



**António Manuel Nunes Carvalho Amaral** Encaminhamento *multicast* em redes IP





**António Manuel Nunes Carvalho Amaral** Encaminhamento *multicast* em redes IP

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Amaro Fernandes de Sousa, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro.



**o júri**

presidente

Prof. Doutor Rui Jorge Morais Tomás Valadas  
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Amaro Fernandes de Sousa  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Prof. Doutor Alexandre Júlio Teixeira dos Santos  
Professor Auxiliar da Escola de Engenharia da Universidade do Minho



## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor Amaro Fernandes de Sousa, do Departamento de Engenharia de Electrónica e de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, na qualidade de orientador, pela oportunidade concedida para a realização do presente trabalho, assim como pelo rigor, crítica permanente, sessões de trabalho conjunto e pela disponibilidade e empenho que sempre demonstrou.

Ao mestre Luís Oliveira pela amizade e pela colaboração que foi de extrema importância na realização desta dissertação.

Ao Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, pelas condições que colocaram à minha disposição.

Finalmente, gostaria de agradecer aos meus pais, irmã e aos meus amigo(a)s pelo carinho, paciência e por todo o apoio que me prestaram, principalmente nos momentos mais difíceis.



## palavras-chave

IPv4, IPv6, *unicast*, *multicast*

## resumo

Actualmente a maioria das aplicações que usam Internet baseiam-se no modelo de comunicação ponto-a-ponto. No entanto, os recentes avanços tecnológicos e o aparecimento de aplicações cada vez mais sofisticadas fizeram surgir a necessidade de transmitir informações para grupos de participantes (comunicações ponto-multiponto e multiponto-multiponto), como por exemplo, áudio e vídeo conferência para encontros remotos, programas de entretenimento, entre muitos outros. Por outro lado, a evolução da Internet, actualmente baseada no protocolo IPv4, para o protocolo IPv6, deverá ser feita de uma forma progressiva recorrendo a mecanismos de transição e as comunicações *multicast* terão que ter em consideração este factor.

O IETF (*Internet Engineering Task Force*) definiu dois modelos de transmissão *multicast*. Inicialmente foi definido o modelo ASM (*Any Source Multicast*) e mais recentemente, o modelo SSM (*Source Specific Multicast*). Actualmente existem soluções protocolares que permitem garantir as comunicações *multicast* em redes IPv4 e em redes IPv6, usando os dois modelos, mas poucas soluções existem que permitam garantir as comunicações *multicast* em redes mistas IPv4/IPv6. Do ponto de vista de gestão do encaminhamento, a Internet encontra-se dividida em Sistemas Autónomos (SAs). De entre os vários protocolos de encaminhamento *multicast*, a família de protocolos PIM (*Protocol Independent Multicast*) é, actualmente, a mais utilizada pois permite resolver as questões do encaminhamento *multicast* dentro de um Sistema Autónomo (encaminhamento intra-domínio) e, em alguns casos, entre diferentes Sistemas Autónomos (encaminhamento inter-domínio).

Esta dissertação aborda o problema de como providenciar comunicações *multicast* em redes IPv4, em redes IPv6 e em redes mistas IPv4/IPv6. Na primeira parte, é abordado o endereçamento IP *multicast* bem como o problema da atribuição e divulgação de endereços. Na segunda parte, são descritos os protocolos IGMP e MLD de adesão a sessões *multicast* e apresentados cenários práticos que validam os protocolos estudados. Na terceira parte, é abordado o funcionamento dos protocolos de encaminhamento *multicast* da família de protocolos PIM e apresentados cenários práticos de encaminhamento *multicast* intra-domínio. Na última parte, são descritos mecanismos de transição e apresentados cenários práticos que permitem comunicações *multicast* em redes mistas IPv4/IPv6 e finalmente, são estudados os problemas e soluções existentes para o encaminhamento *multicast* inter-domínio.



**keywords**

IPv4, IPv6, *unicast*, *multicast*

**abstract**

Presently most applications used in the Internet, are based on point-to-point communications. However, the recent technological advances and new sophisticated applications are causing an increasing need to transmit information to groups of participants (multicast communications), such as audio and video conferences used for remote meetings, entertainment programs, etc... Moreover, it is known that the evolution of the current Internet, based on IPv4 protocol, to the future IPv6 Internet will be based on transition scenarios, and multicast should consider this fact.

Two models have been proposed by the IETF (Internet Engineering Task Force) for multicast communications. The first one is ASM (Any Source Multicast) model and second one, more recently proposed, is the SSM (Source Specific Model) model. Presently, many solutions exist to support multicast on IPv4 only networks and IPv6 only networks using each of the two models. However, there are not many solutions to support multicast on mix IPv4/IPv6 networks. In the point of view of routing management, the Internet is composed by different Autonomous Systems, each one administrated by an individual network operator. From all available multicast routing protocols, the PIM family of protocols is by far the most used one since it solves the multicast routing problems inside an Autonomous System (intra-domain multicast routing) and also in some cases between different Autonomous System (inter-domain multicast routing).

This dissertation addresses the issue of how to provide the support of multicast communications in IPv4 networks, IPv6 networks and mixing IPv4/IPv6 scenarios. First, it analyses multicast IP addressing issues like types and formats, how they are assigned and how they are announced. Next, the IGMP and MLD protocols are described together with a set of laboratory experiments validating how they work. Then, the PIM family of multicast routing protocols is described together with a set of intra-domain laboratory experiments used to validate these protocols. In the last part, a study of available IETF transition mechanisms and a set laboratory scenarios is presented to validate solutions that allows multicast communications in mix IPv4/IPv6 networks and, finally, a study of multicast inter-domain routing issues and available solutions finishes this work.





# Índice geral

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>3</b>
<b>Índice de tabelas .....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>9</b>
1.1. Motivação e enquadramento .....	9
1.2. Conceitos fundamentais .....	11
1.3. Objectivos .....	14
1.4. Estrutura da dissertação .....	15
<b>Capítulo 2 – Endereços IP <i>multicast</i> .....</b>	<b>17</b>
2.1. Endereços IPv4 .....	18
2.1.2. Formato e gamas .....	19
2.2. Endereços IPv6 .....	22
2.2.1. Formato dos endereços.....	23
2.2.2. Endereços de uso temporário .....	25
2.3. Correspondência entre endereços IP <i>multicast</i> e endereços IEEE 802.....	28
2.4. Mecanismos de anúncio de <i>sessões multicast</i> .....	31
<b>Capítulo 3 – Protocolos de sinalização <i>multicast</i> .....</b>	<b>33</b>
3.1 Sinalização <i>multicast</i> no modelo ASM .....	34
3.1.1 Formato das mensagens IGMPv2 e MLD .....	34
3.1.2 Funcionamento dos protocolos IGMPv2 e MLD .....	37
3.2 Sinalização <i>multicast</i> no modelo SSM .....	39
3.2.1 Formato das mensagens IGMPv3 e MLDv2.....	39
3.2.2 Funcionamento dos protocolos IGMPv3 e MLDv2 .....	46
3.3 Compatibilidade entre os protocolos de sinalização <i>multicast</i> ASM e SSM.....	48
3.4 Experiências práticas.....	50
3.4.1 Cenário MLD .....	50
3.4.2 Cenário MLDv2.....	58
3.4.3 Cenários MLD e MLDv2.....	66

