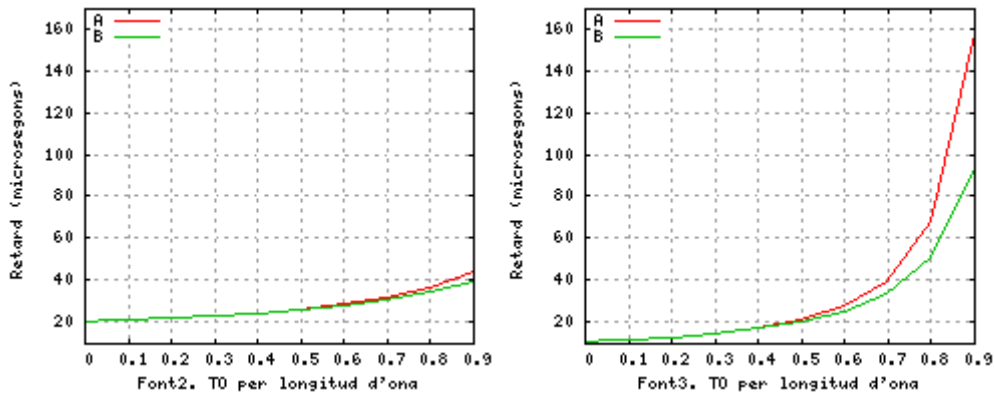
**Fig. 2.18** Retard per font amb offsets diferenciats (Cas A)

### Comparativa per als casos d'offset adicional (A,B)

Comparant els resultats obtinguts per al cas A i el cas B (**Fig 2.19**), s'observa que les fonts més allunyades presenten pràcticament el mateix comportament. A mesura que les fonts estan més properes al destí el retard augmenta en ambdós casos, essent superior en el cas A; el mateix comportament s'observa a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona (tot i que l'increment del retard per a les fonts més properes al destí és menor a major nombre de longituds d'ona).







**Fig. 2.19** Comparativa de retard per A i B amb offsets base diferenciats ( $L = 1$ )

### 2.2.5. Mecanismes combinats en la línia

En aquest apartat s'avalua el rendiment obtingut quan s'utilitzen conjuntament dos mecanismes de resolució de contencions: les fibres de retard i la conversió de longitud d'ona. La primera combinació es basa en l'ús de les fibres de retard per a resoldre els casos de contenció de ràfegues i, només en el cas que aquest mecanisme no permeti resoldre la contenció, s'utilitza conversió de longitud d'ona. La segona combinació es basa en utilitzar els mecanismes en l'ordre invers, és a dir, primer conversió de longitud d'ona i després fibres de retard. Es presenten els resultats obtinguts variant el nombre de longituds d'ona, d'1 a 4, i repetint la bateria de proves utilitzada per a l'avaluació de les FDLs.

#### 2.2.5.1. FDL + Conv

En aquest apartat s'avaluen els resultats obtinguts combinant els següents mecanismes de resolució de contencions en l'ordre que s'indica: (1er) fibres de retard i (2on) conversió de longitud d'ona.

##### 2.2.5.1.1 Probabilitat de pèrdua

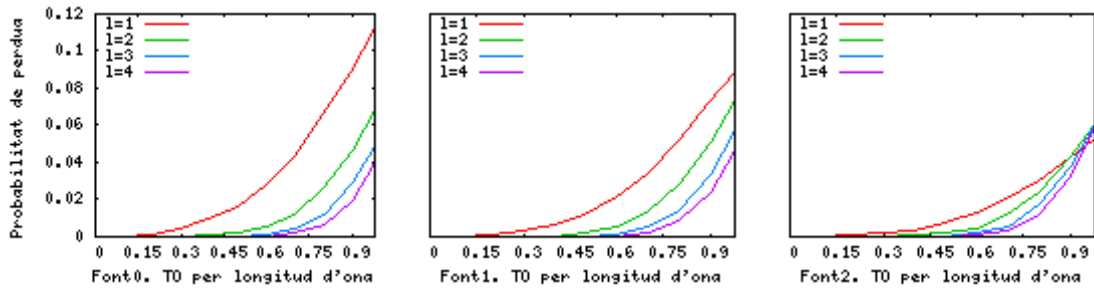
###### Cas A

Per al cas A, equipant els nodes amb una fibra de retard d'1tau ( $10 \mu s$ ), s'obté una probabilitat de pèrdua nul·la. Tal i com s'explica en l'apartat d'avaluació de les fibres de retard, aquest resultat és fruit de la topologia de xarxa utilitzada, la posició de les fonts i la manca d'offset addicional a l'offset base.

###### Cas B

En aquest cas, tal i com s'observa utilitzant únicament FDLs, hi ha pèrdues per 1FDL d'1tau, però no n'hi ha per a 1FDL de 2taus, o 2FDLs (d'1tau i 2taus, respectivament). La probabilitat de pèrdua, en cas d'existir, disminueix a

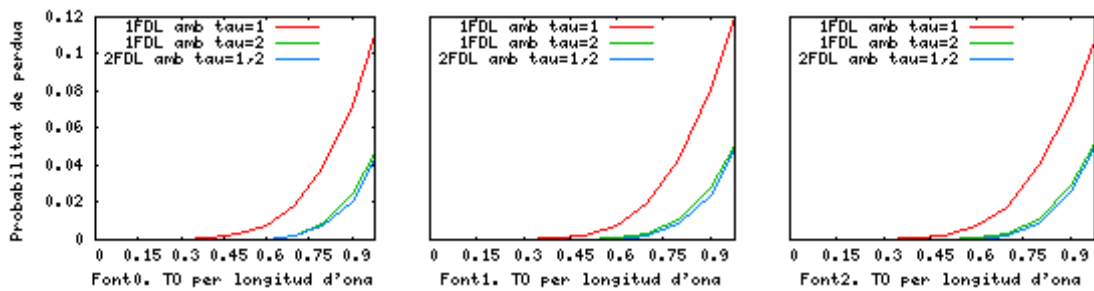
mesura que augmenta el nombre de longituds d'ona (**Fig 2.20**) i és inferior a l'obtinguda utilitzant únicament FDLs per  $L > 1$ .



**Fig. 2.20** Probabilitat de pèrdua en funció de  $L$  amb FDL + Conv (Cas B, 1FDL amb retard 1tau)

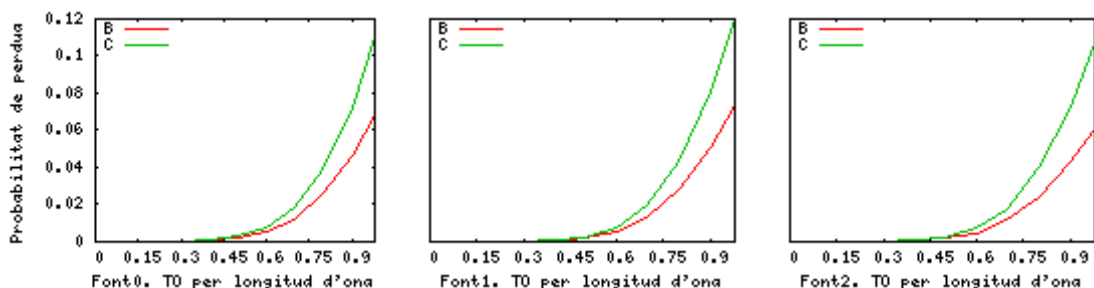
### Cas C

Per al cas C, la finestra de contenció augmenta. Per tant, tal i com s'observa utilitzant només FDLs, hi ha pèrdues amb 1FDL d'1tau o de 2tau, i amb 2FDLs d'1tau i 2tau, respectivament (**Fig. 2.21**).



**Fig. 2.21** Probabilitat de pèrdua en funció del nombre i tipus de FDLs, amb FDL + Conv ( $L=4$ , Cas C)

A diferència del que s'observa utilitzant únicament FDLs, la probabilitat de pèrdua per font per a 1FDL d'1tau és la mateixa en els casos B i C (**Fig. 2.22**); fenomen que es pot atribuir a l'ús de conversió de longitud d'ona.

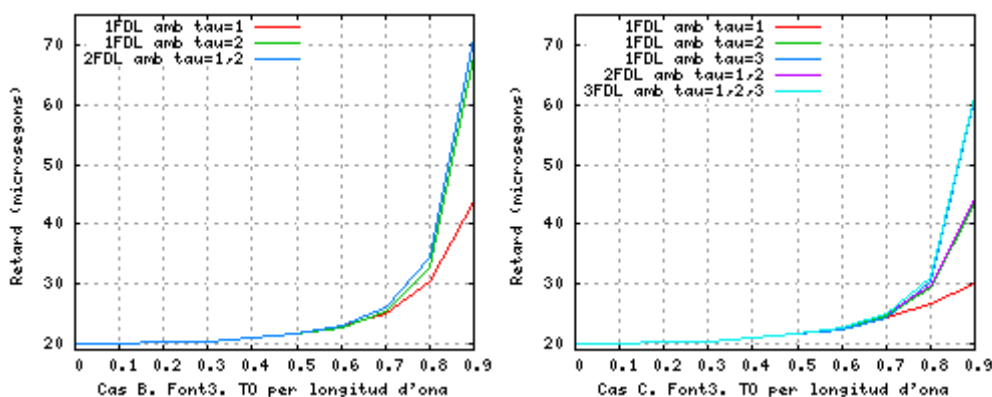


**Fig. 2.22** Probabilitat de pèrdua per als casos B i C, amb FDL + Conv ( $L=4$  i 1FDL de 1tau)

### 2.2.5.1.2 Retard

El retard és major a mesura que les fonts estan més properes al destí, i, per cada font disminueix a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona dels enllaços.

Comparant els resultats amb els obtinguts quan només es disposa de FDLs, s'observa que el comportament és molt similar per a tots els casos d'offset adicional.



**Fig. 2.23** Retard per a diferent nombre i tipus de FDL amb FDL + Conv (Font3, L=4, Casos B i C)

### 2.2.5.2. Conv + FDL

En aquest apartat s'avaluen els resultats obtinguts combinant els següents mecanismes de resolució de contencions en l'ordre que s'indica: (1er) conversió de longitud d'ona i (2on) fibres de retard.

#### 2.2.5.2.1 Probabilitat de pèrdua

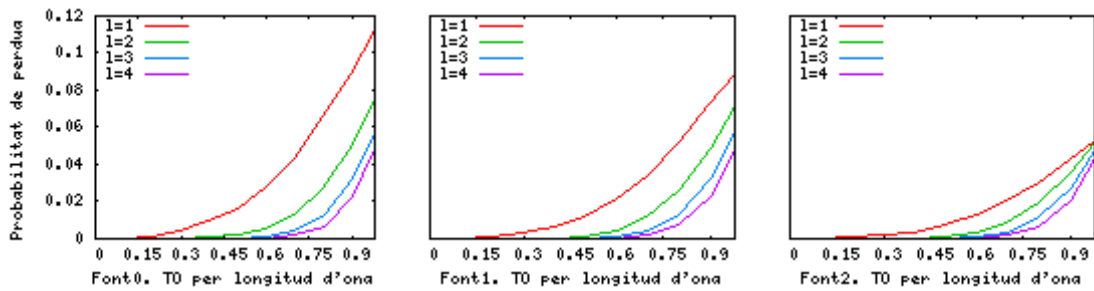
##### Cas A

En aquest cas, la probabilitat de pèrdua torna a ser zero per a totes les fonts, i qualsevol nombre de longituds d'ona, ja que cada node disposa d'1FDL de 10  $\mu$ s i no es configura offset adicional.

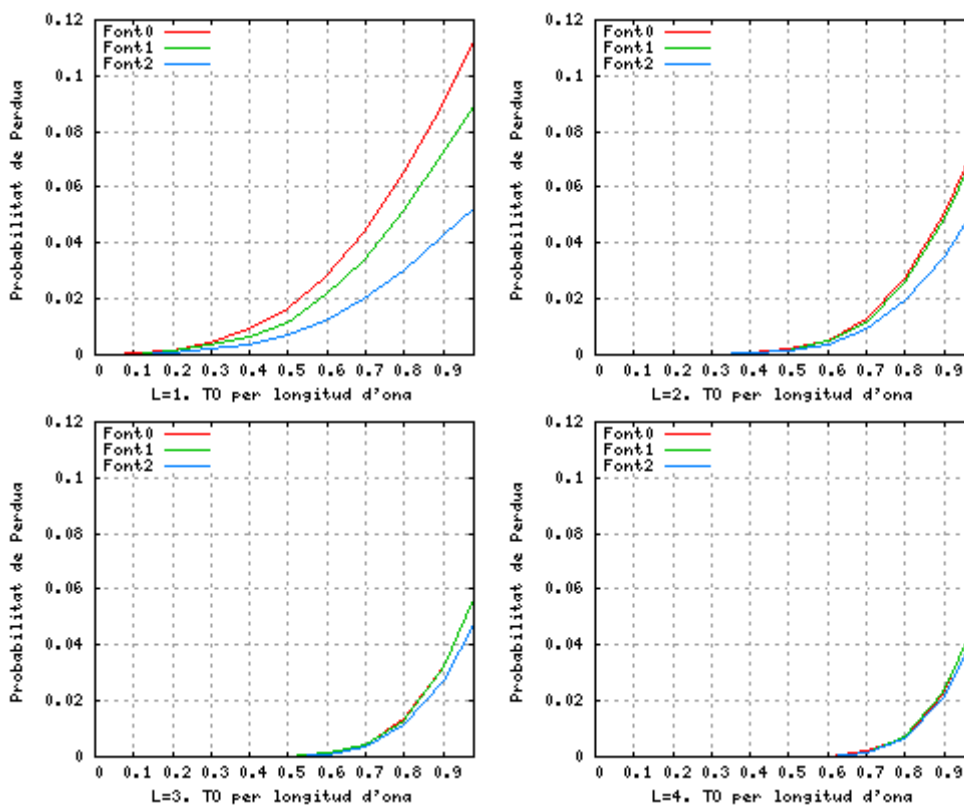
##### Cas B

En el cas B es produeixen pèrdues per a 1FDL d'1tau.

Novament, quan es produeixen pèrdues, la probabilitat de pèrdua per a les fonts més llunyanes és major que per a les fonts més pròximes al destí (**Fig. 2.24**), i la probabilitat de pèrdua per font disminueix a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona (**Fig. 2.25**).



**Fig. 2.24** Probabilitat de pèrdua per font en funció de L amb Conv + FDL (Cas B, 1FDL amb 1tau)

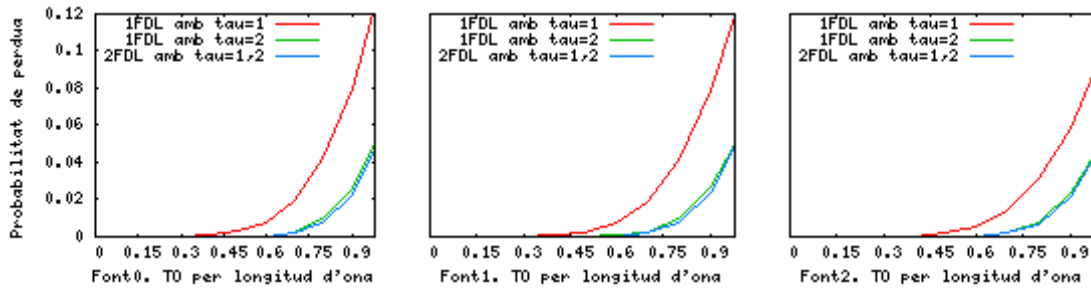


**Fig. 2.25** Probabilitat de pèrdua per L amb Conv + FDL (Cas B, 1FDL amb 1tau)

No obstant, a diferència del que succeeix utilitzant l'esquema FDL+Conv, totes les fonts experimenten el mateix comportament. És a dir, a mesura que L s'incrementa, la diferència entre les probabilitats de pèrdua per font es redueix, fins que totes elles tenen una probabilitat de pèrdua pràcticament igual. Aquest comportament s'assimila a l'observat en el cas d'utilitzar únicament el mecanisme de conversió de longitud d'ona. Això demostra que l'ordre en el qual es combinen la resolució de contencions mitjançant FDLs i conversió de longitud d'ona influeix directament en la probabilitat de pèrdua.

### Cas C

En el cas C, es produeixen pèrdues quan s'utilitza 1FDL d'1tau o de 2tau; i 2 FDLs d'1tau i 2tau (**Fig. 2.26**).



**Fig. 2.26** Probabilitat de pèrdua en funció del nombre i tipus de FDLs amb Conv + FDL (L = 2, Cas C)

2.2.5.2.2 Retard

En termes de retard, els resultats són molt similars als obtinguts en el cas FDL+Conv a igual nombre de longituds d'ona i no es mostren les gràfiques.

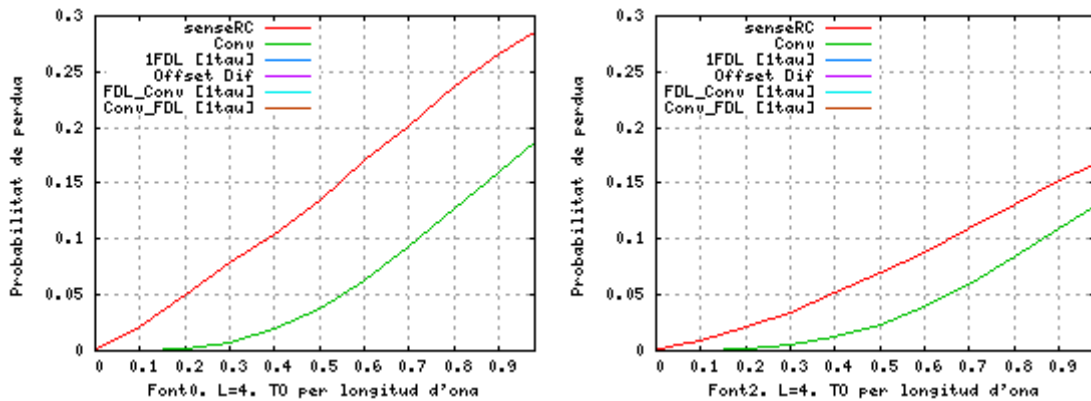
2.2.6. Comparativa de mecanismes a la línia

Per tal de mostrar les diferències entre els mecanismes de resolució de contencions, en aquest apartat es comparen els resultats obtinguts utilitzant els diferents esquemes. Es presenten els resultats per al cas A i el cas C d'offset adicional i es comparen els resultats en termes de pèrdues i retard.

2.2.6.1. Cas A

En el cas A no s'utilitza offset adicional a l'offset base. Per als diferents mecanismes és l'esquema amb el que s'obtenen millors resultats en termes de probabilitat de pèrdua. No obstant, els resultats en termes de retard per a algunes fonts empitjoren respecte als altres esquemes d'offset adicional.

Resultats de probabilitat de pèrdua

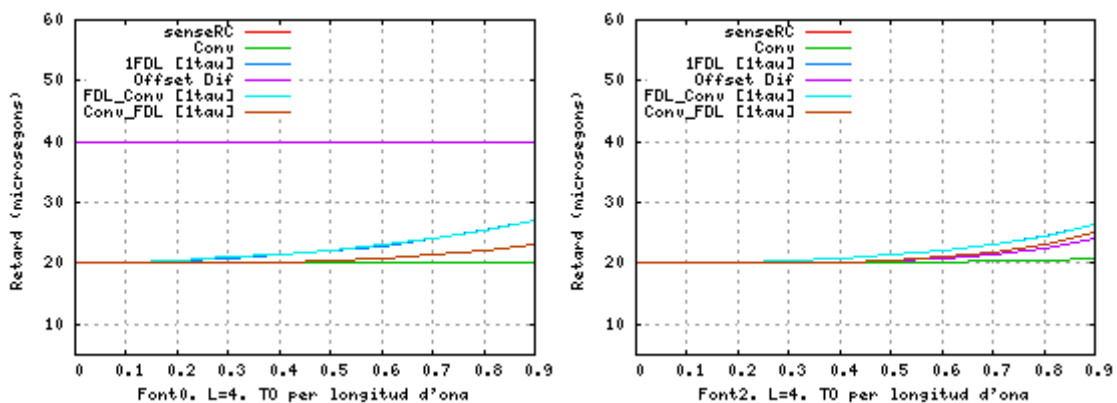


**Fig. 2.27** Probabilitat de pèrdua pels diferents mecanismes de resolució de contencions Cas A (Font0 i Font2, L=4)

La **Fig. 2.27** mostra la probabilitat de pèrdua per a la Font0 i per a la Font2 amb  $L=4$  utilitzant els diferents mecanismes de resolució de contencions. S'observa que, a banda del cas en el que no es disposa de mecanismes de resolució de contencions, la conversió de longitud d'ona és l'únic mecanisme que presenta pèrdues. Per a la resta de mecanismes la probabilitat de pèrdua és nul·la.

### Resultats de retard

La **Fig. 2.28** mostra el retard addicional per a la Font0 i per a la Font3 amb  $L=4$  utilitzant els diferents mecanismes de resolució de contencions. S'observa que els mecanismes de resolució de contencions que no presenten pèrdues experimenten un retard superior que la conversió de longitud d'ona.



**Fig. 2.28** Retard pels diferents mecanismes de resolució de contencions Cas A (Fon0 i Font2,  $L = 4$ )

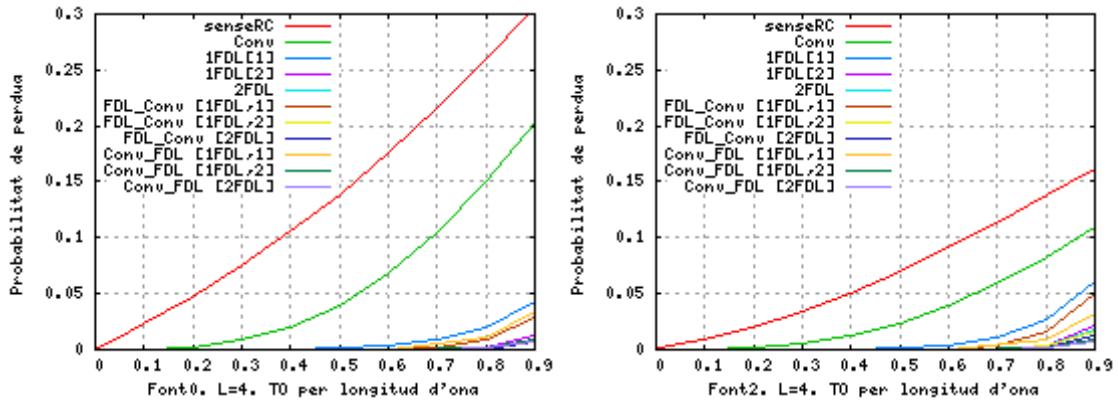
L'exemple més clar és l'esquema de diferenciació de l'offset base. En aquest mecanisme, coneixent la topologia de la xarxa i definint un esquema d'offset base addicional es pot aconseguir garantir pèrdues nul·les a canvi d'incrementar el retard addicional mínim. A més a més, és interessant destacar que per als dos casos de mecanismes combinats avaluats, amb 1FDL d'1tau, la probabilitat de pèrdua és zero però el retard és menor per a Conv+FDL.

### 2.2.6.2. Cas C

En el cas C es disposa d'un offset addicional de fins a 20  $\mu\text{s}$ . Aquest offset addicional influeix negativament en la probabilitat de pèrdua (sobretot quan s'utilitzen fibres de retard). D'altra banda, el retard per a les diferents fonts de la xarxa és més regular i inferior a l'obtingut en el cas A.

### Resultats de probabilitat de pèrdua

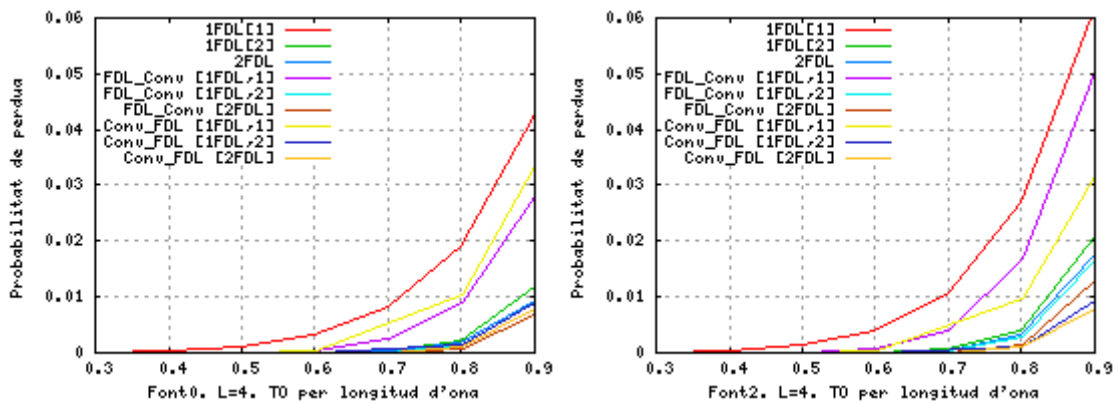
La **Fig. 2.29** mostra la probabilitat de pèrdua per a la Font0 i per a la Font2 amb  $L=4$  utilitzant els diferents mecanismes de resolució de contencions. En aquest cas, per aconseguir una probabilitat de pèrdua nul·la és necessari incrementar la capacitat de les fibres de retard del sistema: equipar els nodes amb 1FDL de 30  $\mu\text{s}$ , o bé amb 3FDLs amb diferents retards (10, 20, i 30  $\mu\text{s}$ ).



**Fig. 2.29** Probabilitat de pèrdua pels diferents mecanismes de resolució de contencions Cas C (Font0 i Font2, L=4).

S'observa una diferència considerable entre la probabilitat de pèrdua obtinguda utilitzant conversió de longituds d'ona i la resta de mecanismes de resolució de contencions que utilitzen fibres de retard. No obstant, cal indicar que incrementant el nombre de longituds d'ona, la probabilitat de pèrdua per a conversió de longitud d'ona disminueix considerablement.

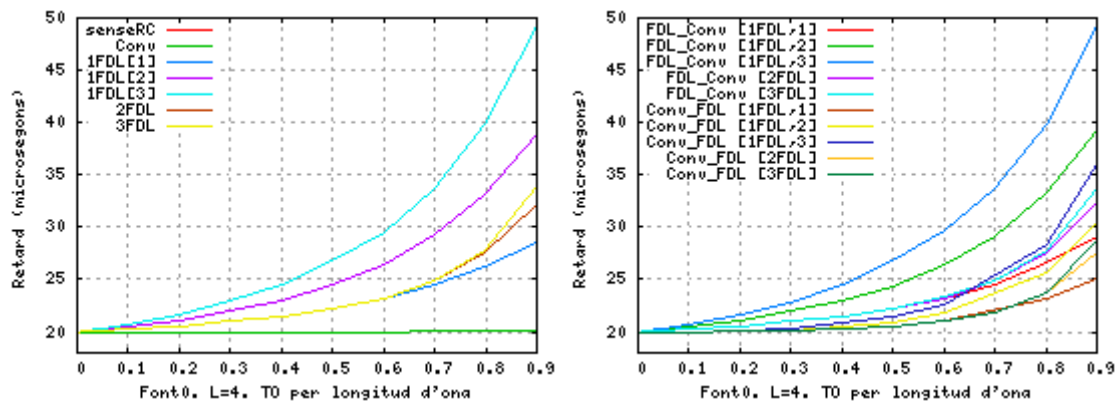
Analitzant amb més detall els mecanismes de resolució de contencions que utilitzen fibres de retard (**Fig. 2.30**) s'observa que els resultats varien en funció de la font. És a dir, alguns mecanismes són millors que altres en termes de pèrdues per a una font determinada però no per a una altra font.



**Fig. 2.30** Detall de probabilitat de pèrdua per als mecanismes que utilitzen FDLs, Cas C (Font0 i Font2, L=4)

*Resultats de retard*

La **Fig. 2.31** mostra el retard addicional per a la Font0, desglossat en dos gràfics. La figura de l'esquerra mostra els resultats obtinguts utilitzant els mecanismes de resolució de contencions aïlladament (Conversió de longitud d'ona i FDLs) mentre que la dreta mostra el retard utilitzant mecanismes combinats.



**Fig. 2.31** Retard per als diferents mecanismes de resolució de contencions (Font0, Cas C i L=4)

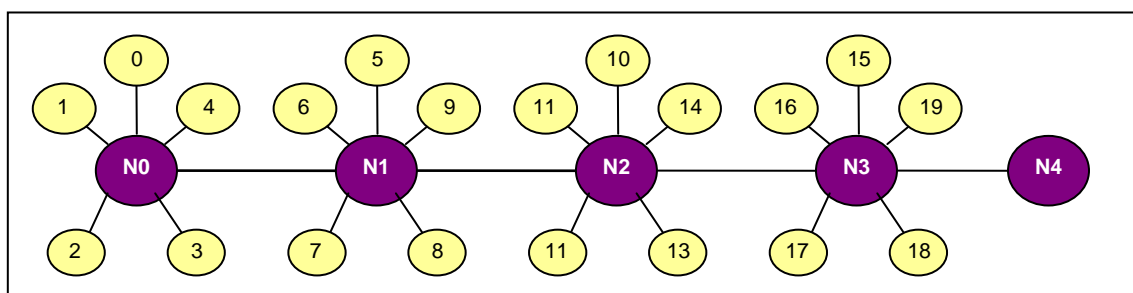
És important destacar la gran diferencia de retard que s'observa per a valors alts de tràfic entre els mecanismes sense fibres de retard, i els que utilitzen FDLs. A més a més, el retard és més gran quan s'utilitzen fibres més llargues que no pas incrementant el nombre de fibres als enllaços (cas que es dona, per exemple amb 1FDL[2] i 2FDL).

Per últim, s'observa que el retard és menor utilitzant Conv+FDL (Conv\_FDL) que FDL+Conv (FDL\_Conv). Per tant, l'ordre amb el que es combinen els mecanismes de resolució de contencions influeix en el retard obtingut.

### 2.3. Línia amb fonts allunyades dels nodes: 20 fonts

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts utilitzant una topologia de xarxa més complexa que la utilitzada en l'apartat anterior per tal d'avaluar novament el comportament obtingut utilitzant els diferents mecanismes de resolució de contencions.

La **Fig. 2.32** mostra la topologia del nou escenari de proves. La xarxa troncal està formada per cinc nodes (N0, N1, N2, N3 i N4), connectats entre ells amb enllaços de 100km seguint una topologia de línia. Cada node d'aquesta línia, excepte N4, té cinc nodes frontera connectats per enllaços de 10Km. Cada node frontera genera tràfic seguint l'estadística de Poisson amb destí N4.



**Fig. 2.32** Topologia de xarxa en línia amb 5 nodes centrals i un conjunt de 20 fonts allunyades de la xarxa troncal (5 fonts per node central)

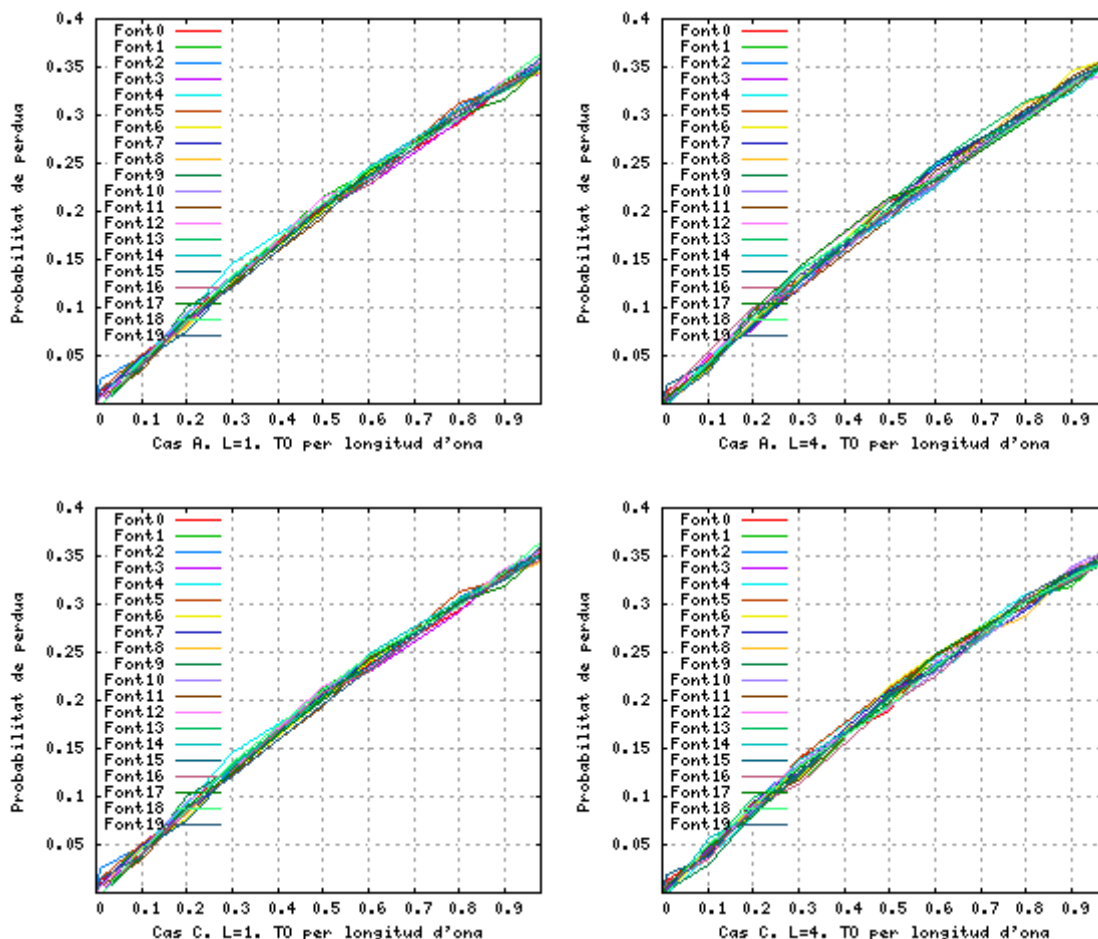


L'escenari complet és un conjunt de xarxes amb topologia d'estrella i fonts als nodes dels extrems, interconnectades entre elles a través d'una xarxa troncal amb topologia lineal. Cada estrella s'identifica en funció de la numeració del seu node central (és a dir, l'Estrella0 és aquella que té com a node central N0, i que té les fonts Font0, Font1, Font2, Font3 i Font4).

### 2.3.1. Xarxa sense mecanismes de resolució de contencions

#### 2.3.1.1. Probabilitat de pèrdua

La **Fig. 2.33** mostra la probabilitat de pèrdua de ràfegues per cada font en funció del tràfic ofert per longitud d'ona per a  $L=1$  i  $L=4$  sense utilitzar mecanismes de resolució de contencions.



**Fig. 2.33** Probabilitat de pèrdua per les 20 fonts sense resolució de contencions ( $L=1$ ,  $L=4$ , A i C)

S'observa que la probabilitat de pèrdua per font és independent de la ubicació de les fonts i del nombre de longituds d'ona. A més a més, també s'obtenen resultats idèntics independentment de l'esquema d'offset addicional que s'utilitzi.

Aquest resultat es deu al desconeixement absolut que les fonts tenen de l'ocupació de la xarxa. A diferència de la topologia en línia, les fonts no estan connectades als nodes de la xarxa troncal i per tant no poden beneficiar-se del coneixement de les programacions dels nodes anteriors. El comportament obtingut és el mateix que s'obtingria utilitzant una topologia en estrella on tots els nodes frontera transmetessin contra el mateix destí.

### 2.3.1.2. Retard

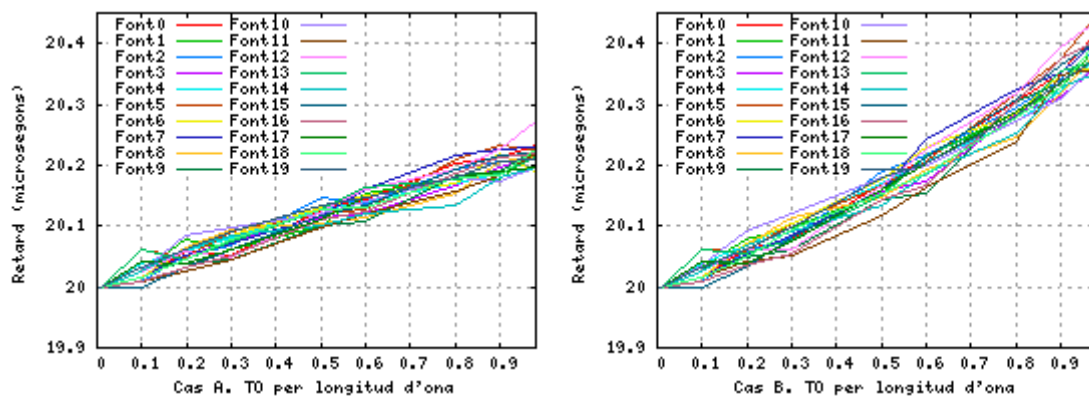


Fig. 2.34 Retard per font sense resolució de contencions (Cas A i B, L=1)

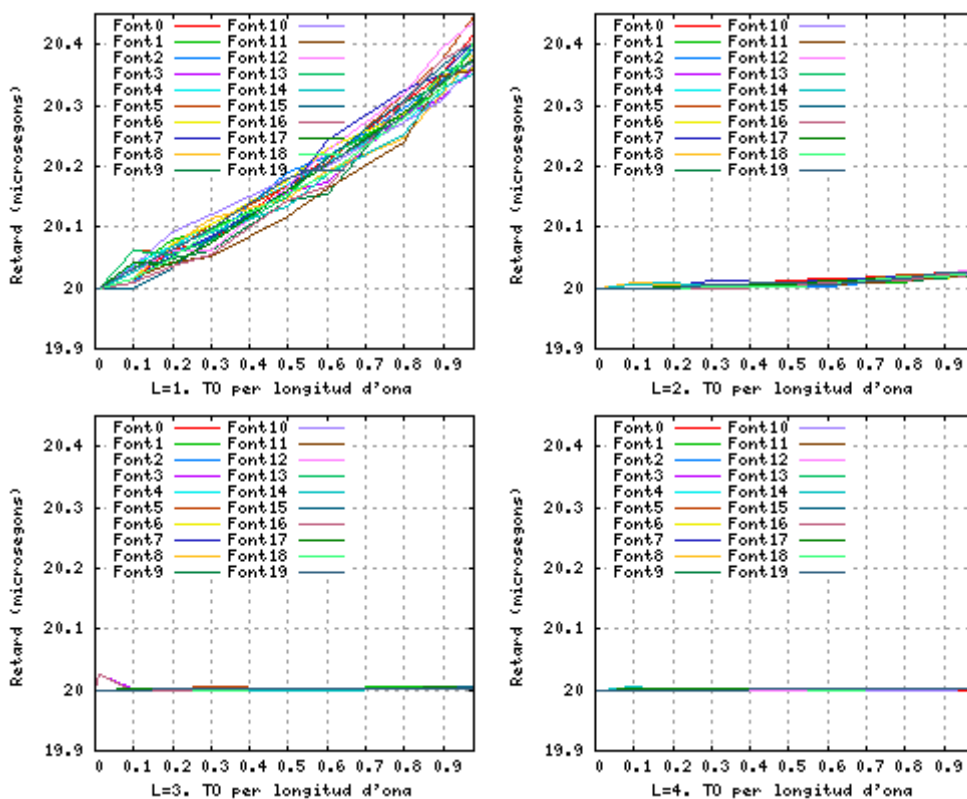


Fig. 2.35 Retard per L sense resolució de contencions (Cas B)

El retard addicional és independent de la posició de les fonts. No obstant, tal com es mostra a la **Fig. 2.34**, el retard varia en funció de l'esquema d'offset addicional utilitzat. En el cas A (sense offset addicional) el retard addicional per font és inferior que en els casos B i C (en ambdós s'obtenen resultats molt similars).

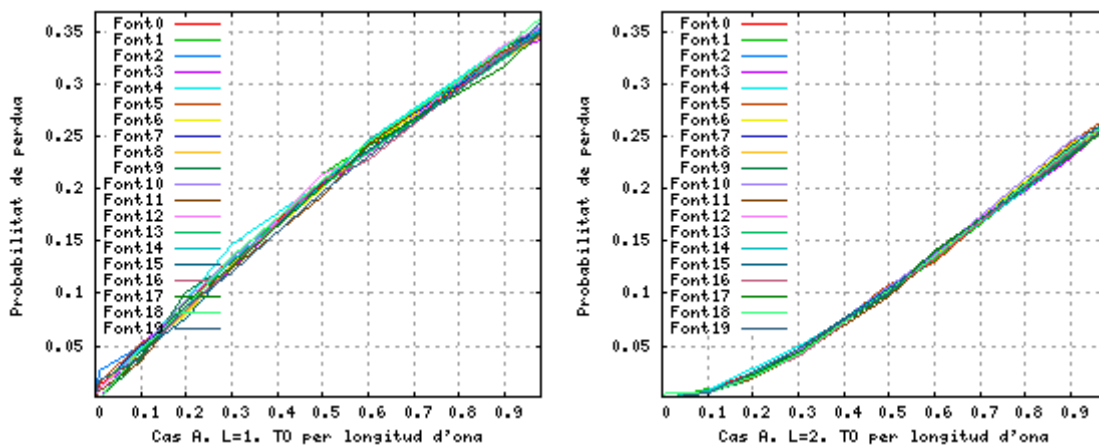
Per altra banda, quan s'incrementa el nombre de longituds d'ona disminueix el retard addicional per font fins al punt que el retard addicional és pràcticament igual al temps d'offset base. La **Fig. 2.35** mostra el retard addicional en funció del nombre de longituds d'ona per al cas B.

Novament, el desconeixement de la ocupació dels enllaços de la xarxa per part de les fonts i l'absència de mecanismes de resolució de contencions pot explicar la simetria dels resultats obtinguts per a totes les fonts.

## 2.3.2. Conversió de longitud d'ona

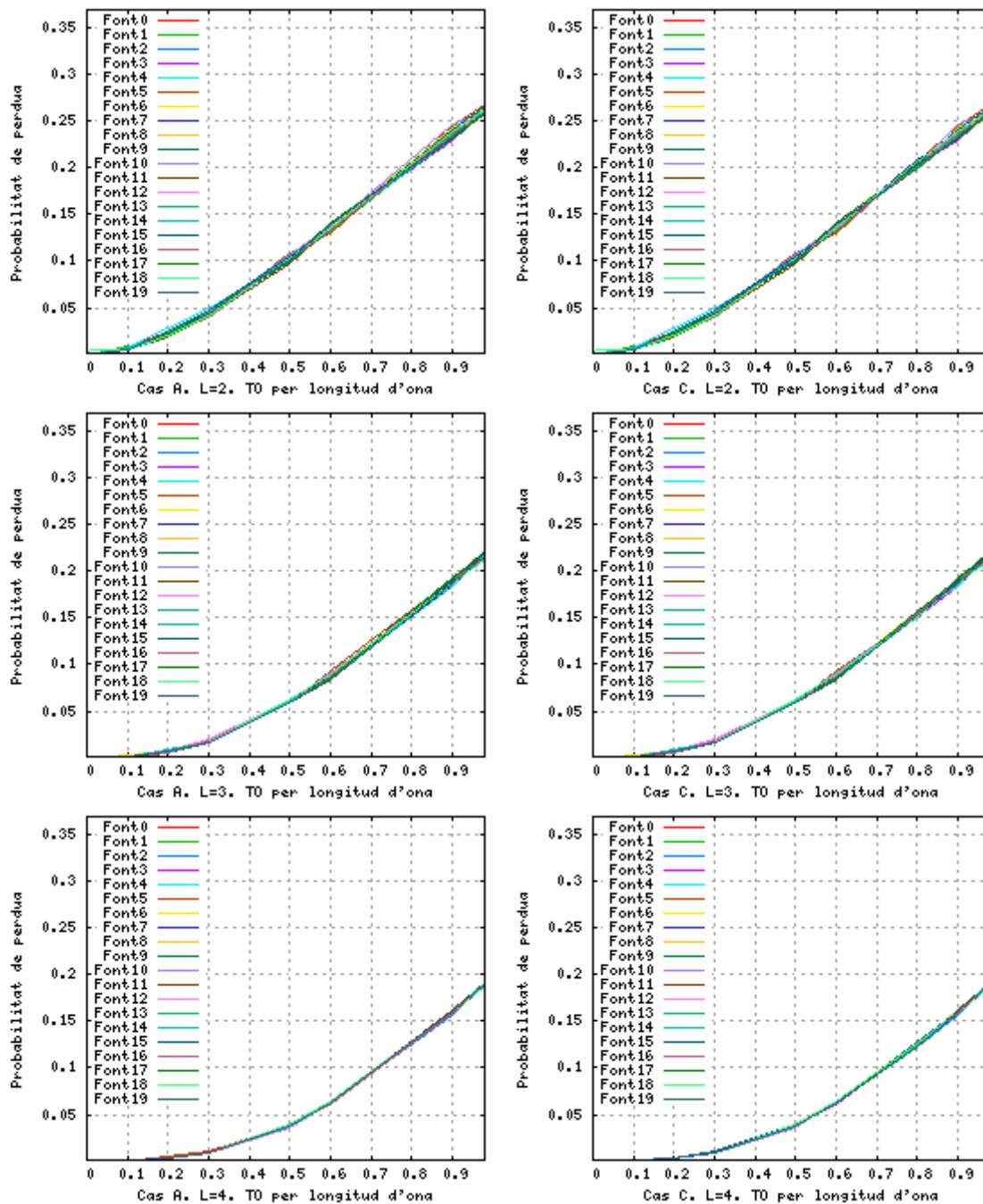
### 2.3.2.1. Probabilitat de pèrdua

Utilitzant el mecanisme de resolució de contencions de conversió de longitud d'ona, la probabilitat de pèrdua és, de nou, independent de la ubicació de la font dins la xarxa. No obstant, tal com mostra la **Fig. 2.36**, la probabilitat de pèrdua disminueix a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona i és inferior a la obtinguda sense mecanismes de resolució de contencions per a  $L > 1$ .



**Fig. 2.36** Probabilitat de pèrdua per les 20 fonts font amb conversió (L=1, L=2 i Cas A)

Per altra banda, la probabilitat de pèrdua és independent de l'esquema d'offset addicional (**Fig. 2.37**) tal i com succeeix sense mecanismes de resolució de contencions.



**Fig. 2.37** Evolució de la probabilitat pèrdua per les 20 fonts en funció de L (Casos A i C)

### 2.3.2.2. Retard

L'ús del mecanisme de resolució de contencions basat en conversió de longitud d'ona no influeix en el retard addicional en la transmissió de les ràfegues, per tant, el retard obtingut coincideix amb el retard observat en el cas de no disposar de mecanismes de resolució de contencions.

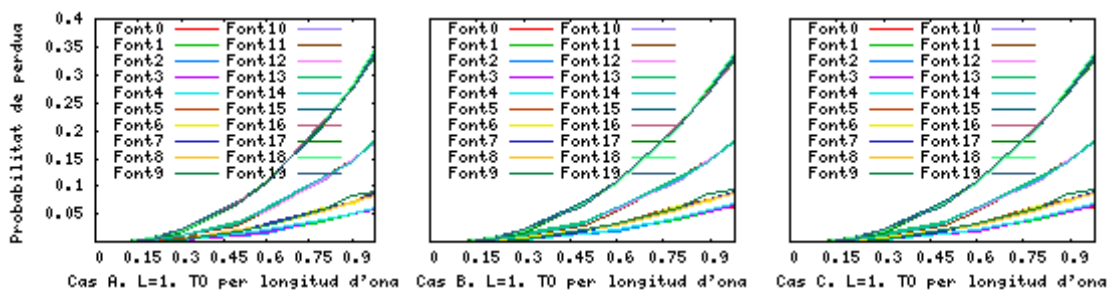
### 2.3.3. Fibres de retard

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts utilitzant el mecanisme de fibres de retard. Com en el cas de l'escenari amb topologia lineal, els nodes centrals (N0, N1, N2 i N3) disposen de fibres de retard amb les mateixes característiques descrites per al cas de la línia.

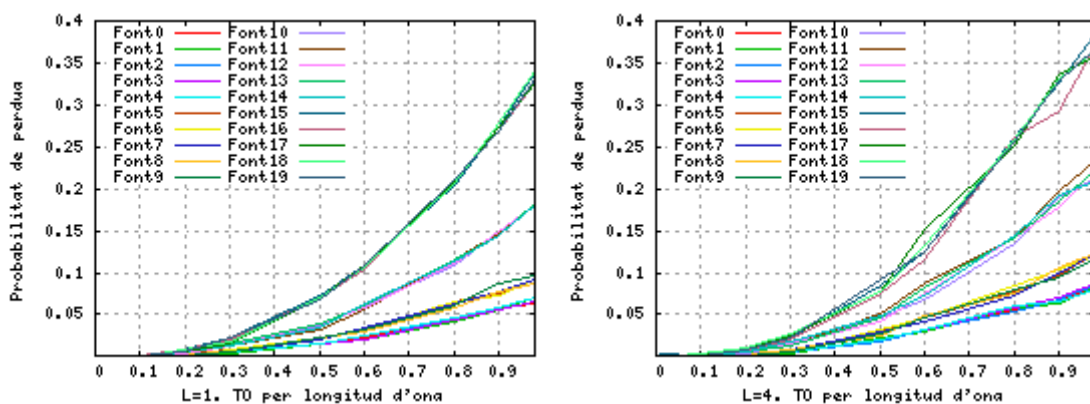
#### 2.3.3.1. Probabilitat de pèrdua

La **Fig. 2.38** mostra la pèrdua de ràfegues per font per als tres casos d'offset adicional (A, B i C), amb 1 longitud d'on en cada enllaç i 1FDL de 10  $\mu$ s de retard als nodes centrals de la xarxa. Les gràfiques mostren que hi ha pèrdues en el cas A, a diferència dels resultats obtinguts a la línia de 4 fonts directament connectades al nodes.

En el cas de la línia amb les fonts directament connectades, els nodes més propers al destí veuen les reserves dels nodes precedents i poden retardar la programació de les seves pròpies ràfegues. En la nova topologia, en canvi, els nodes que tenen les fonts connectades han de programar la transmissió de les seves ràfegues sense tenir coneixement de la ocupació dels enllaços. Aquest és el motiu pel qual hi ha pèrdues en el cas A i, a més a més, la probabilitat de pèrdua per font és independent de l'esquema d'offset adicional utilitzat.



**Fig. 2.38** Probabilitat de pèrdua per font amb 1FDL d'1tau A, B i C (L=1)

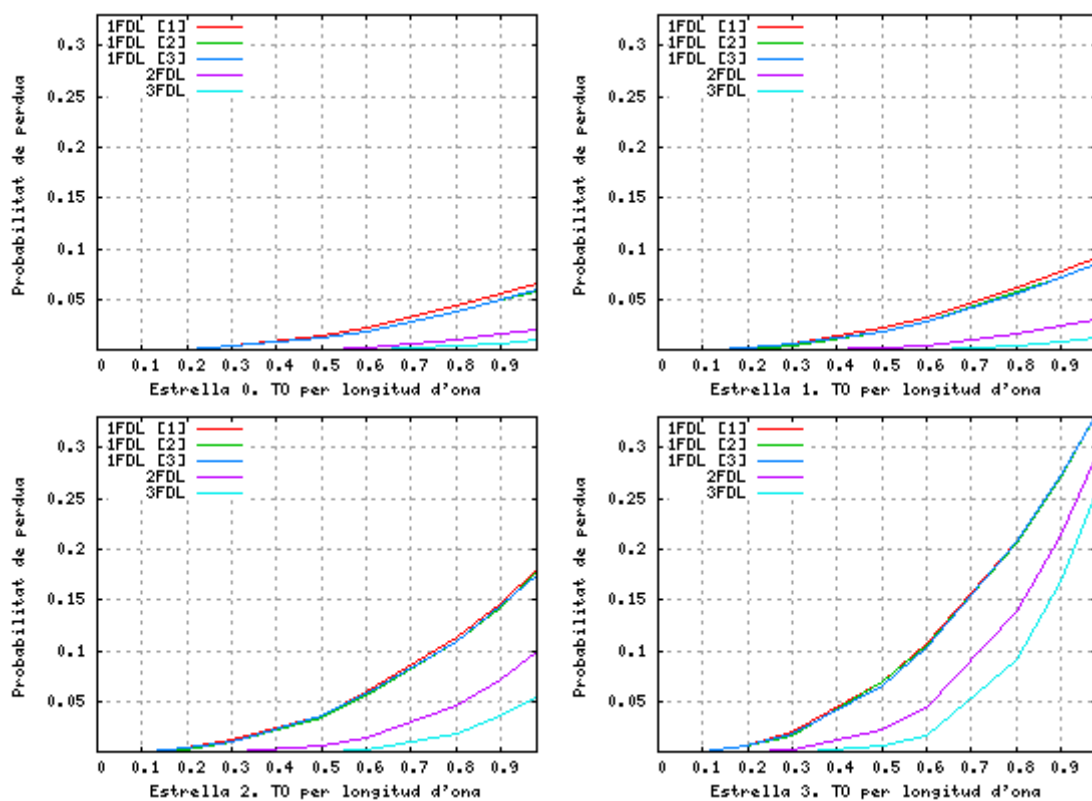


**Fig. 2.39** Probabilitat de pèrdua per font amb 1FDL d'1tau (L=1 i L=4)

D'altra banda, s'observa que la probabilitat de pèrdua per font depèn de la ubicació d'aquesta a la xarxa. Les fonts que pertanyen a estrelles més allunyades del destí tenen una probabilitat de pèrdua menor que les fonts que pertanyen a estrelles més properes al destí degut a la utilització que es fa de les fibres de retard. Aquest comportament coincideix al que s'observa a la línia de quatre fonts per a les configuracions de fibres de retard i offset addicionals que no eliminaven les pèrdues de ràfegues.

D'altra banda, a la **Fig. 2.39**, s'observa que la probabilitat de pèrdua no depèn del nombre de longituds d'ona, tal i com succeeix quan no s'utilitzen mecanismes de resolució de contencions.

La **Fig. 2.40** mostra el promig de la probabilitat de pèrdua de les fonts de cada estrella en funció del tràfic ofert per  $L=4$ , un offset addicional de fins a  $20 \mu s$  (cas C) i les següents configuracions de FDLs: 1FDL de retard 1, 2 o 3 taus; 2FDLs d'1 i 2 taus, respectivament; i 3FDLs d'1, 2 i 3 taus, respectivament.



**Fig. 2.40** Probabilitat de pèrdua amb 20 fonts, per estrella, en funció del nombre i tipus de FDL ( $L=4$ )

S'observa que la probabilitat de pèrdua varia en funció de l'estrella a la que pertany cada font. Per a les estrelles més allunyades del destí la probabilitat de pèrdua és menor que per a les més properes. A més a més, s'observa que les variacions de probabilitat de pèrdua entre les fonts de les diferents estrelles són més grans en funció del nombre de fibres de retard de les que es disposa perquè a major nombre de fibres de retard més combinacions permeten evitar la col·lisió entre ràfegues.