<b>Capítulo 4 – Família de protocolos PIM .....</b>	<b>77</b>
4.1. Árvores de encaminhamento <i>multicast</i> .....	77
4.2. Mensagens PIM.....	80
4.3. PIM <i>Dense Mode</i> (PIM DM) .....	88
4.4. PIM <i>Sparse Mode</i> (PIM SM) .....	94
4.5. PIM <i>Source Specific Mode</i> (PIM SSM).....	103
4.6. Experiências práticas .....	107
4.6.1. Cenário PIMv6 DM.....	109
4.6.2. Cenário PIMv6 SM.....	119
4.6.3. Cenário PIMv6 SM – Mecanismo <i>Bootstrap</i> .....	139
4.6.3.1. Processo de eleição do BSR.....	140
4.6.3.2. Processo de eleição do RP .....	145
4.6.4. Cenário PIMv6 SSM.....	150
4.6.5. Cenário PIMv6 SM e PIMv6 SSM .....	158
<b>Capítulo 5 – <i>Multicast</i> em redes mistas IPv4/IPv6 e em redes inter-domínio.....</b>	<b>165</b>
5.1. <i>Multicast</i> em redes mistas IPv4/IPv6.....	166
5.1.1. Redes de pilha dupla.....	166
5.1.2. Mecanismos de túnel .....	167
5.1.3. Mecanismos de tradução .....	169
5.1.4. Experiências práticas .....	171
5.1.4.1. PIMv6 SM em cenários de túneis .....	172
5.1.4.2. IPv4-IPv6 <i>Multicast Gateway</i> .....	184
5.2. Encaminhamento <i>multicast</i> inter-domínio .....	196
5.2.1. Modelo ASM.....	196
5.2.2. Modelo SSM.....	200
5.2.3. <i>Multiprotocol Border Gateway Protocol</i> .....	201
<b>Capítulo 6 – Conclusões.....</b>	<b>203</b>
6.1. Principais conclusões .....	203
6.2. Perspectivas de evolução.....	205
<b>Anexo I – Instalação e configuração da pilha <i>Kame</i> .....</b>	<b>207</b>
<b>Anexo II – Passos de configuração do “IPv4-IPv6 <i>Multicast Gateway</i>” .....</b>	<b>209</b>
<b>Referências.....</b>	<b>213</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>217</b>

# Índice de figuras

Figura 1 – Formato do endereço IPv4 <i>multicast</i> .....	19
Figura 2 – Formato do endereço IPv6 <i>multicast</i> .....	23
Figura 3 – Endereço IPv6 <i>multicast</i> baseado no prefixo IPv6 <i>unicast</i> .....	26
Figura 4 – Endereços IPv6 <i>multicast</i> SSM.....	26
Figura 5 – Endereço IPv6 <i>multicast</i> contendo o endereço IPv6 <i>unicast</i> do RP.....	27
Figura 6 – Formato do endereço do endereço IPv6 <i>unicast</i> do RP.....	27
Figura 7 – Formato do endereço MAC IEEE 802.....	28
Figura 8 – Atribuição de um endereço IPv4 <i>multicast</i> num endereço MAC <i>multicast</i> .....	29
Figura 9 – Atribuição de 32 endereços IPv4 <i>multicast</i> num único endereço MAC <i>multicast</i> .....	29
Figura 10 – Atribuição de um endereço IPv6 <i>multicast</i> num endereço MAC <i>multicast</i> .....	30
Figura 11 – Cabeçalho IPv4 que transporta uma mensagem IGMPv2.....	35
Figura 12 – Cabeçalhos que transportam uma mensagem MLD.....	35
Figura 13 – Formato da mensagem IGMPv2.....	35
Figura 14 – Formato da mensagem MLD.....	36
Figura 15 – Formato da mensagem IGMPv3 <i>Query</i> .....	40
Figura 16 – Formato da mensagem MLDv2 <i>Query</i> .....	40
Figura 17 – Formato da mensagem IGMPv3 <i>Report</i> .....	43
Figura 18 – Formato da mensagem MLDv2 <i>Report</i> .....	44
Figura 19 – Cenário MLD.....	51
Figura 20 – Mensagem MLD <i>General Query</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_1.....	52
Figura 21 – Periodicidade das mensagens MLD <i>General Query</i> .....	53
Figura 22 – Eleição do QR no protocolo MLD.....	53
Figura 23 – Falha provocada no QR MLD.....	54
Figura 24 – Adesão do receptor Bean à sessão <i>multicast</i> do grupo FF05::ff:773.....	54
Figura 25 – Resposta a uma mensagem MLD <i>General Query</i> .....	55
Figura 26 – Sinalização das sessões <i>multicast</i> de interesse.....	56
Figura 27 – Abandono da sessão <i>multicast</i> por parte do receptor Aquarius.....	56
Figura 28 – Mensagem MLDv2 <i>Multicast-Address-Specific Query</i> para o grupo FF05::ff:773.....	57
Figura 29 – Cenário MLDv2.....	59
Figura 30 – Mensagem MLDv2 <i>General Query</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_1.....	59

Figura 31 – Mensagens MLDv2 <i>General Query</i> e mensagens MLDv2 <i>Report</i> .....	60
Figura 32 – Eleição do QR no protocolo MLDv2.....	61
Figura 33 – Falha provocada no QR MLDv2.....	61
Figura 34 – Adesão do receptor Pluton à sessão <i>multicast</i> do grupo FF05:ff:773 .....	62
Figura 35 – Mensagens MLDv2 <i>General Query</i> e mensagens MLDv2 <i>Report</i> .....	63
Figura 36 – Respostas à mensagem MLDv2 <i>General Query</i> .....	64
Figura 37 – Abandono da sessão <i>multicast</i> por parte do receptor FBSD_4.....	64
Figura 38 – Mensagem MLDv2 <i>Multicast-Address-Specific Query</i> (grupo FF05::ff:773) .....	64
Figura 39 – MLDv2 <i>Report</i> (Pluton) à mensagem MLDv2 <i>Multicast-Address-Specific Query</i> .....	65
Figura 40 – Receptores MLD, Receptor MLDv2 e <i>Routers</i> MLD.....	66
Figura 41 – Actualização da variável de compatibilidade por parte do receptor Pluton .....	67
Figura 42 – Receptores MLDv2, Receptor MLD e <i>Routers</i> MLDv2 .....	68
Figura 43 – Mensagens MLDv2 <i>Report</i> e MLD <i>Report</i> .....	69
Figura 44 – Abandono da sessão <i>multicast</i> do grupo FF05::ff:772 (receptor Bean) .....	71
Figura 45 – Receptores MLD e MLDv2 e <i>Routers</i> MLD e MLDv2.....	72
Figura 46 – MLDv2 <i>General Query</i> (FBSD_1) e MLD <i>General Query</i> (FBSD_2).....	72
Figura 47 – Adesão do receptor Aquarius à sessão <i>multicast</i> do grupo FF05:ff:772.....	73
Figura 48 – Adesão do receptor Pluton à sessão <i>multicast</i> do grupo FF05:ff:773.....	73
Figura 49 – MLD <i>Report</i> em resposta a MLDv2 e MLD <i>General Query</i> .....	73
Figura 50 – MLDv2 (no modo de compatibilidade) no <i>router</i> FBSD_1.....	74
Figura 51 – Árvores de distribuição por emissor .....	78
Figura 52 – Árvore de distribuição central .....	79
Figura 53 – Cabeçalho da mensagem PIM.....	80
Figura 54 – Formato <i>Encoded-Unicast</i> .....	81
Figura 55 – Formato <i>Encoded-Source</i> .....	81
Figura 56 – Formato <i>Encoded-Group</i> .....	82
Figura 57 – Mensagem <i>Hello</i> .....	83
Figura 58 – Mensagem <i>Register</i> .....	83
Figura 59 – Mensagem <i>Register-Stop</i> .....	84
Figura 60 – Mensagem <i>Join/Prune</i> .....	84
Figura 61 – Mensagem <i>Bootstrap</i> .....	85
Figura 62 – Mensagem <i>Assert</i> .....	86
Figura 63 – Mensagem <i>Candidate-RP-Advertisement</i> .....	87
Figura 64 – Cenário PIM DM .....	89