### 2.3.3.2. Retard

La Fig. 2.41 mostra el retard per font, per a  $L=1$  i  $L=4$  i 1FDL d'1tau. Les fonts que pertanyen a les estrelles més allunyades del destí tenen un retard superior, perquè les ràfegues de les fonts més llunyanes són les que utilitzen més vegades les fibres de retard. Comparant el retard obtingut per a les fonts de dues estrelles consecutives, les diferències són més acusades a mesura que les estrelles són més properes al destí (és a dir, hi ha menys variació de retard entre una font que pertany a l'estrella 0 i una font de l'estrella 1, que entre una font de l'estrella 2 i una font de l'estrella 3).

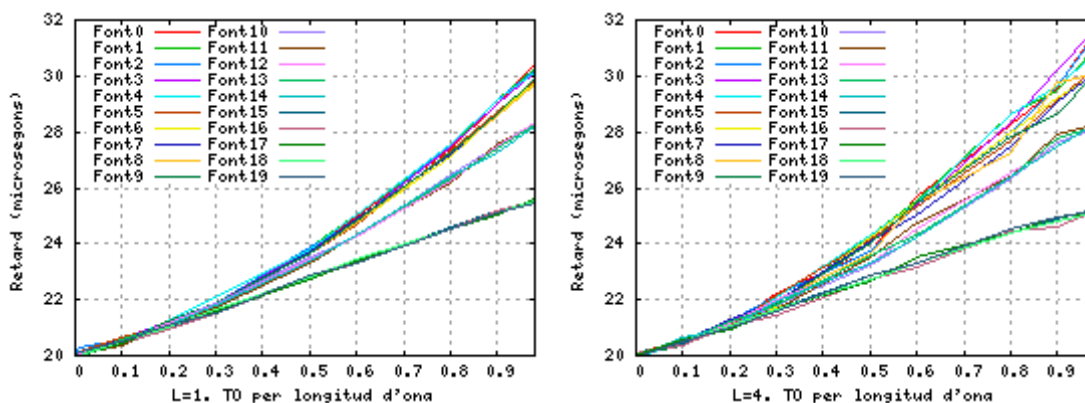


Fig. 2.41 Retard per a les 20 fonts amb 1FDL d'1tau ( $L=1$  i  $L=4$ )

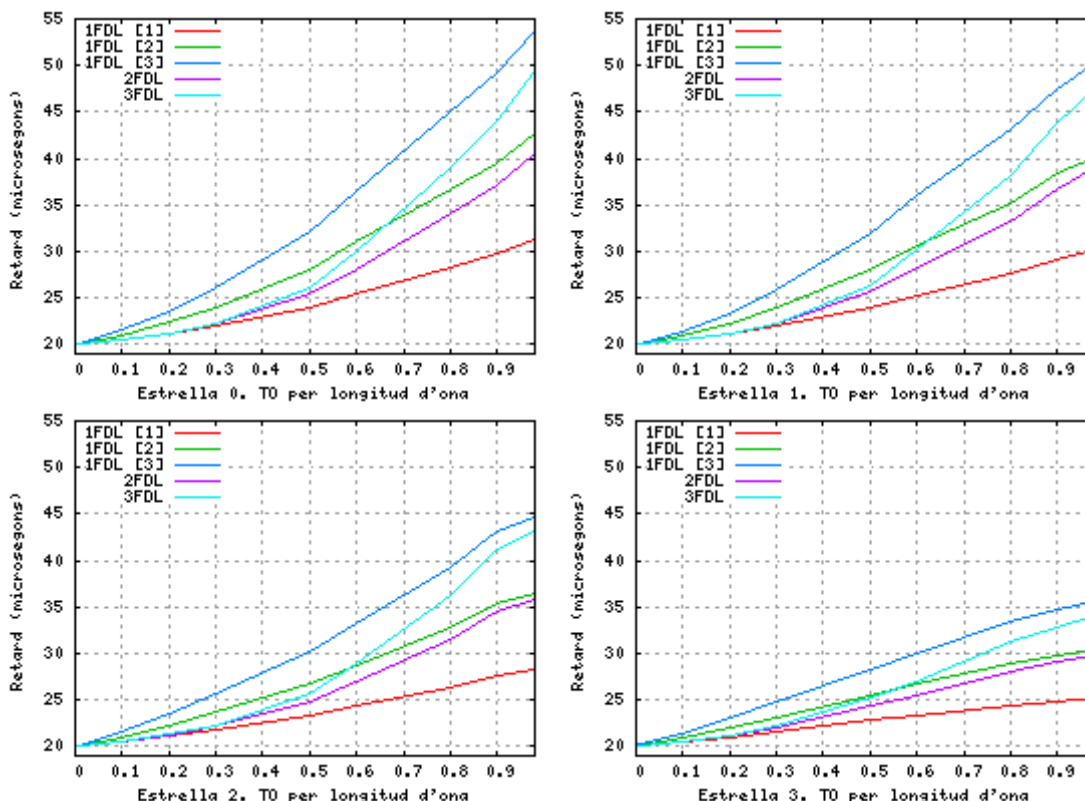


Fig. 2.42 Retard per estrella en funció del nombre i tipus de FDLs ( $L=4$ )

D'altra banda, el retard per font no depèn del nombre de longituds d'ona, tot i que, a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona, els retards per font oscil·len més entorn al valor promig.

La **Fig. 2.42** mostra el retard per font per a les diferents configuracions de fibres de retard simulades. S'observa que el menor retard s'obté per a 1FDL d' $1\tau$  i que el retard augmenta en funció de la longitud de la fibra de retard. D'altra banda, s'observa que a mesura que s'incrementa el nombre de fibres de retard es redueix el retard.

### 2.3.4. Offsets diferenciats

En el cas de la línia amb les fonts directament connectades és possible definir un esquema d'offsets base en funció de la ubicació de les fonts a la xarxa per tal d'aconseguir pèrdues nul·les. No obstant, en l'escenari amb les fonts allunyades de la xarxa troncal, les fonts no tenen coneixement de la ocupació dels enllaços i aquesta tècnica ja no és útil. Per avaluar la diferència entre ambdues topologies, en aquest apartat es presenten els resultats obtinguts configurant els següents offsets base:

- Estrella 0 (Font0 – Font4): offset base de  $40\mu\text{s}$
- Estrella 1 (Font5 – Font9): offset base de  $30\mu\text{s}$
- Estrella 2 (Font10 – Font14): offset base de  $20\mu\text{s}$
- Estrella 3 (Font15 – Font19): offset base de  $10\mu\text{s}$

Les simulacions corresponen al cas A (sense offset addicional) degut a la coincidència de resultats per a tots els casos observada per a tots els mecanismes de resolució de contencions presentats.

#### 2.3.4.1. Probabilitat de pèrdua

La **Fig. 2.43** mostra els resultats de pèrdua per font per a diferents longituds d'ona. La **Fig. 2.44** mostra el promig de la probabilitat de pèrdua per a les fonts de cada estrella.

La probabilitat de pèrdua és pràcticament idèntica per a les fonts d'una mateixa estrella, i augmenta a mesura que les fonts estan ubicades en estrelles més properes al destí. Aquest comportament és similar a l'observat en el cas d'utilitzar el mecanisme de resolució de contencions basat en l'ús de fibres de retard. Ja que, en ambdós casos, ja sigui en base a l'ús de les fibres de retard o gràcies a l'offset base utilitzat, les fonts més allunyades del destí intenten ocupar l'enllaç més proper al destí amb un major interval de temps entre el paquet de control i la transmissió real de la ràfega. Aquesta filosofia és la que aprofiten alguns mecanismes per a xarxes OBS que proporcionen QoS [22][23].

La probabilitat de pèrdua per a les fonts de l'Estrella3 és superior utilitzant l'esquema d'offsets base diferenciats que utilitzant fibres de retard (per a qualsevol dels casos presentats), la qual cosa posa de manifest que la definició



del patró d'offset diferenciat que permeti reduir la probabilitat de pèrdua no és trivial quan la topologia de la xarxa es complica.

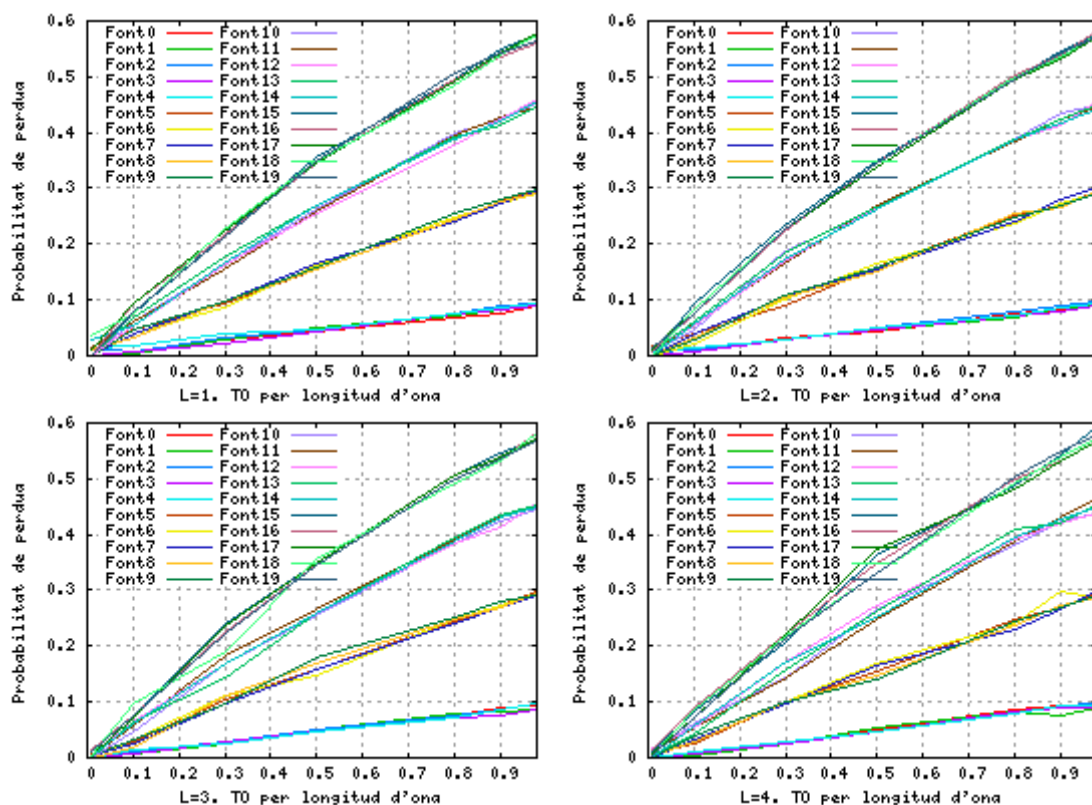


Fig. 2.43 Probabilitat de pèrdua per font en funció de L amb offsets diferenciat

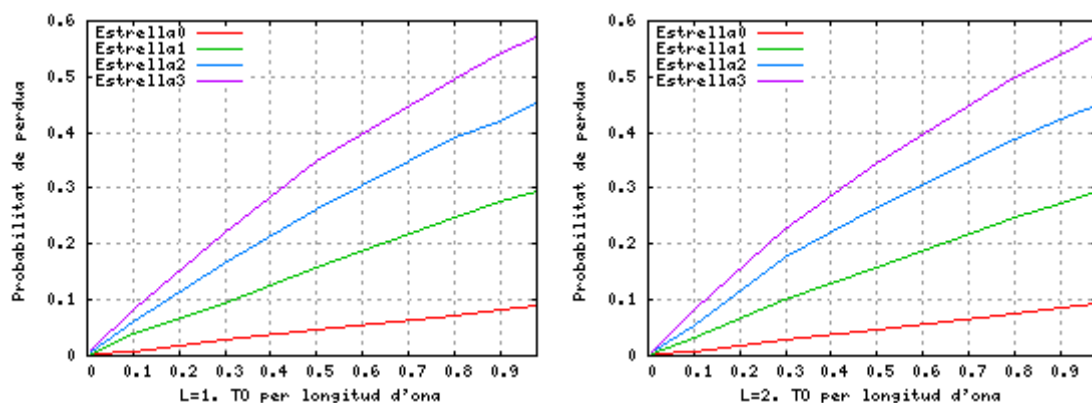
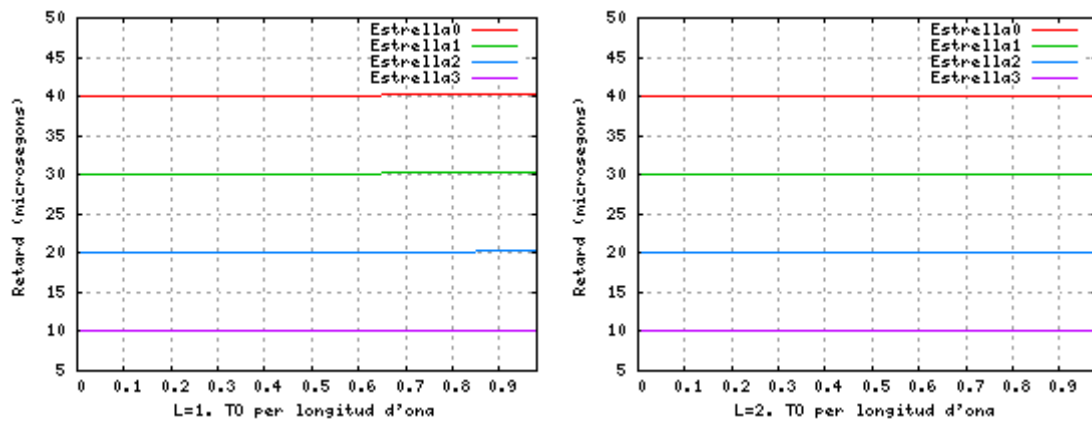


Fig. 2.44 Probabilitat de pèrdua per estrella amb offsets diferenciat (L=1 i L=2)

### 2.3.4.2. Retard

La Fig. 2.45 mostra el promig del retard de les fonts de cada estrella utilitzant l'esquema d'offsets diferenciat. En aquest cas, com que les fonts no tenen coneixement de les programacions de la resta de fonts, el retard que s'observa és directament l'offset base configurat.



**Fig. 2.45** Retard per estrella amb offsets diferenciats (L=1 i L=2)

### 2.3.5. Mecanismes combinats (FDL i Conv)

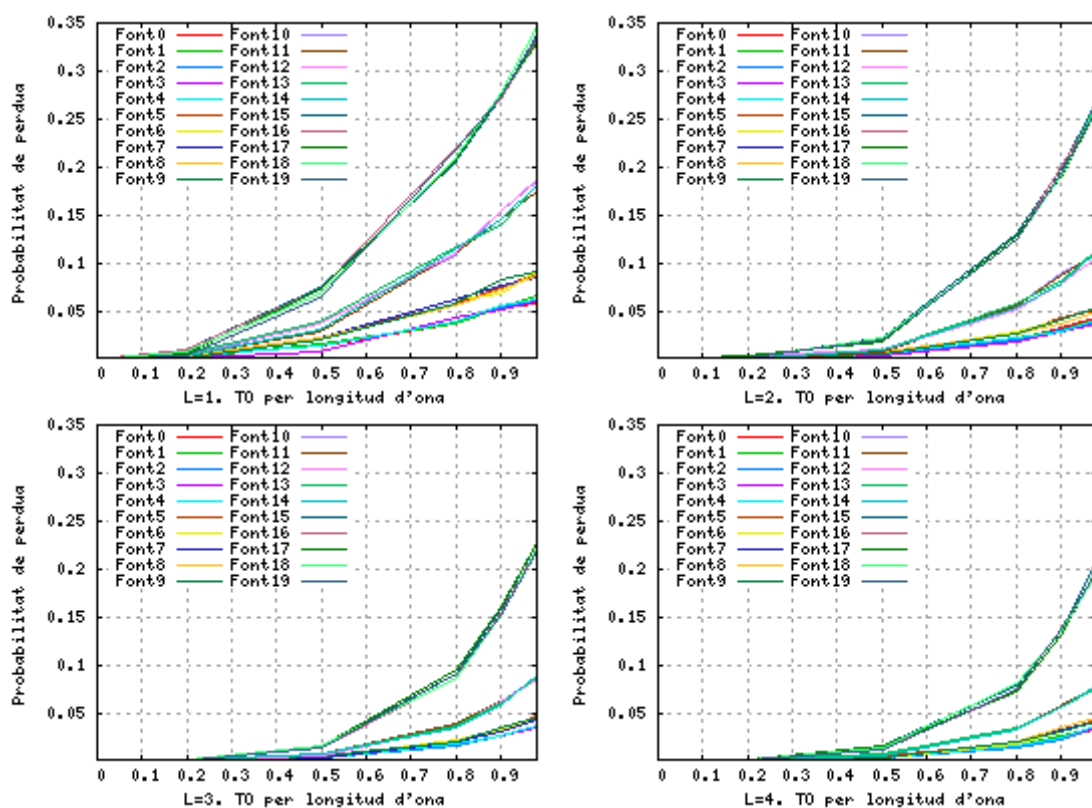
#### 2.3.5.1. FDL + Conv

En aquest apartat es presenten els resultats combinant els mecanismes de resolució de contencions següents en l'ordre que s'indica: (1er) fibres de retard i (2on) conversió de longitud d'ona.

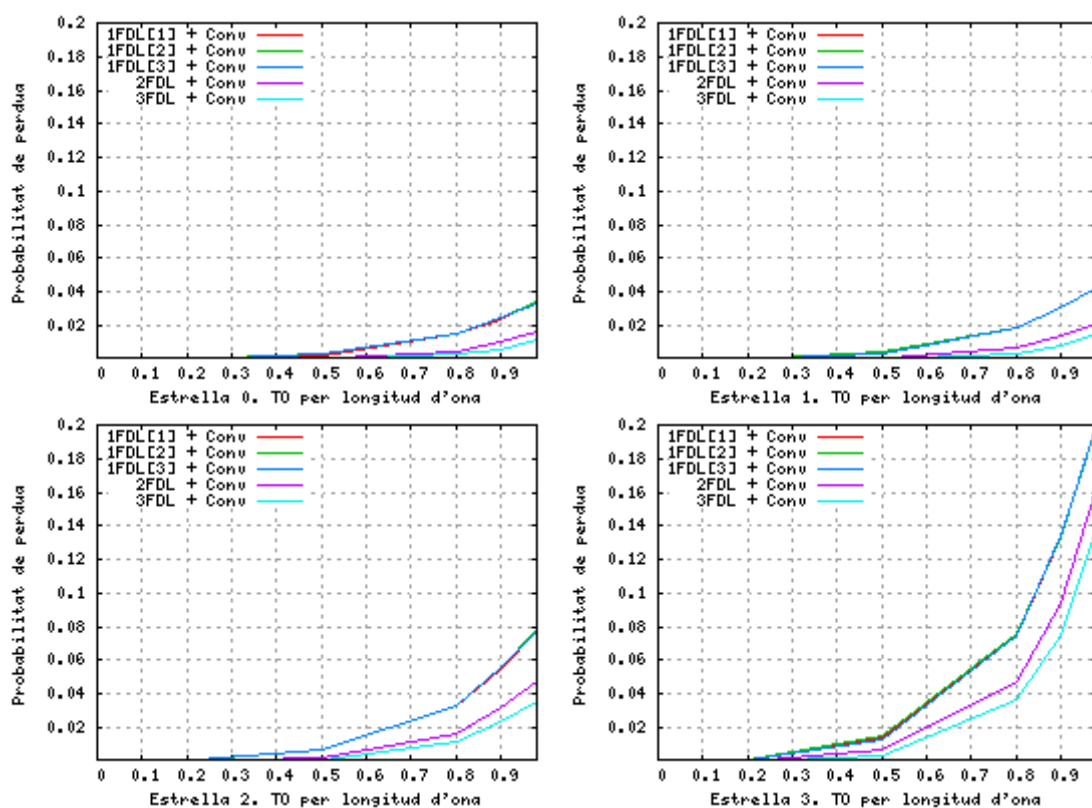
##### 2.3.5.1.1 Probabilitat de pèrdua

La **Fig. 2.46** mostra la probabilitat de pèrdua per font variant el nombre de longituds d'ona i utilitzant 1FDL d'1tau. S'observa que la probabilitat de pèrdua per font disminueix considerablement a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona.

La **Fig. 2.47** compara la probabilitat de pèrdua obtinguda amb les diferents configuracions de fibres de retard per a cada estrella i amb L=4. S'observa que, per cada configuració de les fibres de retard, les fonts de les estrelles més allunyades del destí tenen una probabilitat de pèrdua menor que les que estan més properes. D'altra banda, la probabilitat de pèrdua per a cada estrella quan els nodes de la xarxa troncal disposen d'1FDL és independent de la longitud de la fibra de retard i superior a la probabilitat de pèrdua en el cas d'utilitzar 2FDLs d'1 i 2tau, respectivament. Anàlogament, amb 2FDLs d'1 i 2tau, s'obté una probabilitat de pèrdua per estrella superior al cas d'utilitzar 3FDLs d'1, 2 i 3tau, respectivament.



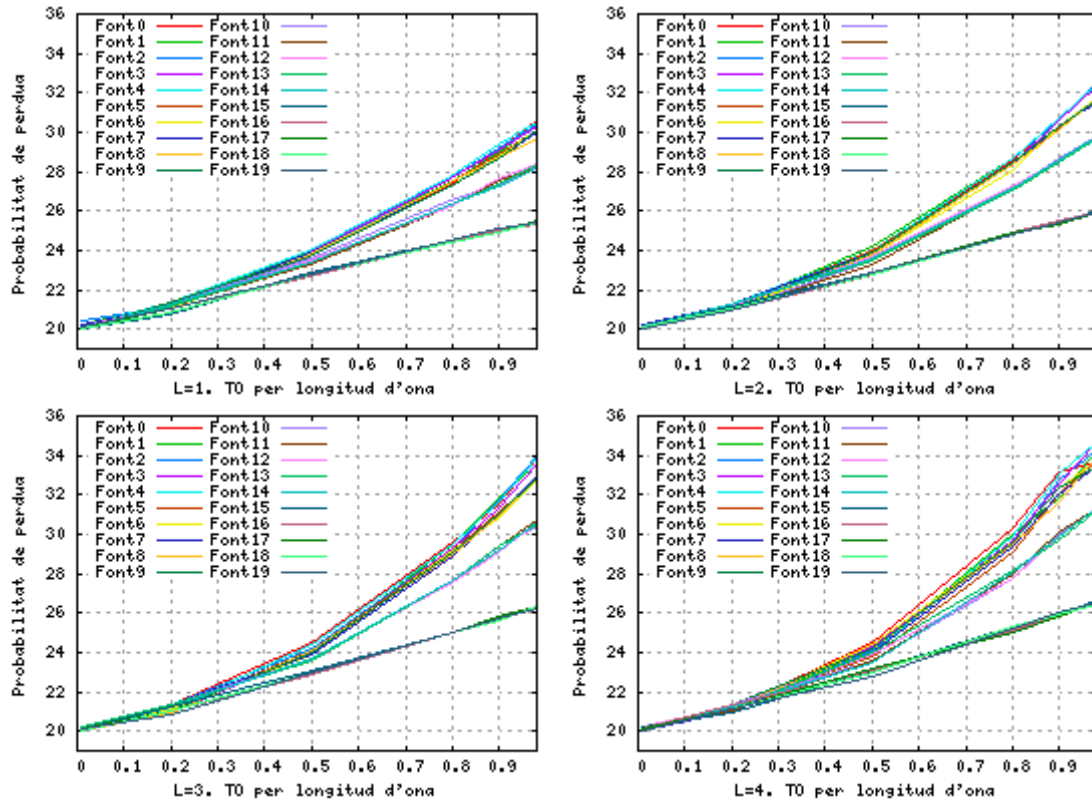
**Fig. 2.46** Probabilitat de pèrdua per les 20 fonts amb 1FDL de 1tau + Conv



**Fig. 2.47** Probabilitat de pèrdua per estrella en funció del nombre i tipus de fibres de retard (FDL+Conv, L=4)

### 2.3.5.1.2 Retard

La **Fig. 2.48** mostra el retard per font quan es disposa d'1FDL d'1tau utilitzant un nombre de longituds d'ona que varia des de L=1 a L=4.

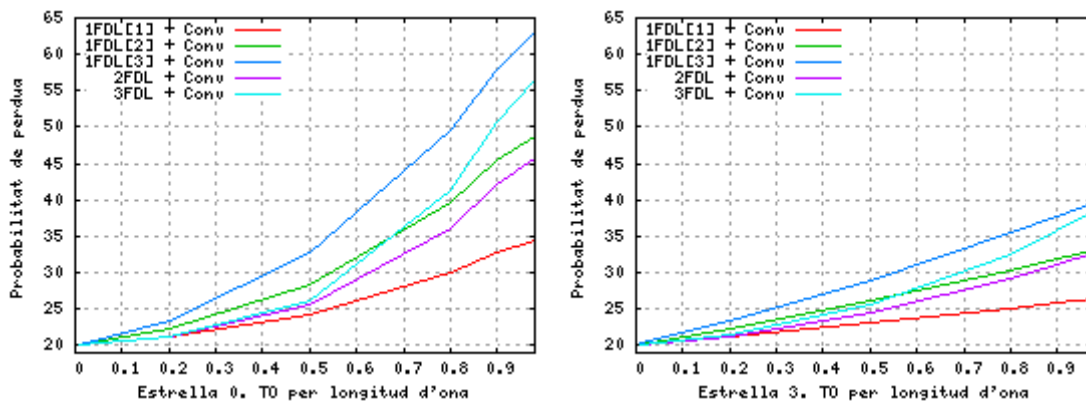


**Fig. 2.48** Retard per les 20 fonts amb 1FDL de retard 1tau + Conv

S'observa que el retard per font s'incrementa a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona, igual que succeeix quan s'utilitza el mecanisme de resolució de contencions basat en l'ús de fibres de retard (sense conversió de longituds d'ona). No obstant, a igualtat de nombre de longituds d'ona, la probabilitat de pèrdua és inferior en el cas d'utilitzar el mecanisme de resolució de contencions combinat. El motiu és que, amb el mecanisme combinat, en cas de contenció i si totes les fibres de retard estan ocupades per a la longitud d'ona avaluada, es pot realitzar conversió de longitud d'ona i provar la resta de possibilitats que ofereixen les fibres de retard per a la nova longitud d'ona.

La **Fig. 2.49** mostra el retard obtingut per a l'Estrella0 i l'Estrella4, amb les diferents configuracions de fibres de retard i L=4.

La configuració que presenta un major retard és la d'1FDL de 3tau, seguida per la de 3FDLs d'1, 2 i 3tau, respectivament, per a valors alts de tràfic. Aquest comportament és el mateix que s'observa en el cas d'utilitzar el mecanisme de fibres de retard de forma aïllada.

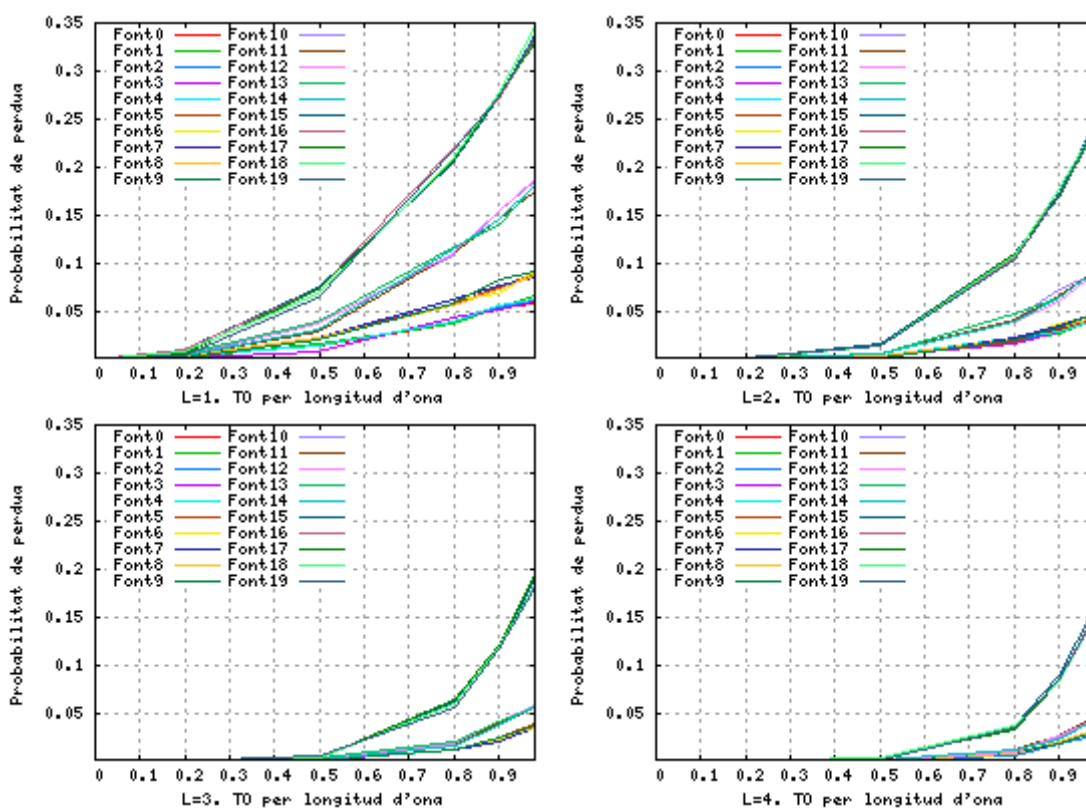


**Fig. 2.49** Retard en funció del nombre i tipus de FDLs (FDL + Conv, L=4)

### 2.3.5.2. Conv + FDL

En aquest apartat s'avaluen els resultats obtinguts combinant els següents mecanismes de resolució de contencions en l'ordre que s'indica: (1er) conversió de longitud d'ona i (2on) fibres de retard.

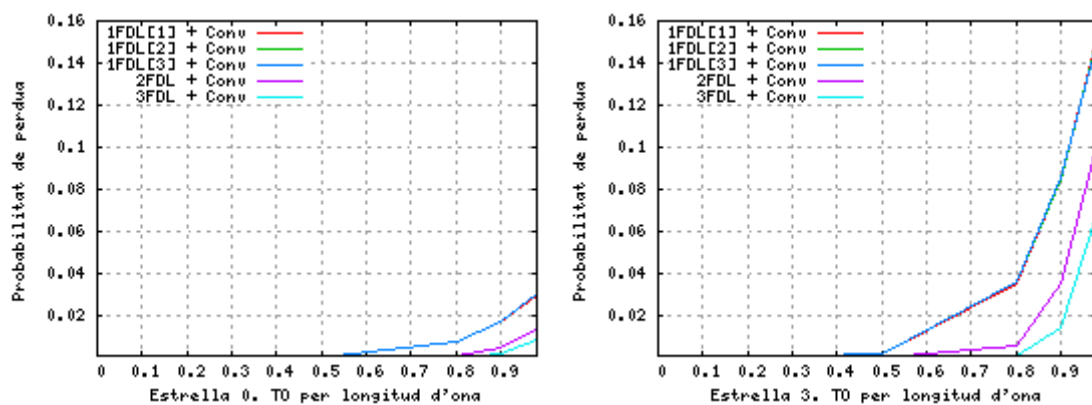
#### 2.3.5.2.1 Probabilitat de pèrdua



**Fig. 2.50** Probabilitat de pèrdua per les 20 fonts amb Conv + 1FDL de 1tau

La **Fig. 2.50** mostra la probabilitat de pèrdua per a les diferents fonts quan s'incrementa el nombre de longituds d'ona. S'observa que es repeteix el fenomen observat per a l'esquema FDL + Conv, és a dir, la probabilitat de pèrdua per font disminueix a mesura que s'incrementa  $L$ ; essent superior la probabilitat de pèrdua per a les fonts més properes al destí. En aquest cas però, a mesura que s'incrementa  $L$  la probabilitat de pèrdua per font és menor que en el cas FDL + Conv.

La **Fig. 2.51** mostra la probabilitat de pèrdua per a cada estrella amb  $L=4$  per a les diferents configuracions de fibres de retard. El comportament és similar a l'observat en el cas FDL + Conv, tot i que la probabilitat de pèrdua en el cas Conv + FDL és inferior, sobretot per a les fonts ubicades en les estrelles més properes al destí.



**Fig. 2.51** Probabilitat de pèrdua per nombre i tipus de FDLs (FDL + Conv,  $L=4$ )

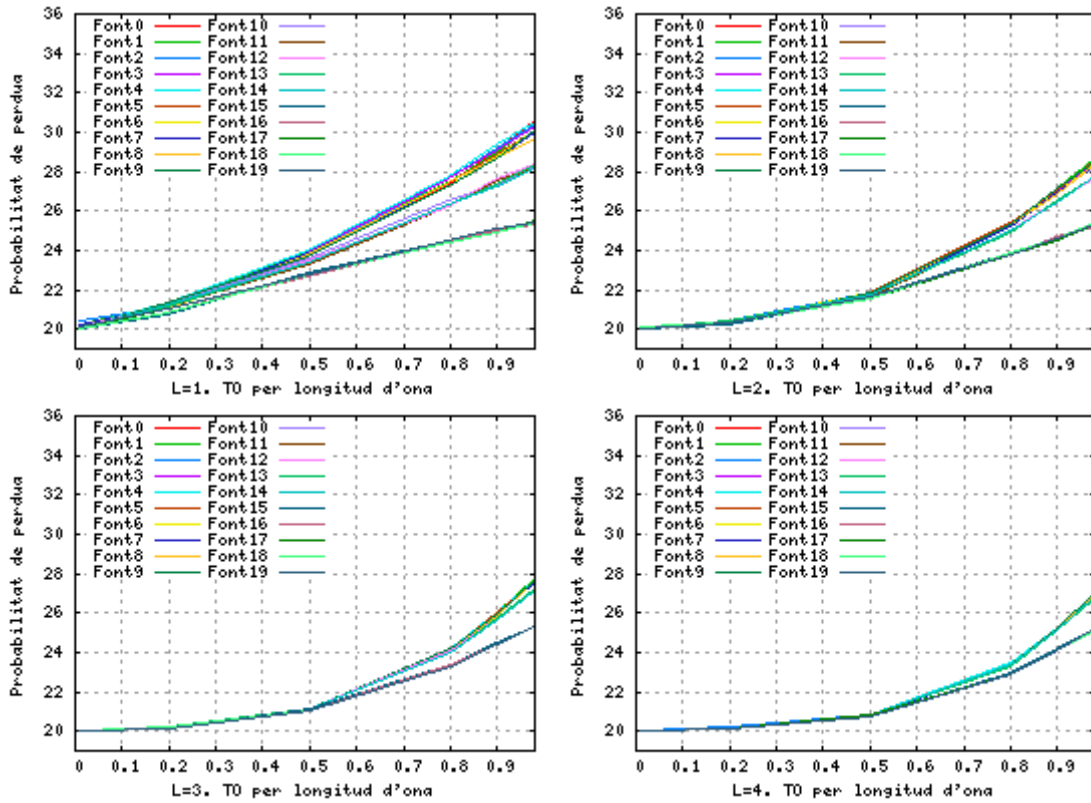
### 2.3.5.2.2 Retard

Comparant el retard per font (**Fig. 2.52**) amb un determinat nombre de longituds d'ona i 1FDL d' $1\tau$  amb l'obtingut per a FDL + Conv, s'observen diferències importants, tant en els valors com en el comportament.

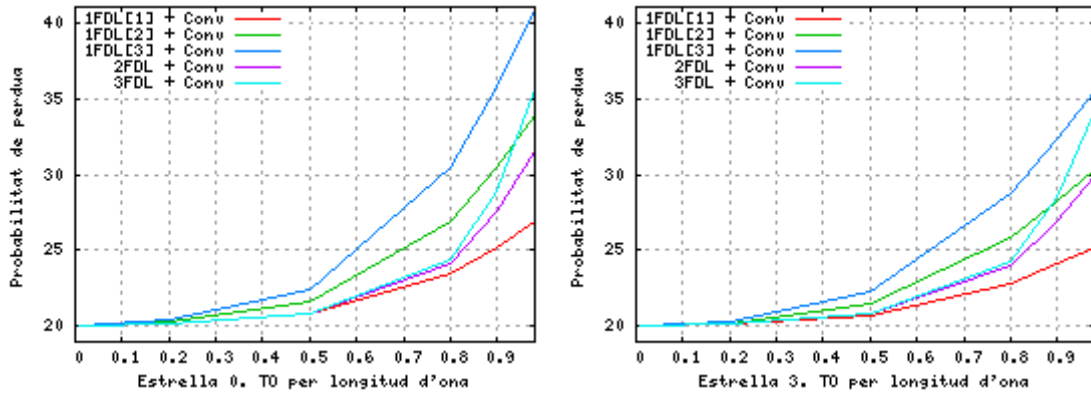
Contràriament al que succeeix amb l'esquema FDL+Conv, a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona, el retard disminueix tant en valor com en la diferència entre els valors per a les diferents estrelles. Aquest comportament es deu a l'ordre en el que s'utilitzen els mecanismes de resolució de contencions: primer s'intenta resoldre la contenció utilitzant conversió de longitud d'ona, i només en cas que no es pugui, es retarda la ràfega (si hi ha recursos disponibles) utilitzant alguna de les FDLs. Per tant, bona part de les col·lisions es resolen utilitzant conversió de longitud d'ona, mecanisme que no introdueix retard addicional.

La **Fig. 2.53** mostra el retard per font per a les diferents configuracions de fibres de retard dels nodes troncal de la xarxa. S'observa que el retard per a cada configuració és inferior a l'observat en el cas FDL+Conv. No obstant, el comportament és similar en ambdós casos, és a dir, el retard quan

s'incrementa el nombre de fibres de retard és inferior al retard incrementant la longitud d'1FDL.



**Fig. 2.52** Retard per les 20 fonts amb Conv + 1FDL de retard 1tau



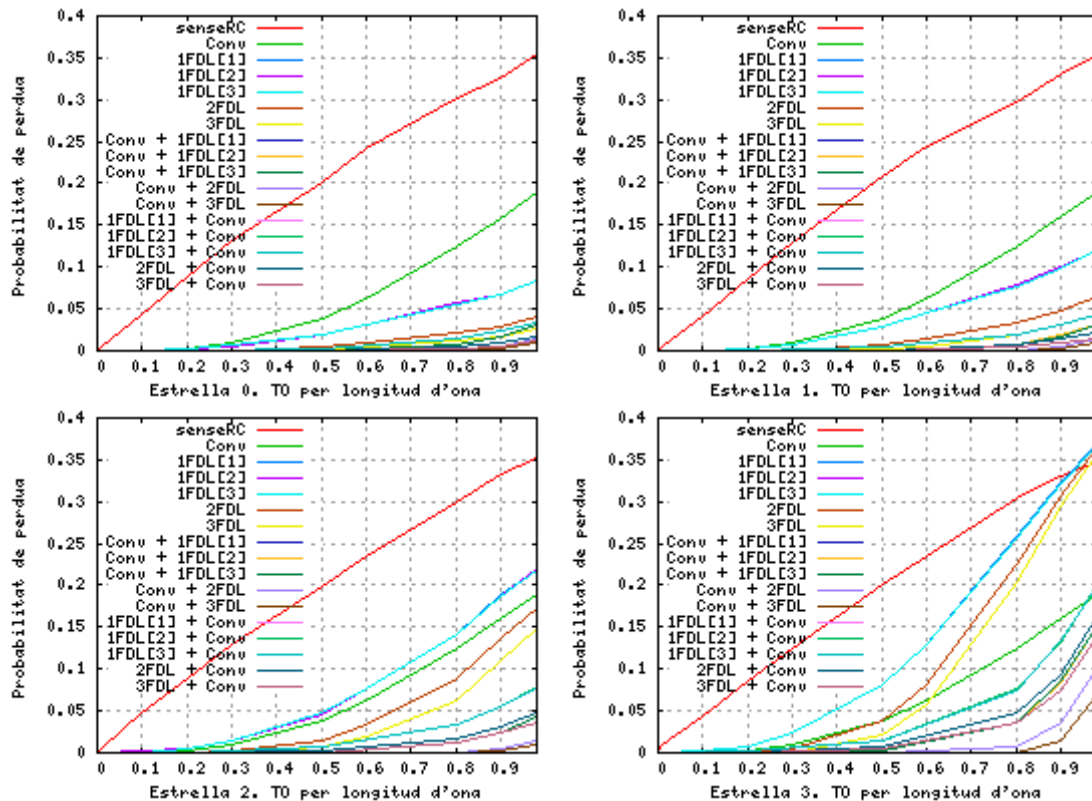
**Fig. 2.53** Retard en funció del nombre i tipus de FDLs (Conv + FDL, L=4)

### 2.3.6. Comparativa de mecanismes a la xarxa amb 20 fonts

Per tal mostrar les diferències entre els mecanismes de resolució de contencions analitzats, en aquest apartat es comparen els resultats obtinguts utilitzant els diferents esquemes. Es presenten els resultats per al cas C d'offset addicional i L=4 i es comparen els resultats en termes de pèrdues i retard.

### 2.3.6.1. Probabilitat de pèrdua

La **Fig. 2.54** mostra la probabilitat de pèrdua per estrella obtinguts aplicant els diferents mecanismes de resolució de contencions.



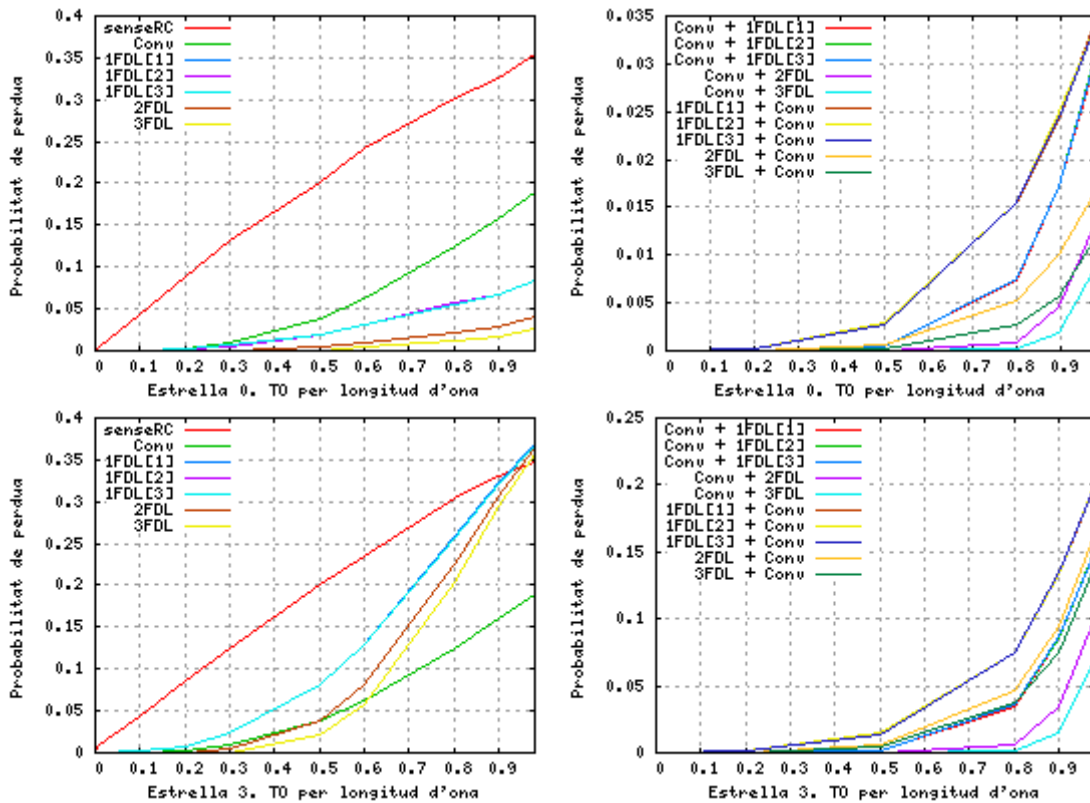
**Fig. 2.54** Probabilitat de pèrdua per estrella (Cas C, L=4)

D'una banda s'observa que la utilització de qualsevol dels mecanismes de resolució de contencions suposa una disminució considerable de la probabilitat de pèrdua en comparació amb el cas de no utilitzar-ne cap; sobretot per al cas de conversió de longitud d'ona. D'altra banda, cal destacar la diferència de probabilitat de pèrdua de les fonts en funció de l'estrella en la que estan ubicades quan s'utilitzen mecanismes de resolució de contencions que fan servir fibres de retard. Aquesta diferència no s'observa utilitzant conversió de longitud d'ona.

Per tal d'observar amb més detall les diferències entre els diferents mecanismes de resolució de contencions s'ha desglossat la probabilitat de pèrdua en dues parts: una primera on es mostren els mecanismes de resolució de contencions originals i una segona on es mostren els resultats quan es combinen mecanismes. La **Fig. 2.55** mostra els resultats per a les estrelles 0 i 3.

Observant els resultats obtinguts amb els mecanismes de resolució de contencions originals, es comprova que existeix una clara diferència en funció de l'estrella en la que estan ubicades les fonts: la probabilitat de pèrdua per a les fonts de l'Estrella3 és inferior utilitzant conversió de longitud d'ona que en el





**Fig. 2.55** Probabilitat de la probabilitat de pèrdua per estrella (Cas C, L=4)

La **Fig. 2.55** mostra les diferències per a les estrelles 0 i 3. Per una banda, i si s'observen els mecanismes no combinats, existeix una clara diferència entre el comportament de les estrelles, ja que la Estrella3 té uns millors resultats de pèrdua amb conversió que amb l'ús de FDL, a diferència de la Estrella 1.

Si s'observen ara els resultats per als mecanismes combinats, per ambdues estrelles els mecanismes que millors resultats donen són Conv+FDL amb més d'una FDL.

De fet, per a la Estrella 0, Conv + FDL és el mecanisme que millors resultats dona en tots els casos. Per a la Estrella 2, això es torna a complir fins al punt que l'ús de Conv + FDL amb 1FDL supera els resultats de pèrdua obtinguts amb FDL + Conv i 2FDL.

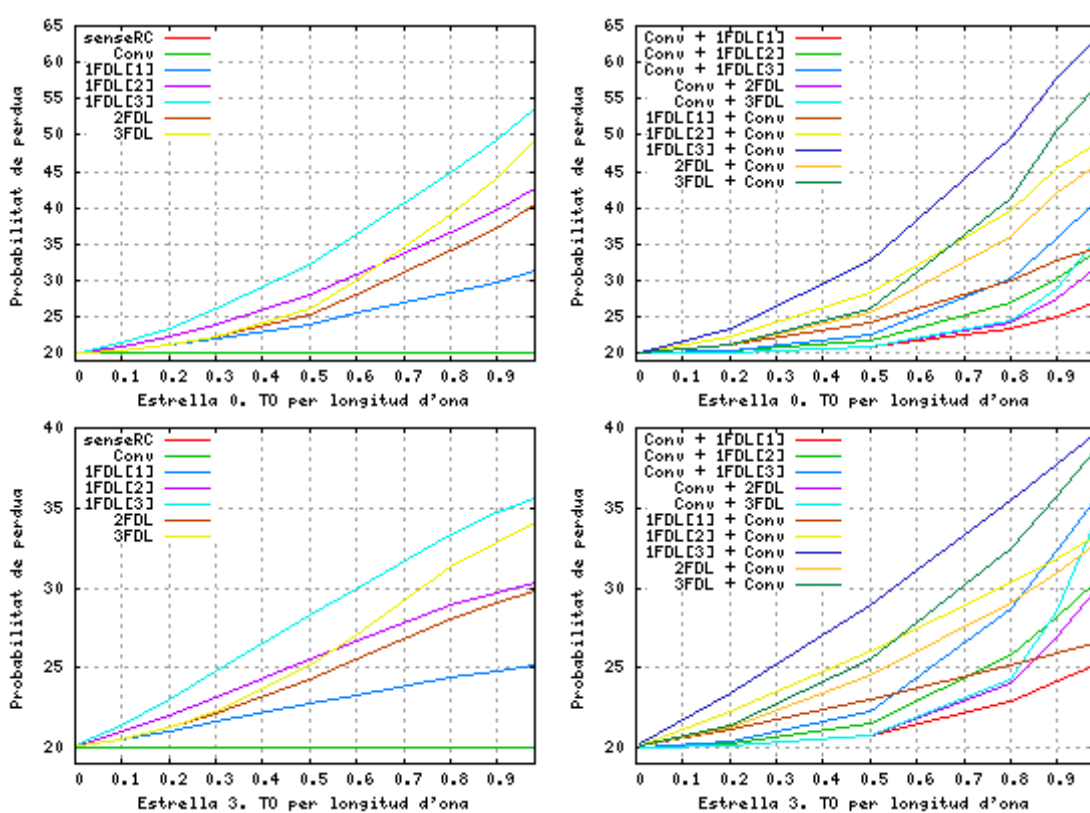
### 2.3.6.2. Retard

La **Fig. 2.56** mostra el retard per a les fonts de les estrelles 0 i 3, diferenciant entre els mecanismes bàsics i els combinats.

S'observa que el retard per a les fonts de l'Estrella0 és superior al de les fonts de l'Estrella 3, sobretot utilitzant mecanismes combinats ja que l'Estrella0 fa un major ús de les fibres de retard.

Analitzant els mecanismes de resolució de contencions originals, s'observa que el retard utilitzant conversió de longitud d'ona és pràcticament el mateix que en el cas de no disposar de cap mecanisme de resolució de contencions, i que aquest, a més a més és pràcticament igual a l'offset base ( $20 \mu\text{s}$ ). A més, el retard que s'obté utilitzant 1FDL de 3 tau és superior al que s'obté utilitzant 3FDLs d'1, 2 i 3tau, respectivament (com s'ha observat i argumentat anteriorment).

Analitzant els resultats utilitzant les combinacions dels mecanismes combinats, s'observa que el major retard s'obté amb el mecanisme FDL + Conv quan s'utilitza 1FDL de 3tau. Els menors retards, per a tràfics molt alts, s'obtenen per a Conv+FDL i FDL+Conv amb 1FDL d'1tau, respectivament i en aquest ordre.



**Fig. 2.56** Retard per estrella (Cas C, L=4)

## CONCLUSIONS

En aquest treball s'ha comparat el comportament de diversos mecanismes de resolució de contencions per a xarxes òptiques de commutació de ràfegues (OBS). Els mecanismes comparats són: conversió de longitud d'ona, fibres de retard i combinacions d'ambdós mecanismes.

Per tal de realitzar la comparativa ha estat necessari programar i incorporar a un simulador de xarxes OBS les funcions necessàries per poder utilitzar els mecanismes a avaluar.

Per altra banda, la comparativa dels mecanismes de resolució de contencions es realitza en base als resultats obtinguts utilitzant dos escenaris diferents: (1) xarxa amb topologia lineal i (2) interconnexió d'estrelles a través d'una xarxa troncal lineal.

### *Xarxa amb topologia de línia i fonts directament connectades als nodes*

La xarxa del primer escenari està formada per una línia de 5 nodes (de N0 a N4) interconnectats seguint una topologia lineal. Els 4 primers nodes de la línia generen ràfegues segons un procés de Poisson amb destí l'últim node de la xarxa. La longitud de les ràfegues és constant i igual a 12500 bytes. La longitud d'ona per realitzar la transmissió de cada ràfega s'escull de forma aleatòria d'entre totes les possibles i es disposa de suficient memòria RAM per a emmagatzemar les peticions de transmissió fins que se'n pot programar la transmissió a l'enllaç.

Una característica present a aquesta topologia és la influència que tenen les programacions d'un node en els nodes anteriors a ell a la línia. D'aquesta manera, sempre que un node programi una ràfega pròpia, i el node anterior vulgui programar-ne una en el mateix slot, la ràfega d'aquest últim és perdrà. Aquest efecte es veu reflectit de forma clara per a la última font de la xarxa (connectada a N3), que registra una probabilitat de pèrdua nul·la, ja al ser l'última font a la xarxa, totes les programacions que faci sobre l'enllaç seran cursades i mai patiran contenció; aquest comportament però, es tradueix en un augment del retard força significatiu respecte a la resta de fonts presents a la xarxa. En base a aquest fet, s'ha observat en aquest escenari que les fonts més properes al destí tenen una probabilitat de pèrdua menor.

Sense resolució de contencions s'obté que el retard i la probabilitat de pèrdua per font disminueixen a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona, on la disminució de la probabilitat de pèrdua és molt més marcada quan s'utilitza conversió de longitud d'ona. També s'ha observat que l'ús d'offsets addicionals modifica els comportaments de les diferents fonts, tant per probabilitat de pèrdua com per retard.

Utilitzant fibres de retard es pot aconseguir probabilitat de pèrdua nul·la en funció de la configuració de l'offset addicional que utilitzen els nodes i el nombre i tipus de fibres de retard. En els casos que es produeixen pèrdues, s'observa que la probabilitat de pèrdua és menor a mesura que s'incrementa el nombre de fibres de retard. D'altra banda, fins i tot en els casos que hi ha contenció, la probabilitat de pèrdua amb FDLs és menor que amb conversió de longitud d'ona.

Per altra banda, l'ús de mecanismes combinats a la línia presenta probabilitat de pèrdua zero, per a totes les fonts, en els mateixos casos d'offset addicional que les FDL. I la probabilitat de pèrdua en els casos en els quals es produeix contenció disminueix respecte la probabilitat de pèrdua utilitzant únicament fibres de retard.

A més més, la probabilitat de pèrdua per font, en funció de l'ordre en el que s'utilitzen els mecanismes combinats en cas de contenció (utilitzant primer conversió i en cas que aquesta falli FDL, o a l'inrevés), varia depenent de la ubicació de les fonts a la xarxa; posant de manifest la dependència entre fonts en aquest tipus de xarxes.

Per últim, s'ha avaluat l'ús d'offsets diferenciats en aquesta topologia, aconseguint una probabilitat de pèrdua igual a zero; tot i que aquest mecanisme presenta com a desavantatge que les fonts tenen retards addicionals mínims que depenen de la configuració de l'offset base.

#### *Xarxa amb topologia de línia i fonts allunyades dels nodes (20 fonts)*

El segon escenari està format una xarxa troncal amb topologia lineal que interconnecta el node central de diverses estrelles. Cada estrella consta de 5 nodes exteriors que generen ràfegues segons una estadística de Poisson amb destí l'últim node de la línia. En aquest escenari les fonts estan connectades a nodes que desconeixen completament l'estat de la xarxa i s'obtenen els mateixos resultats de retard i probabilitat de pèrdua independentment de la font i l'esquema d'offset utilitzat.

S'ha observat un mateix comportament per a totes les fonts de la xarxa sense resolució de contencions, i amb conversió de longitud d'ona. Tot i que la probabilitat de pèrdua per font disminueix amb conversió de longitud d'ona a mesura que s'incrementa el nombre de longituds d'ona. Els resultats de retard en ambdós casos són iguals, ja que en les simulacions s'ha suposat que la conversió de longitud d'ona no introdueix un retard addicional.