---

Figura 65 – Cenário PIM DM: Troca de mensagens <i>Hello</i> .....	89
Figura 66 – Cenário PIM DM: inundação da rede.....	90
Figura 67 – Cenário PIM DM: Corte de membros da árvore.....	90
Figura 68 – Cenário PIM DM: Mecanismo de <i>Assert</i> .....	92
Figura 69 – Cenário PIM DM: Árvore <i>multicast</i> resultante do mecanismo <i>Assert</i> .....	93
Figura 70 – Cenário PIM DM: Mecanismo de enxerto.....	93
Figura 71 – Cenário PIM DM: Encaminhamento dos pacotes de dados <i>multicast</i> .....	94
Figura 72 – Cenário PIM SM.....	96
Figura 73 – PIM SM: Construção da árvore de distribuição central.....	97
Figura 74 – PIM SM: Encaminhamento dos pacotes de dados.....	97
Figura 75 – PIM SM: Adesão do RP à árvore de distribuição por emissor.....	98
Figura 76 – PIM SM: Adesão do DR do receptor à árvore de distribuição por emissor.....	99
Figura 77 – PIM SM: Mecanismo de corte de um membro da árvore.....	100
Figura 78 – PIM SM: Encaminhamento dos pacotes na árvore de distribuição por emissor.....	100
Figura 79 – PIM SSM: Construção da árvore de distribuição por emissor.....	106
Figura 80 – PIM SSM: Encaminhamento dos pacotes de dados.....	106
Figura 81 – PIM SSM: Mecanismo de corte de um membro da árvore.....	107
Figura 82 – Cenário PIMv6 DM.....	109
Figura 83 – Mensagens <i>Hello</i> enviadas pelos <i>routers</i> FBSD_2 e Pluton.....	110
Figura 84 – Pacote de dados enviados pelo emissor DeskPC.....	111
Figura 85 – Encaminhamento do pacote de dados através do <i>router</i> Pluton.....	112
Figura 86 – Encaminhamento do pacote de dados através do <i>router</i> FBSD_2.....	112
Figura 87 – Troca de mensagens <i>Assert</i> entre os <i>routers</i> FBSD_2 e Pluton.....	112
Figura 88 – Periodicidade das mensagens <i>Assert</i> .....	113
Figura 89 – Mensagem <i>Prune</i> enviada na interface <i>fxp1</i> do <i>router</i> Pluton.....	113
Figura 90 – Mensagens <i>Prune</i> enviadas pelos <i>routers</i> Pluton e Gordon.....	114
Figura 91 – Mensagem <i>Graft</i> enviada do <i>router</i> Pluton para o <i>router</i> Gordon.....	116
Figura 92 – Mensagem <i>Graft-Ack</i> enviada pelo <i>router</i> Gordon para o <i>router</i> Pluton.....	116
Figura 93 – Período de encaminhamento dos pacotes de dados.....	118
Figura 94 – Cenário PIMv6 SM.....	119
Figura 95 – Mensagens <i>Hello</i> enviadas pelos <i>routers</i> Gordon e FBSD_2.....	122
Figura 96 – Primeira mensagem <i>Register</i> enviada do <i>router</i> Gordon para o RP (FBSD_2).....	124
Figura 97 – Mensagem <i>Register-Stop</i> enviada do RP (FBSD_2) para o <i>router</i> Gordon.....	125
Figura 98 – Mensagens <i>Register-Null</i> e mensagens <i>Register Stop</i> .....	125

Figura 99 – Mensagem <i>Join</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton (árvore de distribuição central) .....	127
Figura 100 – Pacote de dados encapsulado na mensagem <i>Register</i> ( <i>router</i> Gordon).....	129
Figura 101 – Pacote de dados encaminhado pelo <i>router</i> FBSD_2.....	130
Figura 102 – Pacote de dados encaminhado pelo <i>router</i> Pluton .....	130
Figura 103 – Mensagem <i>Join</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_2 em direcção ao emissor .....	132
Figura 104 – Pacote de dados encaminhado nativamente pelo <i>router</i> Gordon .....	132
Figura 105 – Adesão do <i>router</i> FBSD_2 à árvore de distribuição do emissor DeskPC.....	132
Figura 106 – Mensagem <i>Prune</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_3 .....	133
Figura 107 – Mensagem <i>Join</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton ao emissor DeskPC .....	134
Figura 108 – Mecanismo de <i>Assert</i> na rede 2001:690:2380:7776::/64 .....	134
Figura 109 – Mensagem <i>Join/Prune</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_3 .....	136
Figura 110 – Mensagem <i>Prune</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_1.....	137
Figura 111 – Mensagem <i>Prune</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton na direcção do emissor.....	137
Figura 112 – Mensagem <i>Prune</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton na direcção do RP.....	137
Figura 113 – PIMv6 SM: Mecanismo <i>Bootstrap</i> .....	139
Figura 114 – Envio de mensagens <i>Bootstrap</i> do <i>router</i> FBSD_3 para os vizinhos PIM .....	141
Figura 115 – Mensagem <i>Candidate-RP-Advertisement</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_2.....	141
Figura 116 – Envio periódico de mensagens <i>Candidate-RP-Advertisement</i> e <i>Bootstrap</i> .....	142
Figura 117 – Troca de mensagens na eleição do <i>router</i> FBSD_4 como novo BSR.....	143
Figura 118 – Mensagem <i>Bootstrap</i> com prioridades enviada pelo <i>router</i> FBSD_3 .....	144
Figura 119 – Mensagens <i>Bootstrap</i> com dois RP's de igual prioridade .....	146
Figura 120 – Mensagem <i>Register</i> enviado do <i>router</i> Gordon para o <i>router</i> FBSD_4 (RP).....	147
Figura 121 – Mensagem <i>Register</i> enviada do <i>router</i> Gordon para o <i>router</i> FBSD_1 (RP) .....	148
Figura 122 – Mensagem <i>Bootstrap</i> com dois RP's de diferente prioridade .....	149
Figura 123 – Cenário PIMv6 SSM.....	150
Figura 124 – Mensagem MLDv2 <i>Report</i> com emissor desejado.....	152
Figura 125 – Mensagem <i>Join</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton .....	153
Figura 126 – Adesão do receptor Centaurus às duas sessões <i>multicast</i> .....	154
Figura 127 – Abandono do receptor Dabase à sessão <i>multicast</i> do emissor Ares .....	155
Figura 128 – Mensagem MLDv2 <i>Multicast-Source-Address Specific Query</i> ( <i>router</i> FBSD_4).....	156
Figura 129 – Mensagem <i>Prune</i> enviada pelo <i>router</i> Pluton na direcção do emissor Ares .....	156
Figura 130 – Abandono do receptor Centaurus à sessão <i>multicast</i> do emissor Ares .....	157
Figura 131 – Cenário PIMv6 SM e PIMv6 SSM .....	158
Figura 132 – Encapsulamento IPv6 sobre IPv4.....	168

---

Figura 133 – IPv4-IPv6 <i>Multicast Gateway</i> .....	169
Figura 134 – Cenário PIMv6 SM com túneis configurados .....	172
Figura 135 – Mensagem <i>Hello</i> encapsulada num pacote IPv6.....	176
Figura 136 – Mensagem <i>Hello</i> encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4 .....	176
Figura 137 – Mensagem <i>Bootstrap</i> encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4 .....	177
Figura 138 – Mensagem <i>Register</i> encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4.....	179
Figura 139 – Mensagem <i>Join/Prune</i> encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4 .....	180
Figura 140 – Pacote de dados encapsulado num pacote IPv6 .....	182
Figura 141 – Tradutor <i>multicast</i> PIMv6 SM e PIM SM.....	184
Figura 142 – Mensagens <i>Hello</i> (IPv4).....	187
Figura 143 – Ligação TCP entre o tradutor e o <i>router</i> FBSD_2.....	187
Figura 144 – Sequência de pacotes na activação do tradução .....	190
Figura 145 – Mensagem <i>Join/Prune</i> enviada pelo <i>router</i> FBSD_4.....	190
Figura 146 – Mensagem IGMPv2 <i>Report</i> enviada pelo tradutor Pluton .....	191
Figura 147 – Mensagem <i>Join</i> enviada pelo <i>router</i> Cisco1 .....	191
Figura 148 – Pacotes IPv4 traduzidos em pacotes IPv6.....	192
Figura 149 – Pacotes IPv6 traduzidos em pacotes IPv4.....	192
Figura 150 – Mensagem <i>Register</i> enviada pelo <i>router</i> Cisco1 .....	193
Figura 151 – Adesão do <i>router</i> Cisco2 à árvore de distribuição do emissor Pluton .....	193
Figura 152 - Pacotes de dados enviados pelos emissores .....	194
Figura 153 – Mensagens IGMPv2 e MLD de abandono e fim da ligação TCP.....	194
Figura 154 – Solução MSDP .....	197
Figura 155 – Solução <i>Embedded-RP</i> .....	199
Figura 156 – Solução SSM.....	200
Figura 157 – Solução MBGP .....	202

# Índice de tabelas

Tabela 1 – Gamas de endereços IPv4 <i>multicast</i> .....	21
Tabela 2 – Valores atribuídos ao campo <i>Scope</i> .....	24
Tabela 3 – Gamas de endereços IPv6 <i>multicast</i> .....	28
Tabela 4 – Tipos de mensagens PIM .....	81

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1. Motivação e enquadramento

Há aproximadamente três décadas que o protocolo *Internet Protocol Version 4* (IPv4) [RFC 791] tem servido de base ao funcionamento da Internet sem ter sofrido alterações. Contudo, devido à escassez de endereços, este protocolo não consegue dar resposta ao crescente número de equipamentos com ligação à Internet, assim como às necessidades actuais dos utilizadores.

As limitações do protocolo IPv4 serviram de motivação para o desenvolvimento do protocolo *Internet Protocol version 6* (IPv6) [RFC 2460]. O novo protocolo não pode ser considerado um protocolo revolucionário que vem romper com a filosofia de funcionamento do protocolo IPv4. O espaço de endereçamento maior e mais flexível, o formato de cabeçalho mais simples e o suporte nativo de comunicações *multicast*, são alguns dos melhoramentos introduzidos pelo protocolo IPv6. Todos os nós IPv6 suportam nativamente comunicações *multicast* ao contrário do que acontece com os nós IPv4, uma vez que as comunicações *multicast* surgiram como uma extensão à especificação base do protocolo IPv4.

Apesar dos protocolos IPv4 e IPv6 não serem conceptualmente diferentes, não são compatíveis entre si. Na Internet, prevê-se que o processo de transição do IPv4 para o IPv6 não se irá realizar de um momento para o outro, e terá o seu início nas redes locais, estendendo-se gradualmente ao núcleo. A actualização dos sistemas não está limitada à camada de rede dado que nos protocolos das camadas superiores a transição também não é

transparente. Os endereços do protocolo IPv6 são bastante maiores, o que leva a alterações nas estruturas de dados que os manipulam. Na maior parte dos casos, as aplicações desenvolvidas para funcionarem com o protocolo IPv4 não funcionam com o protocolo IPv6. Por esta razão, existe a necessidade de desenvolver/adaptar as aplicações para suportarem o novo protocolo.

Durante a transição do protocolo IPv4 para IPv6 é necessário introduzir nas redes, o mais cedo possível, os novos serviços que são considerados fundamentais para a Internet do futuro. O *multicast* é um desses serviços e o tema principal desta dissertação.

Grande parte dos serviços da Internet baseiam-se nas comunicações *unicast*, caracterizadas pelo envio de pacotes IP de um único emissor para um único receptor e encaminhados pelos *routers* intermédios, de acordo com a tabela de encaminhamento *unicast* criada e actualizada por configuração estática, ou resultante de um qualquer protocolo de encaminhamento *unicast*. Contudo, existem cenários em que é mais eficiente entregar pacotes de dados a múltiplos receptores, como por exemplo sessões de *e-learning*, vídeo/áudio conferências, jogos, entre outros. Neste tipo de cenários, a solução de enviar múltiplos pacotes *unicast* para múltiplos receptores não é uma solução aceitável. Por um lado, é necessário que o emissor conheça a lista completa de todos os receptores e por outro, múltiplas cópias dos mesmos dados serão distribuídas nas mesmas ligações, aumentando os custos e os requisitos de largura de banda. As comunicações *multicast* resolvem estas questões. O emissor envia uma única cópia dos dados e a rede encarrega-se de os replicar apenas para as ligações onde existam receptores interessados, permitindo desta forma o uso eficiente dos recursos da rede. Este tipo de comunicações garante que a carga computacional e a largura de banda consumida por parte do emissor permaneça constante independentemente do número receptores interessados em receber os dados.

Com o passar dos anos houve por parte dos fornecedores de acesso para a Internet (*Internet Services Provider* - ISP) um maior interesse no suporte às comunicações *multicast*, uma vez que o número de clientes que pretendem serviços *multicast* tem vindo a aumentar. O avanço tecnológico na área da informática tornou a existência de sistemas distribuídos uma realidade, permitindo que as comunicações *multicast* se tornem num caso de negócio viável para os ISP's.

Do ponto de vista de gestão do encaminhamento, a Internet encontra-se dividida em Sistemas Autónomos (SA), entidades administrativas responsáveis por gerir o encaminhamento nas suas redes. O encaminhamento dentro de um SA é suportado por protocolos de

encaminhamento interior (*Interior Gateway Protocol* - IGP), competindo ao administrador de cada SA seleccionar o protocolo que pretende usar. A conectividade entre os vários SA é garantida à custa de protocolos de encaminhamento exterior (*Exterior Gateway Protocol* - EGP). À semelhança do que acontece com o encaminhamento *unicast*, também os protocolos de encaminhamento *multicast* são classificados em protocolos intra-domínio, usados para o encaminhamento dos dados *multicast* dentro de um único SA e em protocolos inter-domínio, usados para o encaminhamento dos dados *multicast* entre diferentes SA's.

O encaminhamento *multicast* é relativamente mais complexo quando comparado com o encaminhamento *unicast*. No encaminhamento *unicast*, o tráfego é encaminhado para um único destino. As rotas *unicast* necessitam ser actualizadas apenas quando houver alteração da topologia da rede IP. No encaminhamento *multicast*, o tráfego é encaminhado para um conjunto de receptores. A localização dos receptores que pertencem a um determinado conjunto pode variar, fazendo com que as tabelas de encaminhamento *multicast* sejam actualizadas dinamicamente sempre que um receptor adira ou abandone o conjunto.

As questões relacionadas com o encaminhamento *multicast* intra-domínio, não oferecem tantas dúvidas quando comparadas com as questões relacionadas com o encaminhamento *multicast* inter-domínio, quando se considera o modelo de transmissão de dados *Any Source Multicast* (ASM) e o modelo de transmissão de dados *Source Specific Multicast* (SSM), em redes IPv4 e em redes IPv6. De entre os vários protocolos de encaminhamento *multicast*, a família de protocolos *Protocol Independent Multicast* (PIM) permite resolver as questões do encaminhamento *multicast* intra-domínio e, em muitos casos, do encaminhamento *multicast* inter-domínio e será o principal objecto de estudo apresentado nesta dissertação.

## 1.2. Conceitos fundamentais

Um grupo *multicast* é identificado por um endereço IP e representa o conjunto de receptores que manifestam interesse em receber um determinado fluxo de dados. Antes de um emissor iniciar o envio de dados para um grupo *multicast*, ou de um receptor aderir a um grupo *multicast*, existe a necessidade de conhecerem o endereço IP que identifica o grupo *multicast*. Os dados enviados para um grupo *multicast* são replicados ao longo da rede (pelos *routers* intermédios) até atingirem todos os receptores que pertencem a esse grupo.