Amb l'ús de fibres de retard, la probabilitat de pèrdua disminueix de forma considerable en comparació amb el cas de conversió. A més, la probabilitat de pèrdua per font és major a mesura que les fonts pertanyen a una estrella més propera al destí. Per altra banda, no s'observen diferències en la probabilitat de pèrdua quan s'incrementa el retard utilitzant una única fibra de retard però sí que ho fa quan s'incrementa el nombre de fibres.

L'ús d'offsets base diferenciats no permet reduir la probabilitat de pèrdua, tot i que altera el funcionament del sistema; de tal manera que la probabilitat de pèrdua és major a mesura que les fonts estan ubicades en estrelles més properes al destí.

Amb els mecanismes que combinen l'ús de les fibres de retard i la conversió de longitud d'ona, s'observa que la probabilitat de pèrdua millora considerablement en comparació a l'ús de les fibres de retard de forma aïllada. A més, l'esquema combinat Conv + FDL, proporciona millors resultats, tant en probabilitat de pèrdua com en retard, que l'esquema FDL + Conv.

## Referències

- [1] Y. Chen, C. Qiao and X. Yu, "Optical burst switching: A New Area in Optical Networking Research", IEEE Network Magazine, 18(3), May/June 2004.
- [2] K. Laevens, "Traffic Characteristics Inside Optical Burst Switched Networks," Proc. Opticomm, 2002, pp. 137–48.
- [3] X. Yu, Y. Chen, and C. Qiao, "Study of Traffic Statistics of Assembled Burst Traffic in Optical Burst Switched Networks," Proc. Opticomm, 2002, pp. 149–59.
- [4] C. M. Gauger, "Performance of converter pools for contention resolution in optical burst switching," in OptiComm 2002: Optical Networking and Communications, N. Ghani and K. M. Sivalingam, eds., Proc. SPIE 4874, pp. 109-117.
- [5] Buchta, H.; Patzak, E.; Saniter, J.; Gauger, C.M., "Maximal and effective throughput of optical switching nodes for optical burst switching". Beiträge zur 4. ITG-Fachtagung Photonische Netze, 2003.
- [6] M. Yoo and C. Qiao, "Just-Enough-Time (JET): A High Speed Protocol For Bursty Traffic in Optical Networks," Proc. IEEE/LEOS Conf. Tech. Global Info. Infrastructure, Aug. 1997, pp. 26–27.
- [7] X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Priority-based Wavelength Assignment Algorithm for Burst Switched Photonic Networks," Proc. OFC, 2002, p. 765–67.
- [8] C. Qiao and M. Yoo. "Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an optical Internet". Journal of High Speed Networks, 8(1):69-84, 1999.
- [9] A. Rostami. "On Performance of Optical Buffers with Fixed Length Packets". Germany.Ahmad Rostamiy, and Shyam S. Chakraborty , Proc. Of 2nd IFIP WOCN Conference (WOCN 2005), Dubai, UAE, March 2005
- [11] Vishwas S. Puttasubbappa, Harry G. Perros. "An Approximate Queueing Model for Limited-Range Wavelength Conversion in an OBS Switch". Networking 2005 May 2 - 6, 2005 University of Waterloo, Waterloo Ontario Canada.
- [12] Tao Zhang, Kejie Lu, and Jason P. Jue, "An Analytical Model for Shared Fiber Delay Line Buffers in Asynchronous Optical Packet and Burst Switches," IEEE International Conference on Communications (ICC) 2005.

- [13] M. Zukerman, E. W. M. Wong, Z. Rosberg, M. Lee and H. L. Vu, "On Teletraffic Applications to OBS", IEEE Communications Letters, vol. 8, no. 2, February 2004, pp. 116-118.
- [14] "Some New Markovian Models for Traffic and Performance Evaluation in Telecommunication Networks". Ram Chakka (Norfolk State University, USA) and Tien Van Do (Budapest University of Technology and Economics, Hungary) HET-NETs'04
- [15] Barakat, N. Sargent, E.H. 'An accurate model for evaluating blocking probabilities in multi-class OBS systems', IEEE Communications Letters, vol.8, no. 2, Feb. 2004, pp. 1187-1197
- [16] "End-to-End Burst Loss Probabilities in an OBS Network with Simultaneous Link Possession", T. Battestilli and H. Perros, *Proceedings of the Third International Workshop on Optical Burst Switching, WOBS3 (co-located with Broadnets 2004)*, San Jose, CA, October 2004
- [17] J. Xu, C. Qiao and J. Li, "Efficient channel scheduling algorithms in optical burst switched networks," Proc. IEEE INFOCOM 2003, vol. 3, pp. 2268-2278, 2003.
- [18] L. Xu, H. Perros and G. Rouskas, "A Queueing Network Model of an Edge Optical Burst Switching Node", In Proceedings of INFOCOMM, volume 3, pages 2019-2029, 2003.
- [19] Z. Rosberg, H. L. Vu, M. Zukerman and J. White, " Performance Analyses of Optical Burst Switching Networks", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 7, Sept. 2003, pp. 1187-1197
- [20] J. Ramamirtham and J. Turner. "Design of wavelength converting switches for optical burst switching". In proceedings of INFOCOMM, volume 1, pages 362-370, 2002.
- [21] Z. Rosberg, H. L. Vu, J. White, and M. Zukerman, "Reduced load fixed point approximation for performance evaluation of optical burst switching networks," Proceedings of COIN-PS 2002, Cheju Island, Korea, July, 2002.
- [22] P. Fan, C. Feng, Y. Wang, and N. Ge. "Investigation of the time-offset-based QoS support with optical burst switching in wdm networks". In Proceeding of IEEE ICC, volume 5, pages 2682-2686, 2002.
- [23] M. Yoo, C. Qiao and S. Dixit, "Optical Burst Switching for Service Differentiation in the Next Generation Optical Internet", IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 2, pp.98-104, Feb. 2001.
- [24] Gauger, C.M.; Köhn, M.; Scharf, J. "Comparison of Contention Resolution Strategies in OBS Network Scenarios" Proceedings of the 6th

- International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2004, Wroclaw, 2004
- [25] Gauger, C.M.; Köhn, M.; Scharf, J. "Performance of Contention Resolution Strategies in OBS Network Scenarios" Proceedings of the 9th Optoelectronics and Communications Conference/3rd International Conference on the Optical Internet (OECC/COIN2004), Yokohama, 2004
- [26] Steinar Bjornstad, Martin Nord, Dag. R.Hjelme, Norvald Stol, Franco Callegati, Walter Cerroni, Cristoph M. Gauger, Davide Careglio, Gabriel Junyent, Chris Devellder, Jan Cheyns, Erik Van Breusegem... "Optical Burst and Packet Switching: Node and Network Design, Contention Resolution and Quality of Service". A: Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications. IEEE , 2003, p. 775-782
- [27] "Efficient Scheduling for High-Throughput OBS Networks with Partial Wavelength Conversion" . V. Mehta, N. Barakat, E. H. Sargent [University of Toronto] Broadnets 2004
- [28] X. Lu and B. Mark, "A New Performance Model of Optical Burst Switching with Fiber Delay Lines", In Proceedings of IEEE ICC, volume 2, pages 1365-1369, 2003.
- [29] V. M. Vokkarane, G. Thodime, V. Challagulla, and J. P. Jue, "Channel Scheduling Algorithms using Burst Segmentation and FDLs for Optical Burst-Switched Networks," Proceedings, IEEE ICC 2003, Anchorage, AK, May 2003.
- [30] S. Tan, M. Gurusamy and B. Wang, "Burst Rescheduling with Wavelength and Last-hop FDL Reassignment in WDM Optical Burst Switching Networks", In Proceedings of IEEE ICC, volume 2, pages 1448-1452, 2003.
- [31] "Dynamic contention resolution in optical burst switched networks with partial wavelength conversion and fiber delay lines". Bin Wang; Lella, N.; Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE Volume 3, 29 Nov.-3 Dec. 2004 Page(s):1862 - 1866 Vol.3
- [32] X. Lu and B.L. Mark, "Analytical Modeling of Optical Burst Switching with Fiber Delay Lines," in Proc. IEEE/ACM MASCOTS'2002, pp. 501-506, Fort Worth, Texas, Oct. 2002.
- [33] "Performance Modeling of Optical-Burst Switching With Fiber Delay Lines". Xiaomin Lu, Student Member, IEEE, and Brian L. Mark, Member, IEEE. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 52, NO. 12, DECEMBER 2004
- [34] Xiaomin Lu and B.L. Mark. "A new performance model of optical burst switching with fiber delay lines". In Proceedings of the IEEE International



- Conference on Communications, 2003. ICC '03., volume 2, pages 1365 {1369, May 2003.
- [35] S.K. Lee, D. Griffith, and K. Sriram, "Dynamic Deflection Routing and Virtual Wavelength Assignment in Optical Burst-Switched Networks," submitted to GlobeComm 2004.
- [36] Ching-Fang Hsu, Te-Lung Liu, and Nen-Fu Huang, "On the Deflection Routing in QoS Supported Optical Burst-Switched Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC 2002), New York, USA, April 2002, pp. 2786-2790.
- [37] S. Kim, N. Kim, and M. Kang. "Contention resolution for optical burst switching networks using alternative routing". In Proc. IEEE International Conference on Communications, volume 5, pages 2678 –2681, Apr. 2002.
- [38] C. Hsu, T. Liu, and N. Huang, "Performance analysis of deflection routing in optical burst-switched networks", IEEE INFOCOM, vol.1, pp. 66-73, NY, June 23-27, 2002.
- [39] S.K. Lee, K. Sriram, H.S. Kim, and J.S. Song, "Contention-based Limited Deflection Routing in OBS Networks", IEEE Proceedings Globecom, December 2003.
- [40] A. Zalesky et al. 'Reduced load Erlang fixed point analysis of optical burst switched networks with deflection routing and wavelength reservation'. In Proceedings of the First International Workshop on Optical Burst Switching, October 2003.
- [41] F. Borgonovo, L. Fratta and J. Bannister, "On the Design of Optical Deflection-Routing Networks," IEEE INFOCOM 1994, pp. 120-129.
- [42] V. M. Vokkarane, J. P. Jue, and S. Sitaraman, "Burst segmentation: An approach for reducing packet loss in optical burst switched networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC) 2002, vol. 5, New York, NY, Apr. 2002, pp. 2673–2677.
- [43] V. Vokkarane and J. P. Jue, "Prioritized Burst Segmentation and Composite Burst Assembly Techniques for QoS Support in Optical Burst Switched Networks," (pdf) IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 7, pp. 1198-1209, September 2003.
- [44] Chee-Wei Tan, G. Mohan, and John Chi-Shing Lui "Achieving Proportional Loss Differentiation Using Probabilistic Preemptive Burst Segmentation in Optical Burst Switching WDM Networks," To appear in Proceedings of IEEE Globecom 2004, Dallas, Texas, USA, November 2004.

- 
- [45] V. Vokkarane, J.P. Jue, and S. Sitaraman. "Burst segmentation: An approach for reducing packet loss in optical burst switched networks". In Proceeding of IEEE ICC, volume 5, pages 2673-2677, 2002.
  - [46] M. Neuts, Z. Rosberg, H. L. Vu, J. White, and M. Zukerman, "Performance enhancement of optical burst switching using burst segmentation", In Proceedings of IEEE ICC, volume 3, pages 1828-1832, 2003.

# ANNEXES

## Índex

<b>Annex 1</b>	<b>Introducció a la tecnologia OBS .....</b>	<b>62</b>
1.1	Inicis de la tecnologia .....	62
1.2	Commutació de Ràfegues a nivell Òptic (OBS).....	62
1.3	Funcionament bàsic d'una xarxa OBS .....	63
1.4	Generació de ràfegues.....	65
1.5	Mecanismes d' <i>Scheduling</i> .....	66
1.6	Protocols de reserva: JET .....	67
1.7	Classificació de Mecanismes de Resolució de Contencions .....	68
1.7.1	<i>Dropping</i> .....	68
1.7.2	<i>Deflection</i> .....	68
1.7.3	<i>Preemption</i> .....	69
1.8	Mecanismes de resolució de contencions estudiats.....	69
1.8.1	FDL (Fiber Delay Lines) .....	69
1.8.2	Conversió de Longitud d'Ona .....	71
1.9	Altres mecanismes de resolució de contencions .....	72
1.9.1	Deflection Routing .....	72
1.9.2	Segmentació de ràfegues.....	73
<b>Annex 2</b>	<b>Model Analític per a Conversió de Longituds d'Ona.....</b>	<b>74</b>
2.1	Descripció del model .....	74
2.2	Resolució del sistema i càlcul de la probabilitat de pèrdua per font.....	75
2.2.1	Model amb $L=1$ , $Q=5$ .....	75
2.2.2	Model amb $L=2$ , $Q=5$ .....	80
2.2.3	Model amb $L=3$ , $Q=5$ .....	83
2.2.4	Probabilitat de pèrdua per font en funció del tràfic ofert .....	85
2.3	Comparativa del model analític amb els resultats de la simulació .....	88
<b>Annex 3</b>	<b>Model Analític per a Fibres de Retard (FDLs) .....</b>	<b>90</b>
3.1	Descripció del model .....	90
3.1.1	Nomenclatura .....	91
3.2	Resolució del sistema i càlcul de la probabilitat de pèrdua per font.....	91
3.2.1	Probabilitat de pèrdua per font en funció del tràfic ofert .....	96
3.3	Comparativa del model analític amb resultats de la simulació .....	97

# 1. Introducció a la tecnologia OBS

## 1.1. Inicis de la tecnologia

Durant els últims anys, l'ús d'Internet s'ha estès de forma massiva. L'augment del nombre d'usuaris i la diversificació de les seves necessitats, han motivat un replantejament de les característiques de la xarxa. No només es requereix més ample de banda sinó que cal gestionar-lo de manera flexible i eficient.

El primer pas cap a la Internet del futur (*Next Generation Internet*) passa per dissenyar i construir un nou nucli a nivell òptic que permeti un establiment dinàmic de les connexions i assoleixi velocitats de centenars de terabits per segon.

A finals dels anys 80, va començar a desenvolupar-se la tecnologia WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*), basada en la transmissió d'informació de forma simultània per les diferents longituds d'ona presents a la fibra òptica. Malgrat la capacitat potencial que ofereix la tecnologia WDM, fins a l'actualitat s'ha utilitzat bàsicament com a medi de transport entre dos nodes consecutius de la xarxa.

La manca d'una tecnologia que permeti processar el senyal directament en el domini òptic a les velocitats de transmissió actuals i la falta d'un equivalent òptic a les memòries elèctriques, obliga a realitzar una conversió del domini òptic a elèctric per poder emmagatzemar i processar el senyal, i novament reconvertir el senyal al domini òptic per a la seva transmissió en el següent enllaç. Aquestes conversions O/E/O en cada node intermedi són els veritables colls d'ampolla en la transmissió d'informació a través de la xarxa.

La solució òptima seria una xarxa òptica de commutació de paquets on cada unitat de dades disposés d'informació suficient per assolir el destí i en la qual el processat d'informació als nodes intermedis es realitzés directament en el domini òptic, sense alentir la velocitat de transmissió de la informació. No obstant, fins que la tecnologia òptica no estigui suficientment madura per realitzar aquesta proposta, s'ha desenvolupat una alternativa a mig camí entre la commutació de longituds d'ona i la commutació de paquets a nivell òptic. Aquesta tecnologia es coneix amb el nom de commutació de ràfegues a nivell òptic (*Optical Burst Switching*).

## 1.2. Commutació de Ràfegues a nivell Òptic (OBS)

La commutació de ràfegues a nivell òptic (*Optical Burst Switching*) és una tecnologia de commutació desenvolupada per treure profit de les millors característiques de la commutació de longituds d'ona i la commutació de paquets a nivell òptic [1].

Malgrat les diferents definicions i variants de la tecnologia, totes comparteixen dues característiques bàsiques:

- Les dades del client s'agreguen/desagreguen als extrems de la xarxa OBS (node frontera o *edge*) formant ràfegues de longitud variable.
- El pla de dades és independent del pla de control. La informació de control s'envia per un canal o longitud d'ona diferent als canals utilitzats per a la transmissió de les ràfegues, i es processa a nivell electrònic; mentre que les dades es transmeten de forma transparent en el domini òptic. Per tant, només cal realitzar conversions O/E/O sobre un conjunt reduït de canals de control.

### 1.3. Funcionament bàsic d'una xarxa OBS

En una xarxa OBS, les dades dels usuaris s'agreguen als nodes frontera d'ingrés (*ingress nodes*) generant ràfegues de longitud variable. Cada ràfega té associat un paquet de control que s'encarrega de reservar els recursos necessaris per a la transmissió de la ràfega a través de la xarxa. Si el paquet de control té èxit en la reserva de recursos extrem a extrem, la ràfega es transmet de forma transparent en el domini òptic. Les unitats de dades originals contingudes en cada ràfega es desagreguen al node frontera de sortida (*egress node*) de la xarxa OBS.

A diferència de commutació de paquets, les ràfegues no tenen una part de dades i una part de capçalera sinó que la ràfega és bàsicament l'equivalent a la part de dades i cada ràfega té associat un paquet de control que conté la informació pròpia de la capçalera (longitud de la ràfega, nombre d'unitats de dades d'usuari que conté, node destí, etc.)

El paquet de control es transmet per un canal de control dedicat. En general, aquests paquets tenen una longitud molt inferior a la de les ràfegues, i, per tant, un únic canal de control és capaç de senyalitzar diverses desenes de canals de dades. En cadascun dels nodes intermedis de la xarxa que travessa, el paquet de control és processat en el domini electrònic. Si els recursos sol·licitats estan disponibles, aquest paquet es transmet cap al següent node en direcció al destí. D'aquesta manera, el paquet de control prepara un camí extrem a extrem per tal que la ràfega associada es pugui transmetre a nivell òptic sense necessitat de processar cap mena d'informació per part dels nodes intermedis.

Quan es tracta de xarxes metropolitanas i d'àrea extensa, el diàmetre de la xarxa és superior als centenars de kilòmetres. En aquests entorns, esperar el reconeixement de l'èxit de la reserva en tots els nodes intermedis abans d'iniciar la transmissió de la ràfega, pot suposar un retard massa elevat.

Per aquest motiu sovint s'utilitzen mecanismes de senyalització d'una sola direcció (*one-way*). És a dir, l'enviament de la ràfega s'inicia després de la transmissió del paquet de control associat però sense saber si la reserva tindrà èxit extrem a extrem. El temps que transcorre entre l'enviament del paquet de

control i l'inici de la transmissió de la ràfega s'anomena *offset*. L'*offset* ha de ser suficientment gran per garantir que el paquet de control es processi en tots els nodes intermedis fins al destí.

En funció de la posició dins la xarxa i de les tasques que realitzen, els nodes d'una xarxa OBS es poden classificar de la següent manera [1]:

- Nodes frontera (*edge nodes*)

- Nodes frontera d'entrada (*ingress nodes*)

Els nodes d'entrada s'encarreguen de la **generació de ràfegues** d'informació, agrupant el tràfic que reben de les diferents xarxes a les quals estan connectats (ATM, IP, etc.). Abans de l'enviament de cada ràfega, els nodes d'entrada a la xarxa OBS han de generar i transmetre el paquet de control associat a la ràfega a enviar, en el qual s'anunciarà l'enviament de la ràfega i es sol·licitaran els recursos necessaris per a que aquesta es pugui transmetre de forma transparent als nodes intermedis de la xarxa.

- Nodes frontera de sortida (*egress nodes*)

S'encarreguen de recuperar les unitats d'informació originals contingudes dins de cada ràfega.

- Nodes interiors (*core nodes*)

Els nodes interiors de la xarxa OBS han de processar i gestionar tota la informació de control que reben d'altres nodes interiors o directament dels nodes frontera. Són els encarregats del processament dels paquets de control, tasca que consisteix, bàsicament, en comprovar si els recursos sol·licitats per a la transmissió d'una ràfega d'informació estan disponibles.

En el cas que els recursos sol·licitats per un paquet de control no estiguin disponibles, la ràfega serà descartada quan arribi al node, si no es disposa d'algun mecanisme de resolució de contencions. La política comuna de reserva de recursos que duen a terme els nodes d'una xarxa OBS ve definida pels **protocols de reserva**. Així doncs, un protocol de reserva determina de quina forma es durà a terme la reserva de recursos extrem a extrem dins una xarxa OBS i incideix directament en el seu comportament. En general, s'utilitzen mecanismes de reserva unidireccionals (*one-way*) per tal de reduir el retard extrem a extrem en la transmissió de ràfegues. El protocol Just-Enough-Time (JET) [6] és un exemple de mecanisme de reserva unidireccional.

La figura 1.1 il·lustra els diferents elements que componen una xarxa OBS:

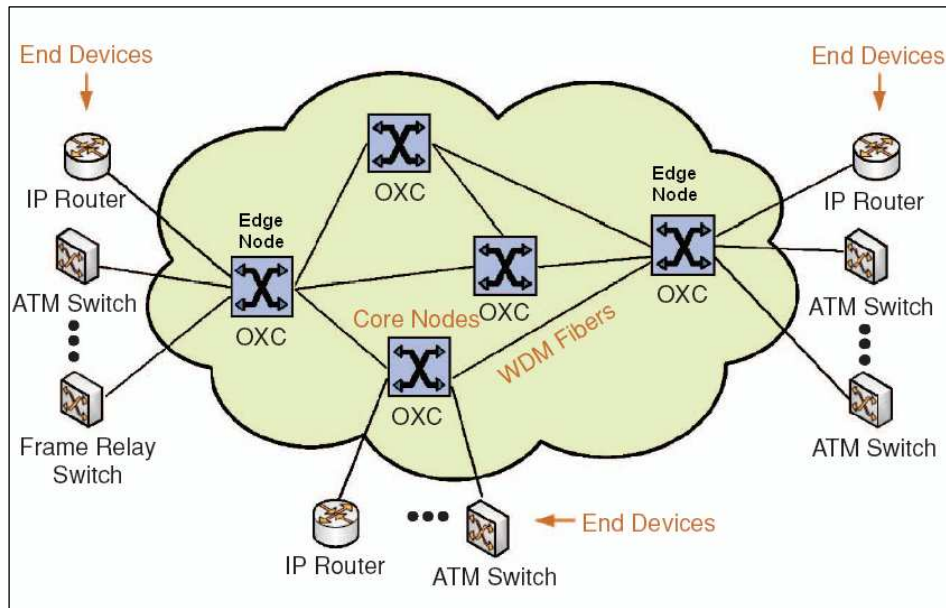


Fig. 1.1 Elements d'una xarxa OBS

## 1.4. Generació de ràfegues

El procés de construcció de les ràfegues als nodes frontera de la xarxa OBS s'anomena agregació de ràfegues (*burst assembly*). Generalment existeixen diferents cues d'agregació per a cada tipus de tràfic o prioritat i en funció de l'algorisme utilitzat, les característiques del tràfic resultant varien considerablement [2] [3]. Els algorismes d'agregació de ràfegues es poden classificar en els següents tipus [1]:

- Algorismes basats en temps

S'agrupen els paquets que han arribat durant un període de temps, determinat per un temporitzador. El valor del temporitzador ha de fixar-se amb molta cura: si el valor és molt gran, el retard introduït a l'extrem de la xarxa pot resultar intolerable, i, si és molt petit, pot donar lloc a la generació de ràfegues petites i, per tant, un excés de paquets de control.

- Algorismes basats en longitud de ràfega

S'estableix un llindar que defineix la longitud mínima de la ràfega. Aquesta tècnica no garanteix un retard mínim perquè es pot trigar molta estona en igualar o superar el llindar.

- Algorismes híbrids.

Hi ha diverses propostes que combinen els dos esquemes anteriors. És a dir, la ràfega es construeix quan es supera un llindar de longitud mínima o bé quan expira un temporitzador.

- Algoritmes adaptatius.

Es modifica dinàmicament el llindar mínim o el valor del temporitzador en funció de les condicions actuals de la xarxa. Aquests algorismes proporcionen un rendiment més elevat però són més complexes.

## 1.5. Mecanismes d'*Scheduling*

Tant els nodes frontera com els nodes intermedis de la xarxa fan servir diferents algorismes que es poden utilitzar per seleccionar la longitud d'ona per a l'enviament de la ràfega, així com per decidir l'interval de transmissió d'aquesta, l'ús d'un o altre mecanisme té un impacte sobre el rendiment final de la xarxa: són el que s'anomena mecanismes d'*scheduling*. Els algorismes bàsics [1] són:

- Horizon o LAUC (*latest available unscheduled channel*).

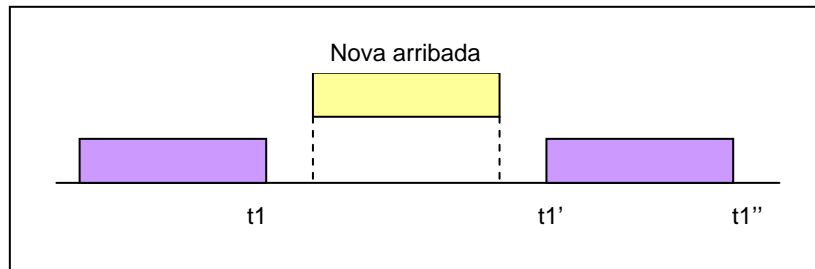
Es guarda informació de l'horitzó de cada canal, és a dir, l'instant temporal major entre els instants de finalització de transmissió de les ràfegues programades en una determinada longitud d'ona. L'algorisme escull la longitud d'ona amb l'horitzó més proper a l'instant d'arribada de la nova ràfega (els canals amb horitzons superiors als instants d'arribada de la ràfega a programar es consideren no disponibles).

- LAUC-VF (*latest available unused channel with void filling*).

Es guarda informació de totes les reserves de ràfegues en cada canal, de manera que l'algorisme pot programar la transmissió de la ràfega entre dues ràfegues ja programades. Depenent de com es classifiquin els canals i del criteri per seleccionar-los (en funció de minimitzar el buit inicial, el final o bé el promig) es defineixen diferents variants de l'algorisme.

A (**Fig 1.2**) s'il·lustra la diferència entre Horizon/LAUC i LAUC-VF. A l'exemple, la reserva corresponent a la nova arribada no es pot realitzar utilitzant l'algorisme Horizon o LAUC perquè l'horitzó de la longitud d'ona ( $t_1''$ ) és superior a l'instant d'arribada de la ràfega. En canvi, l'algorisme LAUC-VF permet realitzar la reserva ja que disposa d'informació de tots els instants de finalització de ràfegues (en aquest cas,  $t_1$  i  $t_1''$ ).





**Fig. 1.2** Horizon/LAUC i LAUC-VF

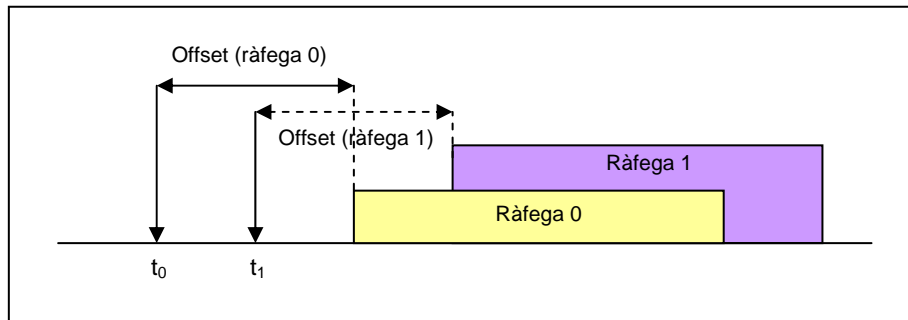
## 1.6. Protocols de reserva: JET

A l'hora de reservar els recursos per a la transmissió de les ràfegues als enllaços d'una xarxa OBS, es poden utilitzar diferents mecanismes de reserva de recursos. El protocol Just-Enough-Time (JET) [1] és un dels protocols de reserva de recursos més populars.

El JET és un protocol distribuït on la informació referent al retard entre el paquet de control i la ràfega de dades (és a dir, l'*offset*) i la duració de la ràfega, estan continguts dins el paquet de control. Gràcies a aquesta informació, els nodes reserven els recursos exclusivament durant la transmissió de la ràfega, és a dir, la reserva s'inicia just abans que arribi la ràfega de dades (tècnica que s'anomena de reserva retardada o *delayed reservation*) i finalitza just quan acaba la transmissió de la ràfega (mecanisme conegut com a reserva tancada o *close-ended reservations*). D'aquesta manera es pot fer un ús més exhaustiu de l'ample de banda.

Una característica a destacar del protocol JET és que les reserves es fan de forma unidireccional: el node origen desconeix si el paquet de control ha pogut reservar els recursos extrem a extrem quan inicia la transmissió d'una ràfega. Per tant, es pot produir contenció quan més d'una ràfega vol utilitzar els mateixos recursos en el mateix interval temporal (dins una determinada longitud d'ona i per un mateix enllaç de sortida, a un node de la xarxa OBS).

La **Fig.1.3** il·lustra un exemple de contenció entre dues ràfegues. A l'instant  $t_0$  un determinat node OBS processa un paquet de control i programa la reserva de recursos per a la transmissió de la ràfega 0 tenint en compte l'*offset* corresponent. Com que els recursos estan disponibles, la reserva es realitza amb èxit i per tant quan arribi la ràfega es podrà transmetre de forma satisfactòria. Anàlogament, a l'instant  $t_1$ , el mateix node processa el paquet de control associat a la ràfega 1. No obstant, els recursos sol·licitats per a la transmissió d'aquesta ràfega (interval temporal, port de sortida i longitud d'ona) estan ocupats per a la transmissió de la ràfega 0, per tant, no es pot realitzar la reserva i, si no es disposa de mecanismes de resolució de contencions, la ràfega 1 serà descartada quan arribi al node.



**Fig. 1.3** Exemple de contenció entre ràfegues

## 1.7. Classificació de Mecanismes de Resolució de Contencions

Quan s'utilitzen mecanismes de reserva unidireccionals, els nodes d'ingrés inicien l'enviament de les ràfegues sense saber si els recursos necessaris estan disponibles extrem a extrem. Aquest comportament, juntament amb la manca d'un equivalent en el domini òptic de les memòries RAM electròniques, implica que es pugui produir contenció entre ràfegues, és a dir, que més d'una ràfega competeixi per utilitzar els mateixos recursos en un enllaç de la xarxa.

La contenció és un dels problemes més greus de les xarxes OBS, ja que provoca pèrdues d'informació. Per tant és important desenvolupar mecanismes per eliminar-la o, si més no, intentar reduir-la o controlar-la.

Existeixen tres esquemes possibles a l'hora de tractar la contenció: *dropping*, *deflection* i *preemption* (eliminació, desviació i preferència) [1]:

### 1.7.1. Dropping

Si no es disposa de mecanismes de resolució de contencions, quan un paquet de control no pot reservar els recursos sol·licitats, la ràfega associada simplement és eliminada. En l'esquema OBS bàsic, la recuperació de la informació es deixa a càrrec dels protocols de les capes superiors.

### 1.7.2. Deflection

En aquest esquema, davant una situació de contenció, s'intenta enviar la ràfega per un canal de sortida que no era el predeterminat en principi. Aquesta opció pot ser aplicada en diferents dominis:

- Nivell de longitud d'ona

La ràfega s'envia per una longitud d'ona diferent a la que en principi havia de ser la seva longitud d'ona de sortida del node. Per fer això es

requereix que el node tingui la capacitat de realitzar conversions de longitud d'ona.

- Nivell d'espai

La ràfega s'envia utilitzant un port de sortida diferent al que en principi havia de ser el port de sortida predeterminat. D'aquesta manera, la ràfega segueix un camí alternatiu per arribar al destí.

- Nivell temporal.

S'emula el comportament dels buffers electrònics convencionals utilitzant fibres de retard (*Fiber Delay Lines* o FDLs), és a dir, és retardada l'enviament de la ràfega utilitzant fibres auxiliars on es confina la ràfega durant un temps determinat.

### 1.7.3. Preemption

És possible assignar prioritats per tal de determinar quina ràfega, d'entre les que entren en contenció, pot reservar els recursos disputats. D'aquesta manera, es permet desfer una reserva prèviament realitzada per a cedir els recursos a una ràfega de major prioritat.

Tots aquests mecanismes de resolució de contencions poden coexistir i operar conjuntament.

D'altra banda, existeixen propostes basades en prevenir la contenció mitjançant mètodes de predicció basats en les estadístiques de pèrdua de ràfegues en cada longitud d'ona [7]. D'aquesta manera, es programa la transmissió de les ràfegues utilitzant la longitud d'ona amb menys probabilitat de contenció.

## 1.8. Mecanismes de resolució de contencions estudiats

En aquest treball s'han escollit, analitzat i estudiat dues propostes de resolució de contencions: fibres de retard i conversió de longitud d'ona. A continuació s'expliquen amb més detall.

### 1.8.1. FDL (Fiber Delay Lines)

Les fibres de retard o FDLs són un cas de desviació a nivell temporal. Una fibra de retard pretén emular un *buffer* electrònic convencional, però el seu funcionament i les seves limitacions són molt diferents, ja que una FDL només pot emmagatzemar una ràfega durant un temps determinat que depèn de la longitud de la fibra.

Hi ha diferents arquitectures dels nodes que disposen de fibres de retard. Els paràmetres que caracteritzen cadascuna de les diferents arquitectures són els següents:

- Ubicació de les FDL.

Les fibres de retard poden estar ubicades a l'entrada o a la sortida del node, és a dir, abans o després, respectivament, del mòdul de control del commutador. En funció de la seva col·locació, el comportament del node serà diferent.

- Dimensionat

En el dimensionat es tenen en compte diferents punts:

- Nombre de longituds d'ona de les que disposa la fibra de retard.
- Retard que proporciona la fibra (en funció de la seva longitud i de la possibilitat o no d'utilitzar una mateixa fibra de retard de forma recursiva).
- Ús d'una matriu de fibres de retard per a cada línia d'entrada o bé d'una matriu compartida (és a dir, un conjunt de fibres de retard compartides per totes les entrades del node).

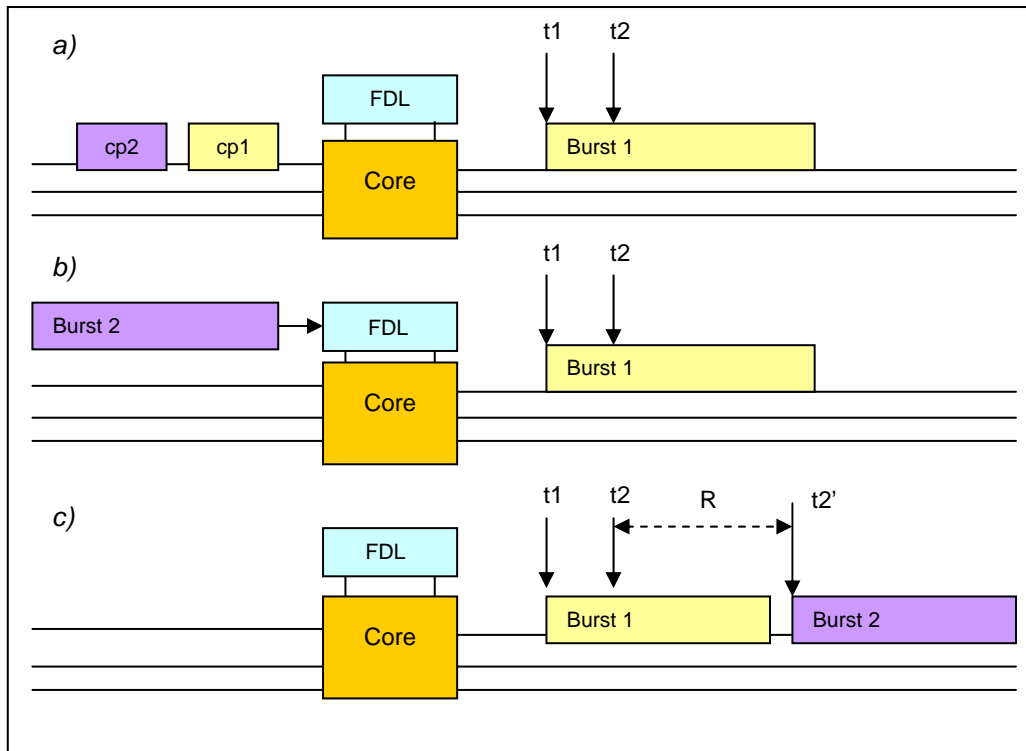
- Estratègia de reserva.

La reserva del canal de sortida es pot realitzar abans d'entrar a la FDL o just en el moment que la ràfega abandona la FDL.

Un element comú dels nodes OBS amb FDL [4] és l'ús de convertidors de longitud d'ona. En general, el nombre de longituds d'ona disponibles a les fibres de retard és inferior al nombre de longituds d'ona dels enllaços d'entrada i de sortida, per tant, és necessari realitzar conversió de longitud d'ona abans de poder utilitzar les fibres de retard.

La **Fig. 1.4** il·lustra un exemple molt senzill on es treu profit de l'ús de fibres de retard. A (**Fig. 1.4 a**) un node OBS rep i processa dos paquets de control,  $cp_1$  i  $cp_2$ . El  $cp_1$  vol realitzar una reserva per a la ràfega 1 que ha d'arribar al node a l'instant  $t_1$  i que té una durada  $\Delta t_1$ . Anàlogament, el  $cp_2$  desitja realitzar una reserva per a la ràfega 2 per a l'instant  $t_2 > t_1$  de durada  $\Delta t_2$ . Ambdues ràfegues pretenen utilitzar la mateixa longitud d'ona sobre el mateix enllaç de sortida i els seus intervals de transmissió es superposen en temps, és a dir,  $t_1 + \Delta t_1 > t_2$ . Per tant, si no s'aplica cap mecanisme de resolució de contencions, la ràfega 2 s'haurà de descartar.

No obstant, el node disposa d'una FDL que proporciona un retard  $R$  tal que  $t_1 + \Delta t_1 < t_2 + R = t_2'$ . Per tant, quan la ràfega 2 arriba al node, és confinada a la fibra de retard (**Fig. 1.4 b**) i es transmet sobre l'enllaç de sortida a l'instant  $t_2'$  (**Fig. 1.4 c**) sense que es produeixi contenció amb la ràfega 1.



**Fig. 1.4** Resolució de contencions mitjançant fibres de retard

### 1.8.2. Conversió de Longitud d'Ona

Actualment, amb l'ús de la tecnologia WDM, és possible obtenir fins a més de 32 canals (longituds d'ona) operant a uns 10Gbps cadascun. En una xarxa OBS, els nodes d'entrada (*ingress nodes*) transmeten les ràfegues de dades en el domini òptic, i si la longitud d'ona utilitzada per a la transmissió de les dades és la mateixa en tots els enllaços del camí es compleix la restricció de continuïtat en longitud d'ona (*Wavelength Continuity Constraint*). Anàlogament a la problemàtica d'establir un *lightpath* per a cada connexió (camí extrem a extrem emprant una mateixa longitud d'ona) a les xarxes WDM d'encaminament per longitud d'ona, el compliment de la restricció de continuïtat en longitud d'ona suposa una dificultat afegida a la transmissió d'informació extrem a extrem i, en el cas de les xarxes OBS, aquesta problemàtica es tradueix en un increment de la contenció entre ràfegues.

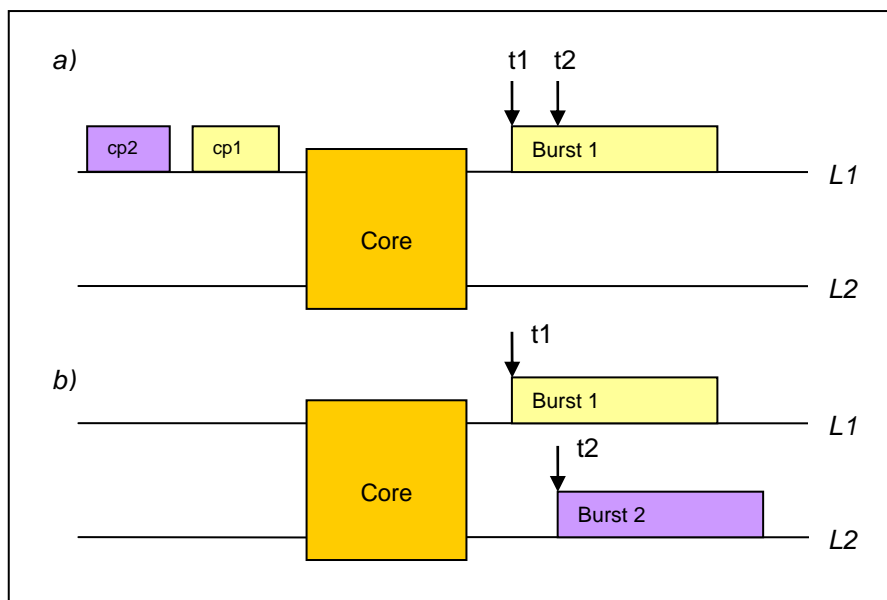
La conversió de longitud d'ona permet reduir la contenció entre ràfegues a canvi d'incrementar la complexitat dels dispositius de la xarxa. La idea bàsica consisteix en utilitzar una longitud d'ona lliure del port de sortida per transmetre una ràfega que arriba al node per una longitud d'ona diferent a aquesta, i que no està disponible al port de sortida en l'interval temporal sol·licitat per la ràfega en qüestió.

Existeixen dos tipus de conversió de longitud d'ona: total o parcial. En el cas de la conversió total s'assumeix que una ràfega que viatja per una longitud d'ona pot ser convertida a qualsevol altre longitud d'ona d'entre totes les disponibles

al port de sortida. La conversió parcial només permet realitzar conversió sobre un conjunt finit de longituds d'ona.

La **Fig. 1.5** mostra un exemple de conversió de longitud d'ona. Un node OBS que disposa de dos longituds d'ona ( $L1$  i  $L2$ ), rep dos paquets de control consecutius  $cp_1$  i  $cp_2$  que volen programar la transmissió d'una ràfega utilitzant  $L1$ . El temps d'arribada de les respectives ràfegues és  $t_1$  i  $t_2$ , amb una durada de  $\Delta t_1$  i  $\Delta t_2$ ; tal que  $t_1 < t_2 < \Delta t_1$ . El node reserva els recursos pel paquet de control 1 (**Fig. 1.5a**), però quan arriba  $cp_2$  la reserva no es pot fer ja que  $t_1 < t_2 < \Delta t_1$ .

En cas de no disposar de mecanismes de resolució de contencions, es produiria la pèrdua de la ràfega 2; però el node disposa de la capacitat de conversió de longitud d'ona, per tant, com que a l'instant  $t_2$  la longitud d'ona  $L2$  està lliure, es pot programar la transmissió de la ràfega 2 per aquella longitud d'ona (**Fig. 1.5b**), evitant així la contenció.



**Fig. 1.5** Resolució de contencions mitjançant conversió de longitud d'ona

## 1.9. Altres mecanismes de resolució de contencions

Els mecanismes de resolució de contencions comentats en l'apartat anterior són aquells sobre els quals s'ha centrat aquest treball però no són els únics possibles. A continuació es citen altres mecanismes de resolució de contencions existents.

### 1.9.1. Deflection Routing

És un mecanisme de resolució de contencions per desviació a nivell d'espai. És a dir, quan es produeix contenció, es programa la transmissió de la ràfega

utilitzant un port de sortida diferent a l'òptim. Per tant, tant el paquet de control, com la ràfega associada, segueixen un camí diferent en nombre de salts i/o cost, al camí òptim.

La complicació del *deflection routing* rau en el càlcul dels *offsets* que, en principi, es basa en el nombre de nodes que ha de travessar el paquet de control. Si el paquet de control travessa més nodes que els del camí predeterminat, la diferència temporal entre el paquet de control i la ràfega es redueix i pot succeir que la ràfega de dades s'avanci al paquet de control i, per tant, la ràfega es perdi. D'altra banda, cal evitar que es produeixin llaços tancats o bucles, possibilitat existent al escollir un camí diferent del predeterminat i que, novament, es tradueixen en la pèrdua de la ràfega.

### 1.9.2. Segmentació de ràfegues

Davant un cas de contenció, l'esquema de segmentació de ràfegues es basa en dividir la ràfega en fragments i tractar aquests fragments de forma individualitzada; aquesta tècnica s'anomena segmentació de ràfegues (*burst segmentation* o OCBS) [8].

La idea fonamental és que abans d'eliminar la ràfega sencera, se n'intenti salvar una part. Aquest esquema però, implica incrementar la generació de capçaleres i finals de ràfega per a aquests nous fragments i complica l'estructura i el processat dels paquets de control.

## 2. Model Analític per a Conversió de Longituds d'Ona

En aquest capítol es presenta un model analític per tal d'avaluar la probabilitat de pèrdua de ràfegues en una xarxa OBS formada per  $N$  nodes, numerats de l'1 al  $N$  i connectats segons una topologia en línia. Tots els nodes disposen de capacitat per a realitzar conversió total de longituds d'ona.

### 2.1. Descripció del model

Cada node de la xarxa genera tràfic segons un procés de Poisson de taxa  $\lambda_b$  ràfegues per unitat de temps, amb destí el node  $N$ -èssim de la línia. Per al tràfic generat pel propi node es disposa d'una cua de  $Q$  posicions on s'emmagatzemen les ràfegues fins que se n'inicia la transmissió.

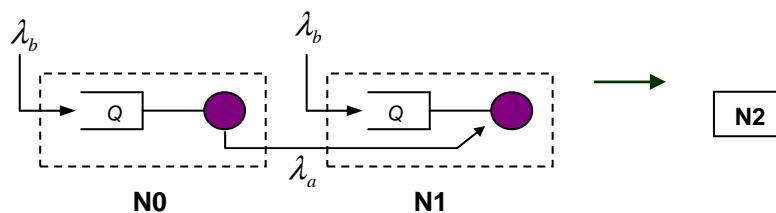
A banda del tràfic generat directament per ell mateix, cada node de la línia, excepte el primer, rep el tràfic cursat pel node anterior. El procés d'arribada d'aquest tràfic s'ha aproximat per un procés de Poisson de taxa  $\lambda_a$  ràfegues per unitat de temps i el node no disposa de cua per a emmagatzemar aquestes ràfegues.

D'altra banda, la longitud de les ràfegues es considera distribuïda exponencialment de tal manera que el temps de procés de cada ràfega es considera exponencial de promig  $1/\mu$  unitats de temps per ràfega. Cada node disposa de  $L$  servidors que modelen les longituds d'ona de l'enllaç de sortida.

Tenint en compte les aproximacions que es realitzen, cada node de la línia es modela mitjançant una cadena de Markov contínua de naixement i mort. Per tant, el sistema complet es subdivideix en sub-sistemes, on cadascun d'ells representa el comportament d'un node i l'enllaç de sortida corresponent.

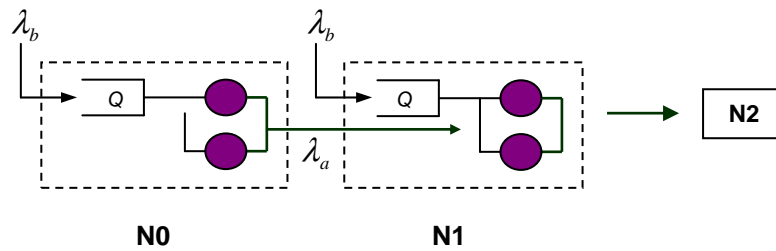
En qualsevol dels sub-sistemes, les ràfegues poden ser servides per qualsevol dels servidors que aquest conté. Aquesta característica modela l'efecte de disposar de conversió total de longitud d'ona.

L'anàlisi del model es realitza per a una xarxa amb 3 nodes ( $N_0$ ,  $N_1$  i  $N_2$ ) i s'avaluen els resultats per a 1, 2 i 3 longituds d'ona o servidors (es farà referència al nombre de longituds d'ona amb la lletra  $L$ ). Les **Fig. 1.1**, **1.2** i **1.3** il·lustren els tres possibles esquemes considerats.

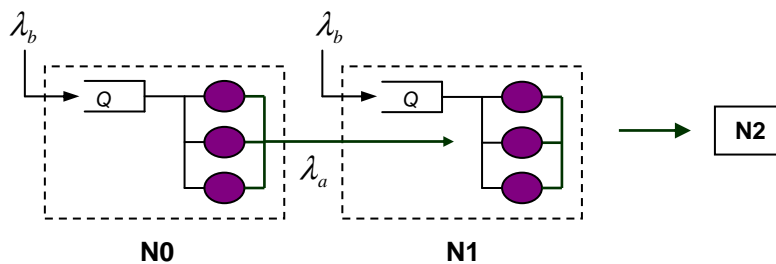


**Fig. 1.1** Esquema de la xarxa amb enllaços d'una longitud d'ona ( $L=1$ )





**Fig. 1.2** Esquema de la xarxa amb enllaços de dues longitud d'ona (L=2)



**Fig. 1.3** Esquema de la xarxa amb enllaços de tres longitud d'ona (L=3)

Cada sub-sistema, node + enllaç de sortida, es modela amb una cadena de Markov de naixement i mort on cada estat representa el número de ràfegues al sub-sistema. Així doncs, el número d'estats d'aquesta cadena depèn del número de posicions de cua Q. En l'anàlisi i els resultats que es presenten en aquest capítol s'ha fixat el valor de Q a 5 posicions de cua perquè mitjançant simulacions s'ha determinat que les pèrdues de les ràfegues generades pel propi node que es produeixen per a  $Q \geq 5$  són prou petites per considerar-les despreciables (si més no per a tràfics moderats i baixos).

Per tal de determinar les pèrdues per ràfega de cada font, s'ha resolt cada sub-sistema per separat i després, s'ha calculat la probabilitat de pèrdua per font en base al tràfic perdut d'aquesta en cada sub-sistema.

## 2.2. Resolució del sistema i càlcul de la probabilitat de pèrdua per font

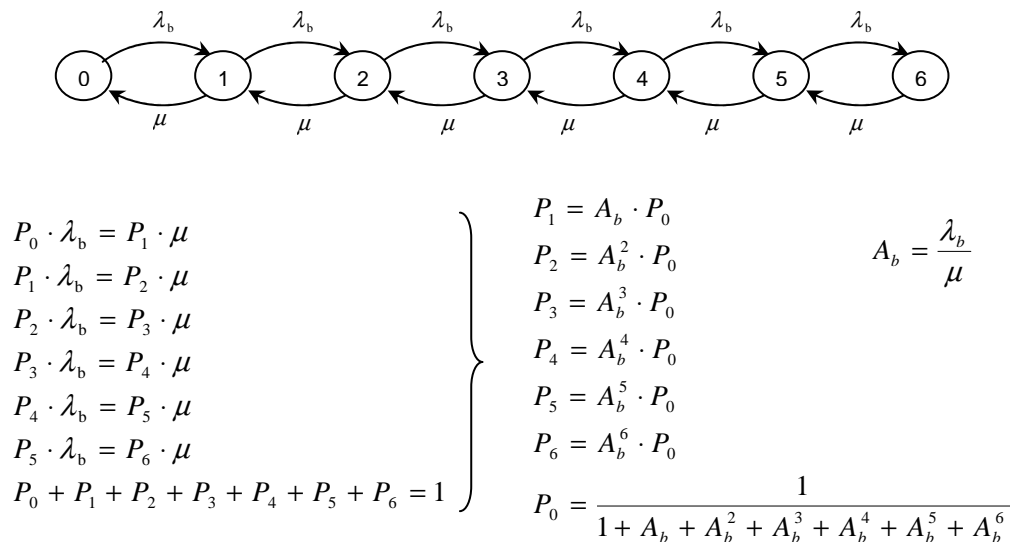
### 2.2.1. Model amb L=1, Q=5

El sistema amb una única longitud d'ona en cada enllaç no permet modelar el mecanisme de resolució de contencions basat en conversió de longitud d'ona. No obstant, es tracta del model més senzill, per tant, permet explicar la metodologia que s'utilitza per a la resolució de la resta de sistemes i alhora és útil per contrastar els resultats de simulació obtinguts per a L=1 i sense

mecanismes de resolució de contencions. És per aquests motius que es presenten els resultats obtinguts per a aquest cas.

*Sub-sistema 0:  $N_0$  + enllaç de sortida del node 0*

El sub-sistema 0, només rep el tràfic que ell mateix genera a taxa  $\lambda_b$  ràfegues per unitat de temps. Així doncs, tal com mostra la **Fig. 2.1**, la cadena de Markov associada al sub-sistema 0 correspon a un sistema M/M/L/Q+L, on L=1 i Q=5.



**Fig. 2.1** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 0 amb L=1 i Q=5

En aquest sistema, es perden ràfegues quan es produeix una arribada i el sistema està a l'estat 6, és a dir, el servidor està ocupat i la cua està plena. Com que es compleix la propietat PASTA (*Poisson Arrival See Time Average*) aquesta probabilitat de pèrdua coincideix amb la probabilitat que el sistema estigui a l'estat 6 **(2.1)**.

**(2.1)**

$$PP_{b0} = P_6 = \frac{A_b^6}{1 + A_b + A_b^2 + A_b^3 + A_b^4 + A_b^5 + A_b^6} = \frac{A_b^6}{\sum_{i=0}^6 A_b^i}$$

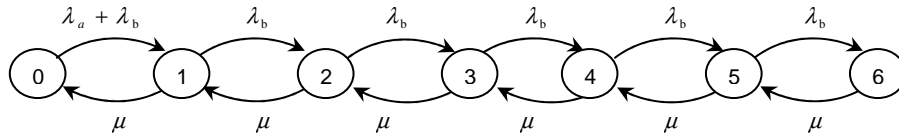
$$\boxed{PP_{b0} = \frac{A_b^6}{\sum_{i=0}^6 A_b^i}}$$

*Sub-sistema 1:  $N_1$  + enllaç de sortida del node 1*

El sub-sistema 1, a banda del tràfic generat pel node 1, rep el tràfic cursat pel sub-sistema 0, que en el model proposat s'aproxima per un tràfic de Poisson a taxa  $\lambda_a$  ràfegues per unitat de temps. Cal recordar, però, que les ràfegues

procedents del sub-sistema 0 no poden ocupar espai a la cua del sub-sistema 1, per tant, quan el sub-sistema 1 té el servidor ocupat, si es produeix l'arribada d'una ràfega que procedeix del sub-sistema 0, aquesta ràfega es perdrà.

La cadena de Markov associada al sub-sistema 1, i la seva resolució, es mostra a **Fig. 2.2**.



$$\begin{array}{l}
 P_0 \cdot (\lambda_a + \lambda_b) = P_1 \cdot \mu \\
 P_1 \cdot \lambda_b = P_2 \cdot \mu \\
 P_2 \cdot \lambda_b = P_3 \cdot \mu \\
 P_3 \cdot \lambda_b = P_4 \cdot \mu \\
 P_4 \cdot \lambda_b = P_5 \cdot \mu \\
 P_5 \cdot \lambda_b = P_6 \cdot \mu \\
 P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 P_1 = (A_a + A_b) \cdot P_0 \\
 P_2 = (A_a + A_b) \cdot A_b \cdot P_0 \\
 P_3 = (A_a + A_b) \cdot A_b^2 \cdot P_0 \\
 P_4 = (A_a + A_b) \cdot A_b^3 \cdot P_0 \\
 P_5 = (A_a + A_b) \cdot A_b^4 \cdot P_0 \\
 P_6 = (A_a + A_b) \cdot A_b^5 \cdot P_0
 \end{array}
 \quad A_b = \frac{\lambda_b}{\mu}$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b) \cdot A_b + (A_a + A_b) \cdot A_b^2 + (A_a + A_b) \cdot A_b^3 + (A_a + A_b) \cdot A_b^4 + (A_a + A_b) \cdot A_b^5}$$

**Fig. 2.2** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 1 amb L=1 i Q=5

Per al càlcul de la probabilitat de pèrdua de ràfegues en aquest sub-sistema, interessa distingir entre el tràfic perdut de la font del node 0 i el tràfic perdut de la font del node 1.