Os emissores enviam os dados para o grupo *multicast* usando o endereço IP que o identifica como endereço IP destino dos respectivos pacotes e não necessitam de sinalizar previamente a rede. Quanto aos receptores que pretendam receber dados de um grupo *multicast*, necessitam de sinalizar a rede recorrendo para esse efeito a um protocolo de sinalização. Uma vez sinalizados, os *routers multicast* trocam informação entre si usando protocolos de encaminhamento *multicast*. Por um lado, estes protocolos garantem que o tráfego *multicast* é entregue a todos os receptores que aderiram ao grupo *multicast*. Por outro, garantem que o tráfego *multicast* não é entregue a redes que não tenham receptores interessados em receber tráfego destinado a esse grupo *multicast* (a menos que seja uma rede de transito para redes onde existam receptores interessados) e garantem que o número de cópias idênticas dos mesmos dados é minimizado quando são entregues na mesma ligação.

Nas comunicações *multicast* IP são utilizados dois modelos de transmissão de dados. Inicialmente surgiu o modelo *Any Source Multicast* (ASM) [RFC 1112] e mais recentemente o modelo *Source Specific Multicast* (SSM) [RFC 3569]. No modelo ASM, os receptores manifestam interesse em aderir a um determinado grupo *multicast*, sinalizando a rede através do uso de um protocolo de sinalização *multicast*. No modelo SSM os receptores têm a possibilidade de, para além de indicarem o grupo *multicast* ao qual pretendem aderir, declararem o conjunto de emissores dos quais pretendem receber dados enviados para esse grupo. Para isso, os receptores sinalizam a rede usando um protocolo de sinalização *multicast* que implemente um mecanismo de filtragem dos endereços dos emissores. Como protocolos de sinalização, usam-se nas comunicações *multicast* IPv4, os protocolos *Internet Group Management Protocol version 2* (IGMPv2) e *Internet Group Management Protocol version 3* (IGMPv3). Nas comunicações *multicast* IPv6 são usados os protocolos *Multicast Listener Discovery* (MLD) e *Multicast Listener Discovery version 2* (MLDv2). Os protocolos IGMPv2 e MLD suportam apenas a sinalização para o modelo ASM, enquanto que os protocolos IGMPv3 e MLDv2 suportam a sinalização para o modelo SSM (motivo pelo qual foram desenvolvidos) e também para o modelo ASM, prevendo-se que no futuro a tendência seja para abandonar os protocolos IGMPv2 e MLD.

Tendo em conta as diferenças entre os dois modelos, considera-se nesta dissertação que: (i) no modelo ASM, uma sessão *multicast* é identificada pelo grupo *multicast*; (ii) no modelo SSM, uma sessão *multicast* é identificada pelos endereços IP *unicast* dos emissores (desejados ou não) e pelo grupo *multicast*.

O aparecimento do modelo SSM procurou resolver alguns problemas relacionados com o modelo ASM. A necessidade de coordenação na atribuição dos endereços IP que identificam os grupos *multicast*, é um desses problemas. No modelo ASM as aplicações requerem que seja usado um grupo *multicast* único, uma vez que a distribuição dos dados é baseada apenas no endereço IP que identifica o grupo *multicast*. Se duas aplicações com diferentes emissores usarem o mesmo grupo *multicast*, os receptores desse grupo irão receber dados enviados pelos emissores de ambas as aplicações, conduzindo assim a uma situação não desejável. Para evitar esta situação, é necessário existir um mecanismo ou protocolo de reserva global de endereços. Devido ao aumento das aplicações na Internet, esta solução pode-se tornar limitativa. Com o modelo SSM a problemática da atribuição de endereços é minimizada, pois os dados enviados por cada emissor são encaminhados de forma independente dos dados enviados por outros emissores, permitindo que diferentes emissores possam usar o mesmo endereço IP que identifica o grupo *multicast*, sem provocar interferência entre as várias sessões *multicast*. Com este modelo não se torna necessário o uso de mecanismos ou de protocolos de reserva global de endereços, já que a responsabilidade da selecção do endereço IP que identifica o grupo *multicast* é apenas do emissor da sessão *multicast*.

Outro dos problemas do modelo ASM, está relacionado com o facto de os dados enviados por qualquer emissor activo para um determinado grupo *multicast* serem encaminhados para todos os receptores pertencentes a esse grupo. Esta situação permite que qualquer emissor envie dados para esse grupo, mesmo tratando-se de um emissor não desejado, o que conduz a um cenário típico de ataques de segurança tais como o *Denial-of-Service* (consiste na ocupação da largura de banda do receptor com tráfego não desejado). O modelo SSM resolve este problema, já que os dados enviados por um emissor só são encaminhados pela rede apenas se forem solicitados por parte de um ou mais receptores.

Uma vez que no modelo ASM os receptores não conhecem quais são os emissores que enviam dados para o grupo *multicast* a que pertencem, compete à rede executar essa tarefa, usando para esse efeito um mecanismo de descoberta dos emissores para cada grupo *multicast*. No modelo ASM, o protocolo *Protocol Independent Multicast Sparse Mode* (PIM SM) é o protocolo de encaminhamento mais usado e definiu o uso de um ponto central responsável por gerir as sessões *multicast*, interligando os emissores e os receptores dessa sessão. A localização e a divulgação do ponto central, são questões importantes que aumentam a complexidade do

funcionamento do protocolo, especialmente em cenários de encaminhamento *multicast* entre diferentes Sistemas Autónomos.

No modelo SSM, como os receptores conhecem previamente os emissores que enviam dados para um determinado grupo *multicast*, a rede é dispensada de executar esta tarefa, o que conduz a uma diminuição da complexidade do funcionamento do protocolo *Protocol Independent Multicast Source Specific Multicast* (PIM SSM) usado no modelo SSM. Por este motivo, o modelo SSM é mais escalável em cenários de encaminhamento inter-domínio.

Apesar dos problemas apresentados anteriormente relacionados com o modelo ASM, este continua e continuará a ser usado, já que o modelo SSM não resolve todo o tipo de questões relacionadas com as comunicações *multicast*. O modelo SSM é claramente vantajoso para sessões de um emissor para vários receptores (transmissão de televisão, rádio, etc.), mas é penalizador para sessões de vários emissores para vários receptores (áudio/vídeo conferências, jogos, etc.), porque a complexidade aumenta à medida que o número de emissores aumenta. Para além disso, uma das lacunas associadas ao modelo SSM é o facto de não existir à data um mecanismo automático de anúncio de sessões *multicast*. Tal situação pode ser colmatada através da utilização de páginas Web ou correio electrónico, para a divulgação de informação relativa às sessões *multicast*.

### 1.3. Objectivos

A presente dissertação tem como principais objectivos:

- Estudo do endereçamento IPv4 *multicast* e IPv6 *multicast*.
- Estudo dos protocolos de sinalização entre os receptores e os *routers multicast*, usados no modelo ASM e no modelo SSM, em redes IPv4 e em redes IPv6.
- Estudo da família de protocolos PIM usados no encaminhamento *multicast* intra-domínio e inter-domínio, em redes IPv4 e em redes IPv6.
- Estudo de cenários de transição de suporte às comunicações *multicast* entre redes IPv4 e redes IPv6.
- Realização de experiências práticas de validação das comunicações *multicast* em cenários IPv6 e em cenários de transição, recorrendo maioritariamente a implementações de uso livre.

## 1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada na seguinte forma:

No capítulo 2 são descritas as diferentes gamas de endereços IP *multicast* e a correspondência entre os endereços IP *multicast* e os endereços *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802 da camada protocolar inferior. Este capítulo identifica ainda os mecanismos usados para o anúncio de sessões *multicast*.