En el cas del tràfic generat pel node 0, es produirà la pèrdua d'una ràfega sempre que es produeixi l'arribada d'una ràfega procedent del sub-sistema 0 i el sub-sistema 1 estigui en un estat diferent del 0, és a dir, sempre que el servidor estigui ocupat. Com que es compleix la propietat PASTA, aquesta probabilitat de pèrdua coincideix amb la probabilitat que el sistema estigui en un estat diferent del 0, com es defineix a **(2.2)**.

(2.2)

$$PP_{a1} = \sum_{i=1}^6 P_i = 1 - P_0 = 1 - \frac{1}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b) \cdot A_b + (A_a + A_b) \cdot A_b^2 + (A_a + A_b) \cdot A_b^3 + (A_a + A_b) \cdot A_b^4 + (A_a + A_b) \cdot A_b^5} =$$

$$= \frac{(A_a + A_b) + (A_a + A_b) \cdot A_b + (A_a + A_b) \cdot A_b^2 + (A_a + A_b) \cdot A_b^3 + (A_a + A_b) \cdot A_b^4 + (A_a + A_b) \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b) \cdot A_b + (A_a + A_b) \cdot A_b^2 + (A_a + A_b) \cdot A_b^3 + (A_a + A_b) \cdot A_b^4 + (A_a + A_b) \cdot A_b^5} = \frac{(A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}{1 + (A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}$$

$$PP_{a1} = \frac{(A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}{1 + (A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}$$

Per al tràfic generat pel node 1, una ràfega es perd sempre que es produeixi una arribada i el sistema estigui a l'estat 6, és a dir, el servidor ocupat i tota la cua plena. Per la propietat PASTA, aquesta probabilitat coincideix amb la probabilitat que el sistema estigui a l'estat 6 (2.3).

(2.3)

$$PP_{b1} = P_6 = \frac{(A_a + A_b) \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b) \cdot A_b + (A_a + A_b) \cdot A_b^2 + (A_a + A_b) \cdot A_b^3 + (A_a + A_b) \cdot A_b^4 + (A_a + A_b) \cdot A_b^5} = \frac{(A_a + A_b) \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}$$

$$PP_{b1} = \frac{(A_a + A_b) \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) \cdot \sum_{i=0}^5 A_b^i}$$

### Sistema conjunt

Les probabilitats de pèrdua de ràfega per font de cada sub-sistema, calculades en els dos subapartats anteriors, són útils per calcular les probabilitats de pèrdua de ràfega per font del sistema complet, és a dir, la xarxa OBS.

Per tal de calcular la probabilitat de pèrdua de ràfegues per font del sistema complet cal tenir en compte les següents relacions:

(2.4)

$$PP = \frac{TP}{TO}$$

$$TO = TC + TP$$

$$TC = TO \cdot (1 - PP)$$

On, TO és el tràfic ofert, TC és el tràfic cursat, TP és el tràfic perdut i PP la probabilitat de pèrdua de ràfegues.

En el cas del tràfic generat pel node 0, cal tenir en compte que el tràfic perdut té una component al sub-sistema 0,  $TP_0$ , i una altra al sub-sistema 1,  $TP_1$ . Així doncs, la probabilitat de pèrdua per a les ràfegues generades pel node 0 és la que es mostra **(2.5)**.

$$\left. \begin{array}{l} TP_0 = TO \cdot PP_0 \\ TP_1 = TC_0 \cdot PP_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} TP_0 = A_b \cdot PP_{b0} \\ TP_1 = A_a \cdot PP_{a1} \end{array} \quad (2.5)$$

$$TC_0 = A_a = A_b \cdot (1 - PP_{b0})$$

$$PP_0 = \frac{TP_0 + TP_1}{TO} = \frac{A_b \cdot PP_{b0} + [A_b \cdot (1 - PP_{b0})] \cdot PP_{a1}}{A_b}$$

Per altra banda, la probabilitat de pèrdua per a les ràfegues generades pel node 1 és directament la probabilitat de pèrdua de ràfegues d'aquesta font al sub-sistema 1, és a dir:

$$PP_1 = PP_{b1} \quad (2.6)$$

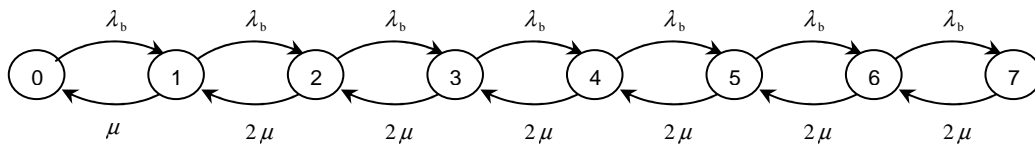
### 2.2.2. Model amb L=2, Q=5

Anàlogament a l'anàlisi realitzat en el subapartat anterior, en aquest subapartat s'analiza el sistema plantejat per a dues longituds d'ona en cada enllaç (L=2) i cues al node de 5 posicions (Q=5).

*Sub-sistema 0:  $N_0$  + enllaç de sortida del node 0*

Al sub-sistema 0 només es produeixen arribades de ràfegues generades pel propi node a taxa  $\lambda_b$  arribades per unitat de temps. Com que hi ha dos servidors, les ràfegues que arribin al sistema i trobin els dos servidors ocupats es col·locaran a la cua si hi ha posicions lliures, en cas contrari les ràfegues es perdran.

La cadena de Markov associada al sub-sistema 0 és la que es mostra a la **Fig. 2.3**.



$$\begin{aligned}
 P_1 &= A_b \cdot P_0 & P_5 &= \frac{A_b^5}{16} \cdot P_0 \\
 P_2 &= \frac{A_b^2}{2} \cdot P_0 & P_6 &= \frac{A_b^6}{32} \cdot P_0 \\
 P_3 &= \frac{A_b^3}{4} \cdot P_0 & P_7 &= \frac{A_b^7}{64} \cdot P_0 \\
 P_4 &= \frac{A_b^4}{8} \cdot P_0 & P_0 &= \frac{1}{1 + A_b + \frac{A_b^2}{2} + \frac{A_b^3}{4} + \frac{A_b^4}{8} + \frac{A_b^5}{16} + \frac{A_b^6}{32} + \frac{A_b^7}{64}}
 \end{aligned}$$

**Fig. 2.3** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 0 amb L=2 i Q=5

En aquest sub-sistema, una ràfega es perd quan en arribar al sistema es troba els dos servidors ocupats i la cua plena. Per la propietat PASTA aquesta probabilitat de pèrdua coincideix amb la probabilitat que el sistema estigui a l'estat 7 (2.7).

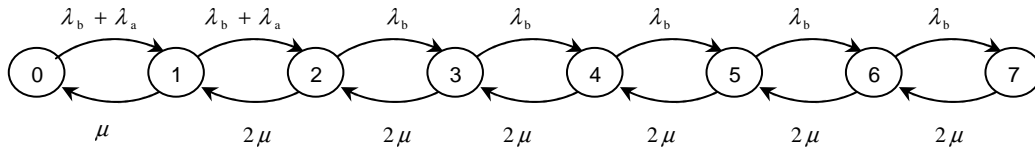
(2.7)

$$PP_{b0} = P_7 = \frac{\frac{A_b^7}{64}}{1 + A_b + \frac{A_b^2}{2} + \frac{A_b^3}{4} + \frac{A_b^4}{8} + \frac{A_b^5}{16} + \frac{A_b^6}{32} + \frac{A_b^7}{64}} = \frac{\frac{A_b^7}{2^6}}{1 + \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^{i+1}}{2^i}}$$

$$\boxed{PP_{b0} = \frac{\frac{A_b^7}{2^6}}{1 + \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^{i+1}}{2^i}}}$$

*Sub-sistema 1:  $N_1$  + enllaç de sortida del node 1*

Al sub-sistema 1, el tràfic procedent del sub-sistema 0 només es podrà cursar en el cas que en el moment que es produeixi l'arribada d'una ràfega el sub-sistema 1 tingui algun dels dos servidors lliures perquè només el tràfic generat pel node 1 pot ocupar les posicions de cua del sub-sistema 1.



$$P_1 = (A_a + A_b) \cdot P_0$$

$$P_2 = \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot P_0$$

$$P_3 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} \cdot P_0$$

$$P_4 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} \cdot P_0$$

$$P_5 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} \cdot P_0$$

$$P_6 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} \cdot P_0$$

$$P_7 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64} \cdot P_0$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}}$$

**Fig. 2.4** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 1 amb L=2 i Q=5

Així doncs, les ràfegues procedents del sub-sistema 0 es perdran si en el moment de la seva arribada el sub-sistema 1 té els dos servidors ocupats. Per la propietat PASTA, aquesta probabilitat de pèrdua equival a la probabilitat que el sistema estigui en algun dels estats on tots els servidors estan ocupats. El càlcul es mostra a **(2.8)**.

(2.8)

$$\begin{aligned}
PP_{a1} &= 1 - (P_0 + P_1) = 1 - \frac{1 + (A_a + A_b)}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}} \\
PP_{a1} &= 1 - (P_0 + P_1) = \frac{\frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}} \\
&= \frac{\frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}} = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}
\end{aligned}$$

$$PP_{a1} = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}$$

En el cas de les ràfegues generades pel node 1, es perdran si arriben i troben els dos servidors i tota la cua plena. Aquesta probabilitat de pèrdua equival a la probabilitat que el sistema estigui a l'estat 7.

(2.9)

$$PP_{b1} = P_7 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{4} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{8} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{16} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{32} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{64}}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}$$

$$PP_{b1} = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{1 + (A_a + A_b) + (A_a + A_b)^2 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{A_b^i}{2^{i+1}}}$$

### Sistema conjunt

Anàlogament al càlcul realitzat per al cas L=1, les expressions de la probabilitat de pèrdua de ràfega per a cadascuna de les fonts són (2.5), (2.6).

$$PP_0 = \frac{TP_0 + TP_1}{T_0} = \frac{A_b \cdot PP_{b0} + [A_b \cdot (1 - PP_{b0})] \cdot PP_{a1}}{A_b}$$

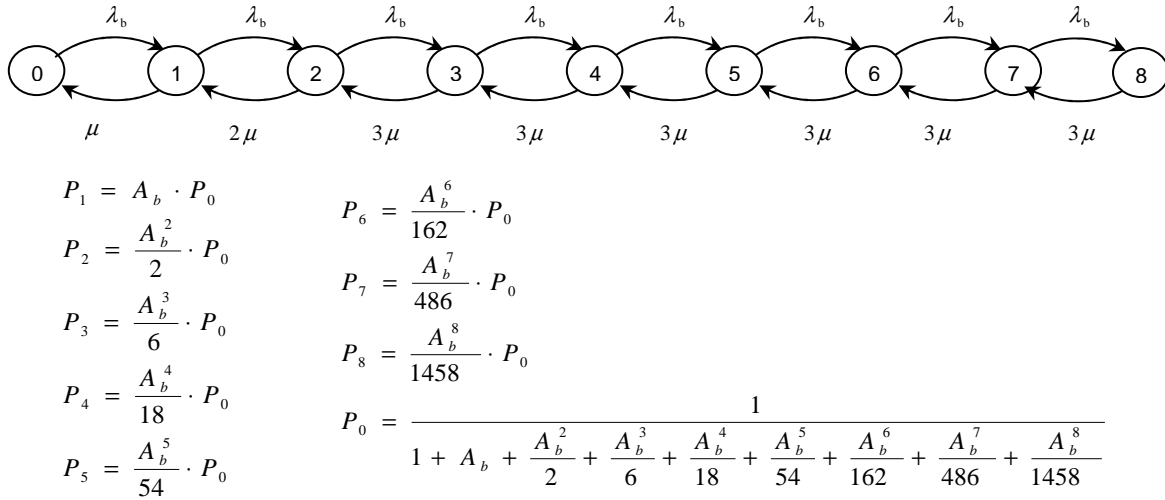
$$PP_1 = PP_{b1}$$



### 2.2.3. Model amb L=3, Q=5

Sub-sistema 0:  $N_0$  + enllaç de sortida del node 0

Anàlogament a l'anàlisi realitzar per al cas L=1 i L=2, per a L=3 la cadena de Markov que representa el sub-sistema 0 és la següent.



**Fig. 2.5** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 0 amb L=3 i Q=5

Així doncs, la probabilitat de pèrdua de ràfegues en aquest sub-sistema és que s'observa a (2.10).

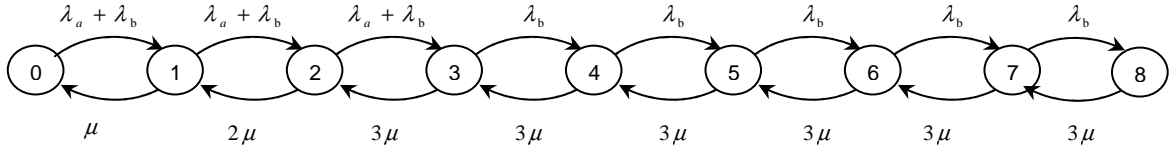
(2.10)

$$PP_{b0} = P_8 = \frac{\frac{A_b^8}{1458}}{1 + A_b + \frac{A_b^2}{2} + \frac{A_b^3}{6} + \frac{A_b^4}{18} + \frac{A_b^5}{54} + \frac{A_b^6}{162} + \frac{A_b^7}{486} + \frac{A_b^8}{1458}} = \frac{\frac{A_b^8}{2 \cdot 3^6}}{1 + A_b + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^{i+2}}{3^i}}$$

$$PP_{b0} = \frac{\frac{A_b^8}{2 \cdot 3^6}}{1 + A_b + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^{i+2}}{3^i}}$$

### Sub-sistema 1: $N_1$ + enllaç de sortida del node 1

Per al sub-sistema 1, la cadena de Markov que modela el sistema per a  $L=3$  és la següent:



$$P_1 = (A_a + A_b) \cdot P_0$$

$$P_2 = \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot P_0$$

$$P_3 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{6} \cdot P_0$$

$$P_4 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{18} \cdot P_0$$

$$P_5 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{54} \cdot P_0$$

$$P_6 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{162} \cdot P_0$$

$$P_7 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{486} \cdot P_0$$

$$P_8 = \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458} \cdot P_0$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{6} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{18} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{54} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{162} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{486} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458}}$$

**Fig. 2.6** Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 1 amb  $L=3$  i  $Q=5$

La probabilitat de pèrdua de ràfega per a la font connectada al node 0 en el sub-sistema 1 és:

(2.11)

$$PP_{a1} = 1 - (P_0 + P_1 + P_2) = 1 - \frac{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{6} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{18} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{54} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{162} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{486} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458}}$$

$$= \frac{\frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{6} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{18} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{54} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{162} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{486} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b}{6} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^2}{18} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^3}{54} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^4}{162} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^5}{486} + \frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458}} = \frac{\frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}$$

$$PP_{a1} = \frac{\frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}$$

La probabilitat de pèrdua de ràfega de la font connectada al node 1 en el sub-sistema 1 és:

(2.12)

$$PP_{b1} = \frac{\frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{1458}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} + \frac{(A_a + A_b)^3 \cdot A_b}{6} + \frac{(A_a + A_b)^4 \cdot A_b^2}{18} + \frac{(A_a + A_b)^5 \cdot A_b^3}{54} + \frac{(A_a + A_b)^6 \cdot A_b^4}{162} + \frac{(A_a + A_b)^7 \cdot A_b^5}{486} + \frac{(A_a + A_b)^8 \cdot A_b^6}{1458}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}$$

$$PP_{b1} = \frac{\frac{(A_a + A_b)^2 \cdot A_b^6}{2 \cdot 3^6}}{1 + (A_a + A_b) + \frac{(A_a + A_b)^2}{2} \cdot \sum_{i=0}^6 \frac{A_b^i}{3^i}}$$

**Sistema conjunt**

Les expressions de la probabilitat de pèrdua de ràfega per a cadascuna de les fonts coincideixen amb les obtingudes per als casos L=1 i L=2, (2.5)(2.6).

$$PP_0 = \frac{TP_0 + TP_1}{T_0} = \frac{A_b \cdot PP_{b0} + [A_b \cdot (1 - PP_{b0})] \cdot PP_{a1}}{A_b}$$

$$PP_1 = PP_{b1}$$

**2.2.4. Probabilitat de pèrdua per font en funció del tràfic ofert**

Donant valors concrets al tràfic ofert per a cadascuna de les fonts connectades al node 0 i 1 dels sistemes presentats en els subapartats anteriors, s'obtenen els següents resultats:

**Taula 2.1** Resultats de probabilitat de pèrdua amb L=1, Q=5

	N0		N1		Total	
$A_b$	$PP_{b0}$	$TC_0$	$PP_{b1}$	$PP_{a1}$	$PP_0$	$PP_1$
0.001	0.0000000000	0.0005000000	0.0009995002	0.0000000000	0.0009995002	0.0000000000
0.01	0.0000000000	0.0050000000	0.0099502488	0.0000000000	0.0099502488	0.0000000000
0.1	0.000000148	0.0499999993	0.0952380933	0.0000000283	0.0952381067	0.0000000283
0.2	0.0000009000	0.0999999100	0.1818179661	0.0000016364	0.1818187025	0.0000016364
0.3	0.0000096820	0.1499985477	0.2608664355	0.0000168383	0.2608735918	0.0000168383
0.5	0.0001831166	0.2499542208	0.3999194268	0.0002929813	0.4000293115	0.0002929813
0.6	0.0005104116	0.2998468765	0.4612938011	0.0007852332	0.4615687630	0.0007852332
0.8	0.0024616331	0.3990153467	0.5701213041	0.0035172319	0.5711795078	0.0035172319
0.9	0.0045842009	0.4479371096	0.6181830533	0.0063265026	0.6199333789	0.0063265026
0.98	0.0071072595	0.4865174428	0.6537680992	0.0095505303	0.6562288592	0.0095505303

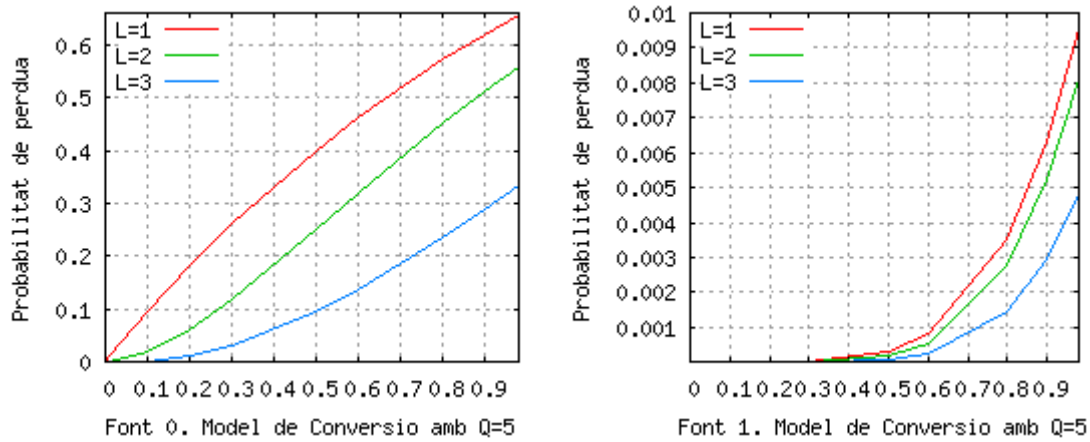
**Taula 2.2:** Resultats de probabilitat de pèrdua amb L=2, Q=5

$A_b$	N0		N1		Total	
	$PP_{b0}$	$TC_0$	$PP_{b1}$	$PP_{a1}$	$PP_0$	$PP_1$
0.001	0.0000000000	0.0010000000	0.0000019970	0.0000000000	0.0000019970	0.0000000000
0.01	0.0000000000	0.0100000000	0.0001970249	0.0000000000	0.0001970249	0.0000000000
0.1	0.0000000014	0.0999999999	0.0172413790	0.0000000051	0.0172413804	0.0000000051
0.2	0.0000001636	0.1999999673	0.0597014285	0.0000005373	0.0597015824	0.0000005373
0.3	0.0000025257	0.2999992423	0.1168817293	0.0000075444	0.1168839598	0.0000075444
0.5	0.0000732440	0.4999633780	0.2499439221	0.0001831091	0.2499988592	0.0001831091
0.6	0.0002355469	0.5998586719	0.3183885964	0.0005419741	0.3185491479	0.0005419741
0.8	0.0014056589	0.7988754729	0.4494473923	0.0027727620	0.4502212815	0.0027727620
0.9	0.0028413237	0.8974428086	0.5100925427	0.0052203013	0.5114845284	0.0052203013
0.98	0.0046636731	0.9754296004	0.5557263284	0.0081182932	0.5577982756	0.0081182932

**Taula 2.3:** Resultats de probabilitat de pèrdua amb L=3, Q=5

$A_b$	N0		N1		Total	
	$PP_{b0}$	$TC_0$	$PP_{b1}$	$PP_{a1}$	$PP_0$	$PP_1$
0.001	0.0000000000	0.0015000000	0.0000000022	0.0000000000	0.0000000022	0.0000000000
0.01	0.0000000000	0.0150000000	0.0000021945	0.0000000000	0.0000021945	0.0000000000
0.1	0.0000000002	0.1500000000	0.0017578125	0.0000000005	0.0017578126	0.0000000005
0.2	0.0000000333	0.2999999900	0.01111110999	0.0000001000	0.0111111328	0.0000001000
0.3	0.0000007350	0.4499996693	0.0300739117	0.0000019412	0.0300746246	0.0000019412
0.5	0.0000323131	0.7499757652	0.0937279320	0.0000686652	0.0937572165	0.0000686652
0.6	0.0001191251	0.8998927874	0.1356626466	0.0002309305	0.1357656109	0.0002309305
0.8	0.0008678901	1.1989585319	0.2333567162	0.0014396404	0.2340220783	0.0014396404
0.9	0.0018914051	1.3474466032	0.2869429058	0.0029365817	0.2882915856	0.0029365817
0.98	0.0032694124	1.4651939638	0.3311711925	0.0048378936	0.3333578696	0.0048378936

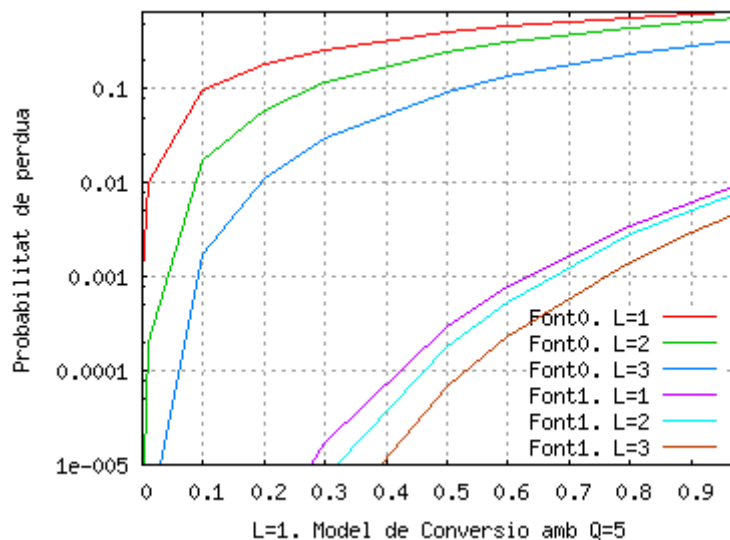
Com s'observa a la **Fig. 2.7**, la distribució de les pèrdues de ràfegues per a la Font0 és diferent de la que s'obté per a la Font1. El fenomen de la conversió de longitud d'ona es veu ben reflectit als resultats de probabilitat de pèrdua corresponents a la Font0, degut a que N1 tracta de diferent forma el tràfic provinent d'una o altra font.



**Fig. 2.7** Resultats de probabilitat de pèrdua per font del model analític

A més a més, s'observa una diferència de comportament al disposar d'una o de més d'una longitud d'ona a la fibra (**Fig. 2.7 Font0**), deguda al fet que amb una longitud d'ona no existeix la possibilitat de fer conversions, però conforme s'augmenten el nombre de longituds d'ona, la probabilitat de pèrdua per font disminueix. Aquest comportament es correspon amb l'esperat, ja que a major nombre de longituds d'ona presents a la fibra, més possibilitats hi ha de programar una ràfega que pateixi contenció.

Al comparar els valors de pèrdua de ràfegues obtinguts per a la Font0 amb els de la Font 1, s'observa que la probabilitat de pèrdua de la Font 1 és molt més baixa que la de la Font0, tal i com era d'esperar (**Fig. 2.8**), ja que les ràfegues de la Font1, tot i competir pels recursos amb el tràfic de la Font 0, disposen de més recursos (cua del node 1).



**Fig. 2.8** Comparativa de la probabilitat de pèrdua per font del model analític

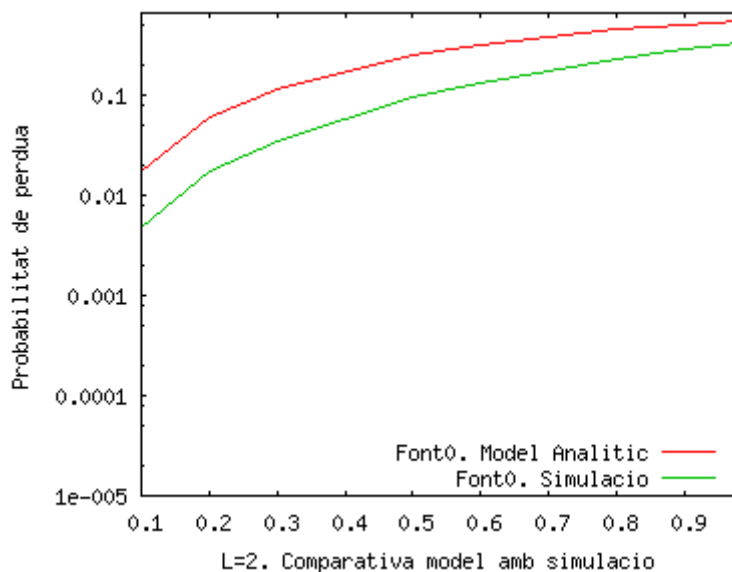
### 2.3. Comparativa del model analític amb els resultats de la simulació

Per tal de validar o, si més no, comparar el funcionament del model analític, s'han realitzat un conjunt de simulacions amb els mateixos paràmetres, en la mesura del possible, que els emprats en el model analític.

L'escenari utilitzat en la simulació consta de 3 nodes interconnectats seguint una topologia lineal amb dues longituds d'ona en cada enllaç ( $L=2$ ) i amb possibilitat de conversió de longitud d'ona.

Els nodes disposen d'una cua per emmagatzemar les ràfegues de les fonts directament connectades fins que sigui possible realitzar-ne la programació, essent  $Q_{\text{Simulació}} \gg Q_{\text{Analítica}}$ . Per tant, a diferència del model analític, al disposar d'una cua molt gran (que pràcticament es pot considerar infinita) la Font1 té una probabilitat de pèrdua de ràfegues nul·la.