O capítulo 3 descreve o funcionamento dos protocolos de sinalização em redes IPv4 e em redes IPv6, nos modelos ASM e SSM. Neste capítulo, é também apresentado um estudo da compatibilidade entre os protocolos dos diferentes modelos e são apresentados cenários de rede que ilustram o funcionamento dos protocolos de sinalização *multicast* em redes IPv6 nos modelos ASM e SSM.

O capítulo 4 descreve a família de protocolos PIM usados nos modelos ASM e SSM. De seguida, apresenta cenários de rede que ilustram o funcionamento dos protocolos *Protocol Independent Multicast Dense Mode* (PIM DM), PIM SM e PIM SSM, em redes IPv6 num único sistema autónomo e que validam a compatibilidade entre os diferentes protocolos.

O capítulo 5 discute alguns dos mecanismos de transição propostos pelo *Internet Engineering Task Force* (IETF) e apresenta cenários de rede que ilustram o funcionamento dos mecanismos de transição descritos, bem como da forma como podem ser usados para o suporte de comunicações *multicast* em redes mistas IPv4/IPv6. Na parte final deste capítulo, são também abordados os problemas e as soluções existentes para o encaminhamento inter-domínio, em redes IPv4 e em redes IPv6.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho realizado e são apontadas algumas perspectivas de evolução das comunicações *multicast*.



## Capítulo 2 – Endereços IP *multicast*

Um endereço IP *multicast* identifica um conjunto de interfaces, pertencentes a diferentes nós, que manifestam interesse em receber pacotes de dados destinados a um determinado grupo *multicast*. Cada interface pode pertencer a vários grupos *multicast*.

Para evitar que várias aplicações transmitam pacotes para o mesmo grupo *multicast*, conduzindo assim a uma situação de colisão de endereços IP *multicast*, é necessário existirem mecanismos de atribuição de endereços IP *multicast*. No modelo SSM, como uma sessão *multicast* é identificada pelo(s) emissor(es) e pelo grupo *multicast*, o problema da colisão de endereços IP *multicast* surge apenas quando um emissor envia para dois grupos diferentes identificados pelo mesmo endereço IP *multicast*. Por esta razão, é suficiente que o emissor escolha endereços IP *multicast* diferentes para grupos diferentes, tratando-se por isso de uma decisão local. No modelo ASM, o problema é mais complicado porque uma sessão *multicast* é identificada apenas pelo grupo *multicast*, existindo assim uma maior necessidade de coordenação na atribuição de endereços IP *multicast*.

Associado à atribuição de endereços IP *multicast*, surge também o problema dos anúncios das sessões *multicast*, uma vez que os grupos *multicast* têm que ser previamente conhecidos por parte dos emissores antes de começarem a emitir dados para uma sessão *multicast* e os receptores têm que conhecer os grupos *multicast* (e o endereço dos emissores no modelo SSM) antes de aderirem a uma sessão *multicast*.

Este capítulo descreve as diferentes gamas de endereços IP *multicast*, apresenta a correspondência entre os endereços IP *multicast* e os endereços IEEE 802 da camada protocolar inferior e identifica os mecanismos usados para o anúncio de sessões *multicast*.

## 2.1. Endereços IPv4

Um endereço IPv4 é composto por 32 bits e representa-se na forma decimal, em que cada conjunto de 8 bits (1 byte) é separado por um ponto (.) dos restantes bytes, tal como apresentado no exemplo seguinte: *m.n.o.p*

O espaço de endereçamento IPv4 foi dividido em cinco classes de endereços: as classes A, B, C, D e E. Um endereço IPv4 de classe A, B ou C é dividido em duas partes: (i) a parte que identifica a rede e (ii) a parte que identifica o nó na sua rede. Para identificar as duas partes que compõem os endereços, usa-se o conceito de prefixo de rede, representando-se os endereços da seguinte forma: *m.n.o.p/x* em que *x* identifica o número de bits que definem a rede, identificando os restantes bits que compõem o endereço, o nó. Na classe A, são usados 8 bits para definir a rede e os restantes 24 bits do endereço definem o nó da rede. Na classe B, são usados 16 bits para definir a rede e 16 bits para definir os nós da rede e na classe C, são usados 24 bits para definir a rede e 8 bits para definir os nós da rede. A classe D foi definida para representar endereços IPv4 *multicast* e a classe E encontra-se reservada para uso futuro.

### 2.1.1. Atribuição de endereços

A atribuição dos endereços IPv4 *unicast* é da responsabilidade dos ISP's e depende da sua localização geográfica. Compete ao ISP gerir uma gama de endereços com um prefixo de rede comum e atribuir redes dentro dessa gama aos domínios que serve. Um nó pode obter o endereço IPv4 *unicast* de duas formas: (i) por configuração manual, sendo a atribuição realizada por parte do administrador da rede, ou (ii) por configuração automática, através do uso do protocolo *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP) [RFC 2131].

A atribuição de endereços IPv4 *multicast*, não depende da sua localização geográfica e é feita de forma diferente da atribuição de endereços IPv4 *unicast*. Os endereços IPv4 *multicast* são atribuídos directamente pela *Internet Assigned Numbers Authority* (IANA) [RFC 3171]. Alguns endereços IPv4 *multicast* são reservados para serviços, como por exemplo os protocolos de encaminhamento *multicast*. Esta lista de endereços pode ser consultada em [IANA]. Outros

endereços IPv4 *multicast* são atribuídos a administradores de rede e geridos por estes. Existem ainda endereços IPv4 *multicast* usados para fins locais que são atribuídos de forma independente em cada rede individual.

### 2.1.2. Formato e gamas

A gama de endereços desde 224.0.0.0 até 239.255.255.255 representa os endereços IPv4 *multicast* dentro do espaço de endereçamento IPv4 (endereços de classe D). Um endereço IPv4 *multicast* (Figura 1) é composto por um conjunto de 4 bits mais significativos que define a gama de endereços IPv4 *multicast* e por um conjunto de 28 bits menos significativos que identificam o grupo *multicast*.

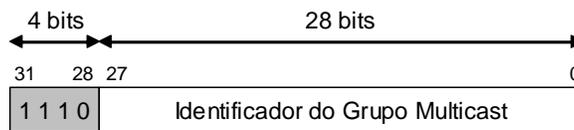


Figura 1 – Formato do endereço IPv4 *multicast*

A gama de endereços IPv4 *multicast* é dividida noutras gamas de acordo com o alcance dos endereços IPv4 *multicast*. Define-se alcance, como sendo os limites onde os grupos *multicast* são válidos. Os endereços IPv4 *multicast* de alcance local representam grupos *multicast* que servem apenas os receptores de uma rede local. Os endereços de alcance administrativo, permitem representar grupos *multicast* que podem servir receptores apenas nos seus limites regionais. Quanto aos endereços de alcance global, representam grupos *multicast* que podem servir receptores em qualquer zona geográfica.

- **Endereços de alcance local**

A gama de endereços entre 224.0.0.0 e 224.0.0.255, inclusive, encontra-se reservada para uso dos protocolos de rede quando as mensagens de controlo necessitam apenas de ser enviadas para a rede local. Os *routers* não encaminham pacotes *multicast* que tenham como destino um endereço desta gama. É da competência da IANA a atribuição dos endereços de alcance local.

- **Endereços de alcance administrativo**

A gama de endereços entre 239.0.0.0 e 239.255.255.255, inclusive, encontra-se reservada para aplicações e serviços válidos num limite definido administrativamente. Os pacotes *multicast* destinados a um endereço desta gama, não são encaminhados para além desses limites. Os

endereços IPv4 *multicast* dentro desta gama são atribuídos localmente, não sendo necessária nenhuma política de atribuição por parte da IANA e podem ser reutilizados em domínios diferentes, desde que se garanta que não ultrapassem os limites definidos administrativamente de forma a não interferirem com outros domínios.