La **Fig. 2.9** mostra els resultats obtinguts via simulació en comparació amb els resultats derivats del model analític. S'observa que en tots dos casos el comportament és força similar, tot i que els valors de probabilitat de pèrdua de ràfegues obtinguts a partir del model analític són superiors. En el model analític, l'arribada de ràfegues a N1 es modela com un procés de Poisson, no obstant, en la simulació, l'arribada de ràfegues a N1 és el tràfic cursat per l'enllaç N0-N1. En la simulació, al programar les ràfegues sobre l'enllaç el tràfic es suavitza respecte el tràfic generat per la Font0 ja que les ràfegues tenen totes tenen la mateixa longitud i per tant el temps de transmissió és determinista. Degut a aquest fet, la probabilitat de pèrdua de ràfegues que s'obté amb el model analític és sempre superior a la de les simulacions. Així doncs, es pot considerar que el model analític presentat és una cota superior per a la probabilitat de pèrdua de ràfegues en un escenari OBS amb topologia lineal.



**Fig. 2.9** Comparativa de la probabilitat de pèrdua del model amb simulació

Es podria obtenir un model analític més proper als resultats de les simulacions considerant un sistema amb un temps de transmissió determinista. En aquest cas, no obstant, caldria resoldre un sistema semi-markovià i això en complica l'anàlisi considerablement. D'altra banda, per tal de validar el model presentat es podria contemplar la possibilitat de realitzar simulacions considerant un temps de transmissió exponencial, és a dir, modificant la durada de les ràfegues per tal que seguissin una distribució exponencial i redefinint la granularitat de les ranures de l'enllaç per tal de simular un sistema no ranurat. Ambdues opcions es deixen com a treball futur.

### 3. Model Analític per a Fibres de Retard (FDLs)

En aquest apartat es presenta un model analític per avaluar analíticament la probabilitat de pèrdua de ràfega en una xarxa OBS amb topologia en línia on els nodes disposen d'una fibra de retard.

#### 3.1. Descripció del model

Partint d'una xarxa amb topologia de línia, cada node genera tràfic segons un procés de Poisson de taxa  $\lambda_b$  ràfegues per unitat de temps, amb destí el node N-èssim de la línia.

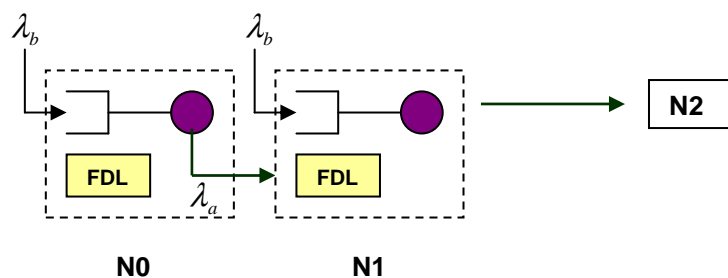
Aquests nodes disposen d'un conjunt de L servidors que modelen les longituds d'ona de l'enllaç de sortida així com d'una cua de Q posicions, on s'emmagatzemen les ràfegues generades per les fonts del propi node abans que se n'iniciï la transmissió. A banda d'això, cada node està equipat amb una fibra de retard, modelada com una cua d'una posició.

A més a més del tràfic propi generat per cada node, tots els nodes de la línia, excepte el primer, reben el tràfic cursat pel node anterior, però no disposen de cua per emmagatzemar aquestes ràfegues que, en cas de contenció i si és possible, s'emmagatzemaran a la FDL. El procés d'arribada del tràfic procedent dels nodes anteriors s'aproxima per un procés de Poisson de taxa  $\lambda_a$  ràfegues per unitat de temps.

Per altra banda, la longitud de les ràfegues es considera distribuïda de forma exponencial, per tant, el temps de procés de ràfega es considera exponencial de promig  $1/\mu$  unitats de temps per ràfega.

Tenint en compte les aproximacions que es realitzen, cada node de la línia es modela mitjançant una cadena de Markov contínua de naixement i mort. Per tant, el sistema complet es subdivideix en sub-sistemes, on cada sub-sistema representa el comportament d'un node i del seu l'enllaç de sortida corresponent.

L'anàlisi s'ha realitzat per a una xarxa de tres nodes i una longitud d'ona en cada enllaç com la esquematitzada a **Fig. 3.1**.



**Fig. 3.1** Esquema de la xarxa amb una longitud d'ona als enllaços (1FDL i  $Q=6$ )



En l'anàlisi i els resultats que es presenten en aquest capítol s'ha fixat el valor de  $Q$  a 6 posicions de cua perquè mitjançant simulació s'ha determinat que les pèrdues de les ràfegues generades pel propi node que es produeixen per a  $Q \geq 6$  són prou petites per considerar-les menyspreables (si més no per a tràfics moderats i baixos). D'altra banda, i per tal de no complicar en excés l'anàlisi, s'ha triat una única longitud d'ona disponible als enllaços ( $L = 1$ ), és per això que els nodes disposen d'un únic servidor.

Per tal de determinar les pèrdues per ràfega de cada font, s'ha resolt cada sub-sistema per separat i a continuació s'ha calculat la probabilitat de pèrdua de cada node en base al tràfic perdut d'una determinada font en cada sub-sistema.

A l'hora d'analitzar la xarxa presentada, s'ha de considerar la diferència de comportament de cada node. L'últim node de la xarxa ( $N_2$ ) és el destinatari del tràfic, per la qual cosa no serà objecte d'estudi; els nodes  $N_0$  i  $N_1$  es comporten de forma diferent degut a la seva ubicació dins la xarxa: la principal diferència és que  $N_1$ , a banda del tràfic propi que genera, ha de cursar el tràfic que rep de  $N_0$ .

### 3.1.1. Nomenclatura

Les cadenes de Markov representen el conjunt d'estats en els quals es pot trobar el sistema. La nomenclatura que s'utilitza en l'anàlisi del sistema és la següent:

$\lambda_a$	taxa d'arribades d'altres nodes
$\lambda_b$	taxa d'arribades del node
$\mu$	taxa de servei del node
$P_n$	probabilitat d'estar a l'estat $n$ -èssim (on $n$ és el número de ràfegues al sistema)
$S$	ràfega dins el servidor
$C$	ràfega dins el <i>buffer</i>
$F$	ràfega dins la FDL

Exemple: 2 SF indica que hi ha 2 ràfegues al sistema (1 al servidor i 1 a la FDL)

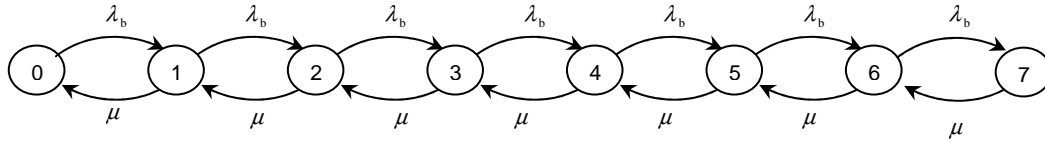
### 3.2. Resolució del sistema i càlcul de la probabilitat de pèrdua per font

En aquest apartat es detalla la resolució dels dos sub-sistemes (node i enllaç de sortida) il·lustrats a **Fig. 3.1** i a continuació s'obté la probabilitat de pèrdua per font.

*Sub-sistema 0:  $N_0$  + enllaç de sortida del node 0*

El sub-sistema 0 únicament rep el tràfic que genera el node 0, és a dir, el propi tràfic, amb una taxa d'arribades  $\lambda_b$  ràfegues per unitat de temps. En cas que el servidor estigui ocupat, les ràfegues passaran a ocupar la cua del node, fins a

un màxim de 6 ràfegues en cua, i quan aquesta estigui plena les següents arribades es descartaran. La cadena de Markov associada al sub-sistema (Fig. 3.2) correspon, per tant, a un sistema M/M/L/Q+L, on L=1 i Q=6.



$$\left. \begin{aligned}
 P_0 \cdot \lambda_b &= P_1 \cdot \mu \\
 P_1 \cdot \lambda_b &= P_2 \cdot \mu \\
 P_2 \cdot \lambda_b &= P_3 \cdot \mu \\
 P_3 \cdot \lambda_b &= P_4 \cdot \mu \\
 P_4 \cdot \lambda_b &= P_5 \cdot \mu \\
 P_5 \cdot \lambda_b &= P_6 \cdot \mu \\
 P_6 \cdot \lambda_b &= P_7 \cdot \mu \\
 P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 &= 1
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 P_1 &= A_b \cdot P_0 \\
 P_2 &= A_b^2 \cdot P_0 \\
 P_3 &= A_b^3 \cdot P_0 \\
 P_4 &= A_b^4 \cdot P_0 \\
 P_5 &= A_b^5 \cdot P_0 \\
 P_6 &= A_b^6 \cdot P_0 \\
 P_7 &= A_b^7 \cdot P_0 \\
 P_0 &= \frac{1}{1 + A_b + A_b^2 + A_b^3 + A_b^4 + A_b^5 + A_b^6 + A_b^7}
 \end{aligned} \quad A_b = \frac{\lambda_b}{\mu}$$

Fig. 3.2 Plantejament de cadena de Markov del sub-sistema 0 (L=1,1FDL, Q=5)

Les pèrdues de ràfegues es produeixen quan es produeix una arribada i el sistema es troba a l'estat 7, és a dir, el servidor està ocupat i la cua està plena. Com que es compleix la propietat PASTA (*Poisson Arrival See Time Average*) la probabilitat de pèrdua coincideix amb la probabilitat que el sistema estigui a l'estat 6 (3.1).

(3.1)

$$PP_{b0} = P_6 = \frac{A_b^7}{1 + A_b + A_b^2 + A_b^3 + A_b^4 + A_b^5 + A_b^6 + A_b^7} = \frac{A_b^7}{\sum_{i=0}^7 A_b^i}$$

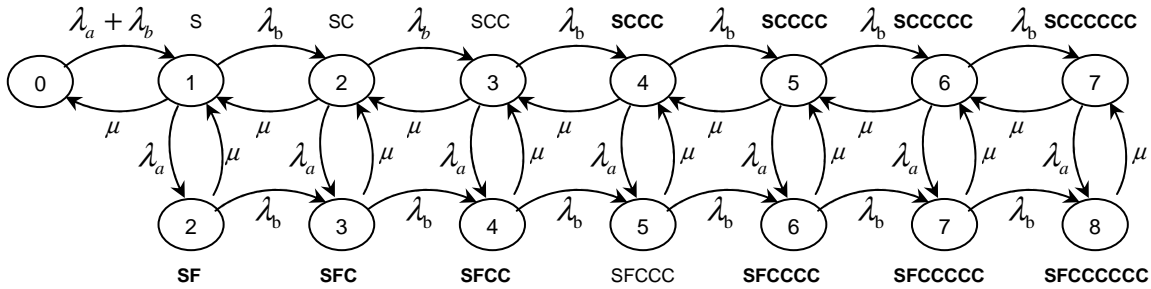
$$PP_{b0} = \frac{A_b^7}{\sum_{i=0}^7 A_b^i}$$

*Sub-sistema 1: N<sub>1</sub> + enllaç de sortida del node 1*

El sub-sistema 1, a més a més del tràfic generat pel node 1, rep el tràfic cursat pel sub-sistema 0, que en el model proposat s'aproxima per un tràfic de Poisson a taxa  $\lambda_a$  ràfegues per unitat de temps. Les ràfegues procedents del sub-sistema 0 no poden ocupar espai a la cua del sub-sistema 1, però sí poden fer ús de la fibra de retard (cosa que les ràfegues del node 1 no poden fer). Per

tant, en cas que es produeixi una arribada del node 0 i el servidor estigui ocupat, la ràfega ocuparà la FDL en cas que aquesta estigui lliure; si la FDL està ocupada, la ràfega es perdrà.

En el model plantejat, el tràfic que prové del sub-sistema 0 és prioritari a l'hora d'ocupar el servidor, ja que en cas d'haver ràfegues a la FDL i en cua, primer es serveix la ràfega emmagatzemada a la FDL, tal i com es mostra a **Fig. 3.3**.



**Fig. 3.3** Cadena de Markov que modela el sub-sistema 1

A partir de l'anàlisi de la cadena de Markov s'obtenen les probabilitats dels diferents estats del sistema resolent el següent sistema d'equacions:

$$\begin{aligned}
 &P_0 + P_1 + P_{2C} + P_{3C} + P_{4C} + P_{5C} + P_{6C} + P_{7C} + P_{2F} + P_{3F} + P_{4F} + P_{5F} + P_{6F} + P_{7F} + P_{8F} = 1 \\
 &P_1 \cdot \mu = P_0 \cdot (\lambda_a + \lambda_b) \\
 &P_0 \cdot (\lambda_a + \lambda_b) + P_{2C} \cdot \mu + P_{2F} \cdot \mu = P_1 \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) \\
 &P_1 \cdot \lambda_b + P_{3C} \cdot \mu + P_{3F} \cdot \mu = P_{2C} \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) & P_1 \cdot \lambda_a = P_{2F} \cdot (\lambda_b + \mu) \\
 &P_{2C} \cdot \lambda_b + P_{4C} \cdot \mu + P_{4F} \cdot \mu = P_{3C} \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) & P_{2C} \cdot \lambda_a + P_{2F} \cdot \lambda_b = P_{3F} \cdot (\lambda_b + \mu) \\
 &P_{3C} \cdot \lambda_b + P_{5C} \cdot \mu + P_{5F} \cdot \mu = P_{4C} \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) & P_{3C} \cdot \lambda_a + P_{3F} \cdot \lambda_b = P_{4F} \cdot (\lambda_b + \mu) \\
 &P_{4C} \cdot \lambda_b + P_{6C} \cdot \mu + P_{6F} \cdot \mu = P_{5C} \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) & P_{4C} \cdot \lambda_a + P_{4F} \cdot \lambda_b = P_{5F} \cdot (\lambda_b + \mu) \\
 &P_{5C} \cdot \lambda_b + P_{7C} \cdot \mu + P_{7F} \cdot \mu = P_{6C} \cdot (\lambda_a + \lambda_b + \mu) & P_{5C} \cdot \lambda_a + P_{5F} \cdot \lambda_b = P_{6F} \cdot (\lambda_b + \mu) \\
 &P_{6C} \cdot \lambda_b + P_{8F} \cdot \mu = P_{7C} \cdot (\lambda_a + \mu) & P_{6C} \cdot \lambda_a + P_{6F} \cdot \lambda_b = P_{7F} \cdot (\lambda_b + \mu)
 \end{aligned}$$

↓

$$\begin{aligned}
 &P_0 + P_1 + P_{2C} + P_{3C} + P_{4C} + P_{5C} + P_{6C} + P_{7C} + P_{2F} + P_{3F} + P_{4F} + P_{5F} + P_{6F} + P_{7F} + P_{8F} = 1 \\
 &- P_0 \cdot (A_a + A_b) + P_1 = 0 \\
 &P_0 \cdot (A_a + A_b) - (A_a + A_b + 1) \cdot P_1 + P_{2C} + P_{2F} = 0 \\
 &P_1 \cdot A_b - P_{2C} \cdot (A_a + A_b + 1) + P_{3C} + P_{3F} = 0 & P_1 \cdot A_a - P_{2F} \cdot (A_b + 1) = 0 \\
 &P_{2C} \cdot A_b - P_{3C} \cdot (A_a + A_b + 1) + P_{4C} + P_{4F} = 0 & P_{2C} \cdot A_a + P_{2F} \cdot A_b - P_{3F} \cdot (A_b + 1) = 0 \\
 &P_{3C} \cdot A_b - P_{4C} \cdot (A_a + A_b + 1) + P_{5C} + P_{5F} = 0 & P_{3C} \cdot A_a + P_{3F} \cdot A_b - P_{4F} \cdot (A_b + 1) = 0 \\
 &P_{4C} \cdot A_b - P_{5C} \cdot (A_a + A_b + 1) + P_{6C} + P_{6F} = 0 & P_{4C} \cdot A_a + P_{4F} \cdot A_b - P_{5F} \cdot (A_b + 1) = 0 \\
 &P_{5C} \cdot A_b - P_{6C} \cdot (A_a + A_b + 1) + P_{7C} + P_{7F} = 0 & P_{5C} \cdot A_a + P_{5F} \cdot A_b - P_{6F} \cdot (A_b + 1) = 0 \\
 &P_{6C} \cdot A_b - P_{7C} \cdot (A_a + 1) + P_{8F} = 0 & P_{6C} \cdot A_a + P_{6F} \cdot A_b - P_{7F} \cdot (A_b + 1) = 0
 \end{aligned}$$

**Fig. 3.4** Conjunt de probabilitats d'estat del sub-sistema 1

Davant la complexitat d'obtenir expressions analítiques genèriques de les probabilitats dels estats de la cadena de Markov, s'ha optat per obtenir la solució numèrica donats els valors de  $A_a$  i  $A_b$  a partir de la representació matricial del sistema d'equacions lineals del sistema.

**Taula 3.1** Representació matricial del les equacions associades al sistema

$P_0$	$P_1$	$P_{2C}$	$P_{2F}$	$P_{3C}$	$P_{3F}$	$P_{4C}$	$P_{4F}$	$P_{5C}$	$P_{5F}$	$P_{6C}$	$P_{6F}$	$P_{7C}$	$P_{7F}$	$P_{8F}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$-(A_a + A_b)$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_a + A_b$	$-(A_a + A_b + 1)$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	$A_b$	$-(A_a + A_b + 1)$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	$A_a$	0	$-(A_b + 1)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$A_b$	0	$-(A_a + A_b + 1)$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$A_a$	$A_b$	0	$-(A_b + 1)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$A_b$	0	$-(A_a + A_b + 1)$	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$A_a$	$A_b$	0	$-(A_b + 1)$	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	$A_b$	0	$-(A_a + A_b + 1)$	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	$A_a$	$A_b$	0	$-(A_b + 1)$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	$A_b$	0	$-(A_a + A_b + 1)$	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	$A_a$	$A_b$	0	$-(A_b + 1)$	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$A_b$	0	$-(A_a + 1)$	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$A_a$	$A_b$	0	$-(A_b + 1)$	0

Per tal de calcular la probabilitat de pèrdua de ràfegues per cada font, en aquest sub-sistema interessa distingir entre les pèrdues de ràfegues d'una i altra font.

Les ràfegues que provenen del node 0 es perden sempre que en arribar al node trobin tant el servidor com la FDL ocupats. Com que es compleix la propietat PASTA, la probabilitat de pèrdua de ràfegues coincideix amb la suma de la probabilitat dels estats de la cadena del sub-sistema on la FDL està ocupada, és a dir:

(3.2)

$$PP_{a1} = \sum P_{2F} + P_{3F} + P_{4F} + P_{5F} + P_{6F} + P_{7F} + P_{8F} = \sum_{i=2}^{Q+2} P_{iF}$$

$$PP_{a1} = \sum_{i=2}^{Q+2} P_{iF}$$

Per a les ràfegues generades pel node 1, es produeix una pèrdua quan hi ha una arribada al sistema i el servidor està ocupat i la cua plena. Com que es compleix la propietat PASTA, la probabilitat de pèrdua de ràfegues coincideix amb la suma de la probabilitat dels estats del sistema on hi ha un element servint-se i les 6 posicions de cua ocupades (3.3).

(3.3)

$$PP_{b1} = P_{7C} + P_{8F}$$

### Sistema conjunt

Les probabilitats de pèrdua de ràfega per font de cada sub-sistema, calculades en els dos subapartats anteriors, són útils per calcular les probabilitats de pèrdua de ràfega per font del sistema complet, és a dir, la xarxa OBS.

Per tal de calcular la probabilitat de pèrdua de ràfegues per font del sistema complet cal tenir en compte les relacions ja vistes al capítol 2 (2.4).

$$PP = \frac{TP}{TO}$$

$$TO = TC + TP$$

$$TC = TO \cdot (1 - PP)$$

On, TO és el tràfic ofert, TC és el tràfic cursat, TP és el tràfic perdut i PP la probabilitat de pèrdua de ràfegues.

En el cas del tràfic generat pel node 0, cal tenir en compte que el tràfic perdut té una component al sub-sistema 0,  $TP_0$ , i una altra al sub-sistema 1,  $TP_1$ . Això coincideix amb el vist a la fórmula (2.5).

$$\left. \begin{array}{l} TP_0 = TO \cdot PP_0 \\ TP_1 = TC_0 \cdot PP_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} TP_0 = A_b \cdot PP_{b0} \\ TP_1 = A_a \cdot PP_{a1} \end{array}$$

$$TC_0 = A_a = A_b \cdot (1 - PP_{b0})$$

$$PP_0 = \frac{TP_0 + TP_1}{TO} = \frac{A_b \cdot PP_{b0} + [A_b \cdot (1 - PP_{b0})] \cdot PP_{a1}}{A_b}$$

En base a l'explicat, la probabilitat de pèrdua total per a la Font0 és la que es mostra a (3.4).

(3.4)

$$PP_0 = \frac{A_b \cdot PP_{b0} + A_a \cdot \sum_{i=2}^{Q+2} P_{iF}}{A_b}$$

Per altra banda, la probabilitat de pèrdua per a les ràfegues generades pel node 1 és directament la probabilitat de pèrdua de ràfegues d'aquesta font al sub-sistema 1, és a dir:

$$PP_1 = PP_{b1} = P_{7C} + P_{8F}$$

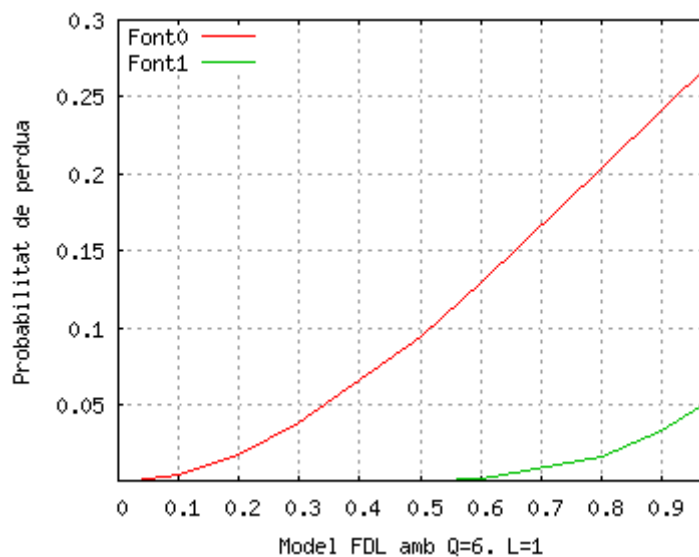
### 3.2.1. Probabilitat de pèrdua per font en funció del tràfic ofert

La taula següent mostra els resultats de la probabilitat de pèrdua per font, en cada sub-sistema i tenint en compte el sistema complet, extrets del model analític en funció del tràfic ofert.

**Taula 3.1** Resultats de probabilitat de pèrdua per font del model analític de FDL

$A_b$	N0		N1		Total	
	$PP_{b0}$	$TC_0$	$PP_{b1}$	$PP_{a1}$	$PP_0$	$PP_1$
0.01	0.0000000	0.0050000	1.76E-16	4.98E-05	4.975E-05	1.76E-16
0.1	0.0000000	0.0500000	3.54E-09	4.75E-03	0.004750594	3.54E-09
0.2	0.0000001	0.1000000	6.80E-07	1.80E-02	0.018010341	6.80E-07
0.3	0.0000015	0.1499998	1.48E-05	3.84E-02	0.038380573	1.48E-05
0.5	0.0000458	0.2499886	6.63E-04	9.52E-02	0.09524266	6.63E-04
0.6	0.0001531	0.2999541	2.43E-03	1.29E-01	0.129449307	2.43E-03
0.8	0.0009837	0.3996065	1.65E-02	2.03E-01	0.204010814	1.65E-02
0.9	0.0020586	0.4490736	3.34E-02	2.40E-01	0.242062153	3.34E-02
0.98	0.0034705	0.4882995	5.34E-02	2.69E-01	0.27179084	5.34E-02

La **Fig. 3.5** mostra la representació gràfica de la probabilitat de pèrdua total de cada font en funció del tràfic ofert. S'observa que a mesura que s'incrementa el tràfic ofert, la probabilitat de pèrdua també augmenta. D'altra banda, les pèrdues de la Font0 i de la Font1 són molt diferents degut a la seva ubicació dins la xarxa.



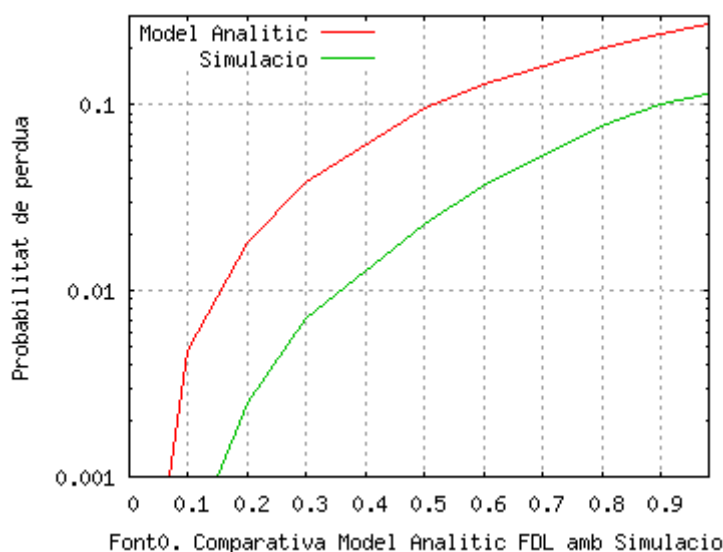
**Fig. 3.5** Probabilitat de pèrdua per font model analític FDL

### 3.3. Comparativa del model analític amb simulació

Per tal de validar els resultats obtinguts a partir del model, en aquest apartat es presenten alguns resultats obtinguts via simulació utilitzant paràmetres similars a les aproximacions utilitzades per definir el model analític.

L'escenari de la simulació consisteix en una xarxa de 3 nodes interconnectats segons una topologia lineal, on N0 i N1 envien tràfic cap a N2 i ambdós tenen una fibra de retard de  $10\mu\text{s}$  a l'enllaç de sortida. Els enllaços disposen d'una única longitud d'ona i els nodes tenen una cua tal que  $Q_{\text{Simulació}} \gg Q_{\text{Analítica}}$ .

Per altra banda, tenint en compte la importància de l'offset a les xarxes OBS (sobretot en la topologia estudiada i utilitzant fibres de retard), en la simulació s'ha utilitzat un offset de base més un offset addicional de  $10\mu\text{s}$ , per tal que l'ús de FDL no incidís en la finestra de contenció. Sense offset addicional les ràfegues retardades per la FDL es programarien sempre més enllà (en temps) que les ràfegues que generen els propis nodes, i la probabilitat de pèrdua seria zero. Comparant els resultats derivat del model analític amb els de la simulació (**Fig. 3.6**), s'observa que en ambdós casos el comportament segueix la mateixa tendència tot i que els resultats del model analític proporcionen una probabilitat de pèrdua considerablement superior.



**Fig. 3.6** Comparativa del model analític de FDL amb simulació

La diferència entre el model analític i els resultats de la simulació responen principalment a l'ús d'un temps de procés exponencial i al modelat de la fibra de retard com a una posició de cua. Ambdós factors simplifiquen considerablement el model però suposen aproximacions que desvien els resultats dels obtinguts via simulació. No obstant, el model proposat proporciona una cota superior relativament fàcil de calcular per a la probabilitat de pèrdua de ràfegues en un escenari OBS amb topologia lineal i fibres de retard que es pot utilitzar com a referència a l'hora d'avaluar els resultats obtinguts mitjançant simulació.