- **Endereços de alcance global**

A gama de endereços entre 224.0.1.0 e 238.255.255.255, inclusive, encontra-se reservada para serviços de uso global. Esta gama é dividida noutras gamas de endereços, tal como apresentado de seguida. Esta divisão é da responsabilidade da IANA.

### **Endereços *Inter-Network***

A gama entre 224.0.1.0 e 224.0.1.255, inclusive, está reservada para uso dos protocolos de rede quando as mensagens de controlo necessitam de ser encaminhadas através da Internet. É da competência da IANA a atribuição de endereços dentro desta gama.

### **Endereços AD-HOC**

A gama entre 224.0.2.0 e 224.0.255.255, inclusive, encontra-se reservada para aplicações que não se enquadram na gama de endereços de alcance local, nem na gama de endereços *Inter-Network*. Este endereços são globalmente encaminháveis e são usados por aplicações que requerem pequenos blocos de endereçamento (e.g menores do que /24).

### **Endereços ST**

A gama entre 224.1.0.0 e 224.1.255.255, inclusive, está reservada para grupos *multicast* usados pelo protocolo *Stream Protocol* [RFC 1190].

### **Endereços SAP**

A gama de endereços IPv4 *multicast* entre 224.2.0.0 e 224.2.255.255, inclusive, está reservada para aplicações que enviem e recebam anúncios de sessões multimédia usando o protocolo *Session Announcement Protocol* (SAP) [RFC 2974]. A atribuição dos endereços dentro desta gama é feita de forma aleatória, sendo escolhido um endereço de entre os que se encontram livres. Não é da competência da IANA a atribuição de endereços dentro desta gama.

### Endereços SSM

A gama de endereços IPv4 *multicast* entre 232.0.0.0 e 232.255.255.255, inclusive, encontra-se reservada para aplicações e protocolos do modelo SSM. A atribuição dos endereços dentro desta gama não é da competência da IANA.

### Endereços GLOP

A gama de endereços IPv4 *multicast* entre 233.0.0.0 e 233.255.255.255, inclusive, trata-se de uma gama experimental (com duração máxima de um ano) atribuída pela IANA, e encontra-se reservada para Sistemas Autónomos (SA) que pretendam transmitir tráfego *multicast* através da Internet. Os Sistemas Autónomos são identificados por um número de dois bytes e usam esse número nos segundo e terceiro bytes dos endereços para construir a gama de endereços IPv4 *multicast* que serão da sua responsabilidade [RFC 3180]. É da competência de cada SA atribuir os endereços dentro da sua gama.

### Endereços reservados

As gamas de endereços IPv4 *multicast* entre 225.0.0.0 e 231.255.255.255, inclusive e entre 234.0.0.0 e 238.255.255.255, inclusive, encontram-se reservadas pela IANA para uso futuro.

- **Resumo das gamas de endereços**

A Tabela 1 descreve as gamas de endereços IPv4 *multicast*:

Gama de endereços	Reservados para	Alcance
224.0.0.0 – 224.0.0.255	<i>Local Network Control</i>	Local
224.0.1.0 – 224.0.1.255	<i>Internetwork Control</i>	Global
224.0.2.0 – 224.0.255.255	AD-HOC	
224.1.0.0 – 224.1.255.255	ST	
224.2.0.0 – 224.2.255.255	SAP	
232.0.0.0 – 232.255.255.255	<i>Source Specific Multicast</i>	
233.0.0.0 – 233.255.255.255	GLOP	
225.0.0.0 – 231.255.255.255 234.0.0.0 – 238.255.255.255	RESERVED	-----
239.0.0.0 – 239.255.255.255	<i>Administratively Scoped</i>	Administrativo

Tabela 1 – Gamas de endereços IPv4 *multicast*

## 2.2. Endereços IPv6

A necessidade de aumentar o espaço de endereçamento continua a ser uma das principais razões para a substituição do protocolo IPv4 pelo protocolo IPv6. Um endereço IPv6 é composto por 128 bits, o que permite endereçar aproximadamente  $3,4 \times 10^{38}$  interfaces diferentes. Com o aumento do número de bits para representar os endereços, houve a necessidade de adaptar a sua representação.

Um endereço IPv6 representa-se por oito conjuntos de 16 bits (2 bytes) representados em notação hexadecimal e separados pelo símbolo “ : ” tal como apresentado no seguinte exemplo: 2001:690:2380:7771:0:0:0:3. Devido a alguns métodos usados na atribuição de endereços, é usual os endereços conterem longas sequências de zeros. Para facilitar a sua representação, o identificador “ :: ” representa uma sequência arbitrária de zeros [RFC 3513]. Este símbolo só pode ser usado uma única vez na representação de um endereço. O endereço do exemplo anterior poderia ser representado por 2001:690:2380:7771::3. A representação do prefixo de um endereço IPv6 é feita da seguinte forma:

*Endereço IPv6 / tamanho do prefixo*

onde o *tamanho do prefixo* corresponde à representação em decimal do número de bits mais significativos contíguos do endereço que representam a rede. Por exemplo, se um nó for identificado pelo endereço 2001:690:2380:7771:211:11ff:fe12:523f e a rede for representada pelo prefixo 2001:690:2380:7771::/64, pode representar-se o endereço anterior por 2001:690:2380:7771:211:11ff:fe12:523f/64.

Durante o período de transição de IPv4 para IPv6 existirão nós que dispõem de endereços dos dois tipos, em que os últimos 32 bits do endereço IPv6 são gerados a partir do endereço IPv4 do nó. Nestes casos, os endereços IPv6 são representados da seguinte forma: x:x:x:x:x:d.d.d.d, em que x representa uma sequência de 16 bits em notação hexadecimal e d.d.d.d representa o endereço IPv4 na sua forma decimal. Os endereços 2001:690:2380:7771::193.136.92.223 e ::193.136.92.223 são dois exemplos deste tipo.

No espaço de endereçamento IPv6 [RFC 3513] foram definidos três tipos de endereços: *unicast*, *anycast* e *multicast*. Um endereço *unicast*, à semelhança do protocolo IPv4, é usado para identificar uma única interface; um pacote cujo endereço destino seja do tipo *unicast* é entregue à interface que tenha sido configurada com esse endereço. O endereço IPv6 *unicast link-local* é um dos tipos de endereços *unicast* [Oliveira 2004], que permite que todos os nós IPv6 de uma

rede local possam comunicar entre si sem terem configurados endereços IPv6 globais nas suas interfaces. Este tipo de endereço é composto pelo prefixo fe80::/10 e por um identificador único (*Interface ID*) de 64 bits. Por sua vez, um endereço *anycast* destina-se a identificar um conjunto de interfaces que normalmente pertencem a diferentes nós; um pacote cujo endereço destino seja *anycast* é entregue à interface mais próxima<sup>1</sup> identificada por esse endereço. Relativamente a um endereço *multicast* e à semelhança do protocolo IPv4, permite endereçar um grupo de interfaces pertencentes a diferentes nós; um pacote cujo endereço destino seja deste tipo, é entregue a todas as interfaces que sejam identificadas por esse endereço *multicast* num dado alcance (*Scope*).

Todos os nós IPv6 contêm endereços *multicast* configurados nas suas interfaces, uma vez que o protocolo IPv6 suporta nativamente as comunicações *multicast*, ao contrário do que acontece com o protocolo IPv4, onde as comunicações *multicast* apareceram como uma extensão ao protocolo.

### 2.2.1. Formato dos endereços

A atribuição dos endereços IPv6 *multicast* é realizada de forma diferente da atribuição dos endereços IPv4 *multicast*. Os endereços IPv6 *multicast* possuem diferentes formatos e a sua atribuição [RFC 3307] depende do formato do endereço usado.

A gama de endereços FF::/8 representa os endereços IPv6 *multicast* dentro do espaço de endereçamento IPv6. Um endereço IPv6 *multicast* é composto por vários campos. Na sua proposta inicial [RFC 3513], os 8 bits mais significativos são inicializados a um, aos quais se segue o campo *Flags* composto por 4 bits, o campo *scope* composto por 4 bits e finalmente, o campo *Group ID* composto por 112 bits, perfazendo desta forma os 128 bits que compõem um endereço IPv6 (Figura 2).

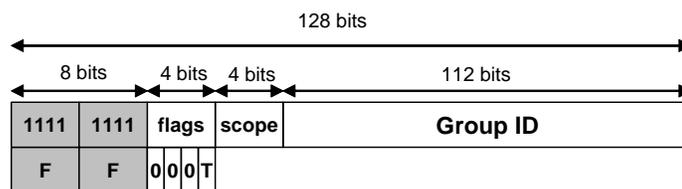


Figura 2 – Formato do endereço IPv6 *multicast*

<sup>1</sup> A interface mais próxima é determinada à custa dos protocolos de encaminhamento que estejam a ser usados.

Nesta proposta inicial, os três bits mais significativos do campo *Flags* foram inicialmente reservados para utilização futura e inicializados a zero. Os endereços IPv6 *multicast* podem ser endereços de uso permanente ou endereços de uso temporário. Se o bit T (Figura 2) for inicializado a zero, significa que o endereço IPv6 *multicast* é de uso permanente, usados por exemplo por sessões *multicast* (de televisão e rádio) ou por protocolos (DHCP, SAP, etc.). Este tipo de endereços é atribuído pela IANA e a lista de endereços permanentemente atribuídos encontra-se definida em [IANA6]. Se o bit T (Figura 2) for inicializado a um, significa que o endereço IPv6 *multicast* é de uso temporário, não tendo a IANA qualquer tipo de competência na sua atribuição.

À semelhança do que acontece com os endereços IPv4 *multicast*, os endereços IPv6 *multicast* também são válidos em determinados limites. A diferença relativamente aos endereços IPv4 *multicast* é que o endereço IPv6 *multicast* contém o campo *scope* [RFC 3513] que define o alcance dos endereços (Tabela 2).

Valor	Alcance
0, F	Reservados
1	Nó local ( <i>node-local</i> )
2	Ligação local ( <i>link-local</i> )
4	Administrativo local ( <i>Admin-local</i> )
5	Rede privada ( <i>site-local</i> )
8	Organização local ( <i>organization-local</i> )
E	Global ( <i>global</i> )
3,6,7,9,A,B,C,D	Não atribuídos

Tabela 2 – Valores atribuídos ao campo *Scope*

Nas comunicações *multicast* internas (*loopback*) de um nó são usados os endereços de alcance de nó local, enquanto que os endereços de alcance de ligação local são usados para sessões *multicast* numa rede local. Os *routers multicast* não encaminham os pacotes destinados a um endereço deste tipo. Para limitar as comunicações *multicast* a uma rede privada, são usados os endereços de alcance de rede privada. Um endereço com este alcance pode ser reutilizado em diferentes redes privadas, porque os *routers multicast* que limitam as redes privadas não encaminham para fora dos seus limites pacotes destinados a este tipo de endereço, de forma a não interferirem com outras redes privadas. Se surgir a necessidade de restringir o limite de uma determinada sessão *multicast*, podem ser usados os endereços de alcance administrativo local (endereços com o menor alcance que se pode configurar administrativamente). Se for pretendido limitar uma sessão *multicast* às redes privadas de uma organização, são usados os endereços de alcance de organização local, que podem ser reutilizados em organizações

diferentes desde que se garanta que não ultrapassem os limites definidos administrativamente, de forma a não interferirem com outras organizações. Para sessões *multicast* globais (através da Internet) são usados endereços de alcance global. Existem ainda valores de alcance que não estão atribuídos e que podem ser usados no futuro para serem definidas novas regiões *multicast*.

O campo *Group ID*, identifica o grupo *multicast* (de um endereço IPv6 *multicast* de uso permanente ou temporário) dentro de um determinado alcance. Os endereços IPv6 *multicast* permanentemente atribuídos são independentes do valor do alcance. Por exemplo, a IANA definiu o *Group ID* 101 para servidores *Network Time Protocol* (NTP) [RFC 1305] e todos os endereços IPv6 *multicast* com este *Group ID* representam os servidores NTP qualquer que seja o valor do alcance (1, 2, 4, 5, 8, E). Os endereços IPv6 *multicast* de uso temporário só têm significado dentro de um determinado alcance. Por exemplo, se um endereço IPv6 *multicast* de uso temporário for definido com o alcance de rede privada (valor 5), não interfere com o mesmo endereço IPv6 *multicast* de uso temporário usado noutra rede privada, ou com um endereço IPv6 *multicast* de uso temporário com o mesmo *Group ID* mas com alcance diferente, ou ainda com um endereço IPv6 *multicast* permanente que use o mesmo *Group ID*.

### 2.2.2. Endereços de uso temporário

Dos endereços de uso temporário, alguns são de particular interesse para o assunto desta dissertação pelo que são de seguida descritos individualmente.

#### **Endereços baseados no prefixo IPv6 *unicast***

De forma a reduzir o número de protocolos necessários para a atribuição dinâmica de endereços IPv6 *multicast*, foi definida [RFC 3306] uma extensão à arquitectura *multicast* do protocolo IPv6 que permite criar um endereço IPv6 *multicast* a partir do prefixo de uma rede IPv6, definindo desta forma uma gama de endereços para esse prefixo. A atribuição simultânea dos endereços IPv6 *multicast* e dos endereços IPv6 *unicast*, permite aos operadores de rede identificar os seus endereços *multicast* sem terem necessidade de executar um protocolo de reserva de endereços entre domínios diferentes. Este formato do endereço permite atribuir uma gama alargada de endereços IPv6 *multicast* a ser gerida por um Sistema Autónomo, deixando de fazer sentido o uso dos endereços GLOP definidos nas comunicações *multicast* IPv4. O formato destes endereços IPv6 *multicast* usa uma das *flags*

inicialmente reservadas para uso futuro e reestrutura o campo *Group ID* inicial em 4 diferentes campos (Figura 3).

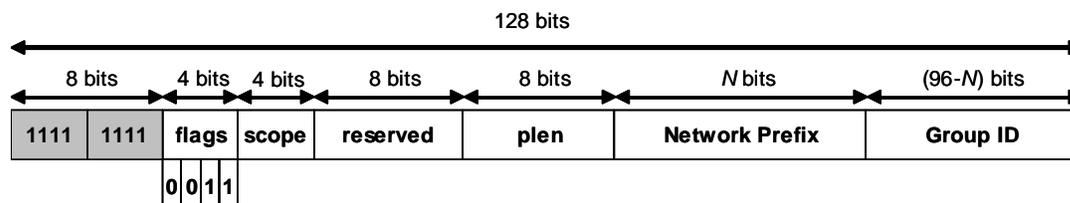


Figura 3 – Endereço IPv6 *multicast* baseado no prefixo IPv6 *unicast*

O campo *flags* apresenta o segundo bit menos significativo inicializado a um. O campo *reserved*, composto por 8 bits, foi reservado para uso futuro e inicializado a zero. O campo *plen*, composto por 8 bits, apresenta em notação hexadecimal o número de bits usados para representar o campo *Network Prefix*. Este campo é composto no máximo por 64 bits e apresenta em notação hexadecimal o prefixo da rede. O campo *Group ID* é composto no mínimo por 32 bits e identifica o grupo *multicast*.

O problema da atribuição de endereços IPv6 *multicast* fica desta forma limitado a uma zona conhecida, sendo da competência dos administradores de rede a gestão dos endereços IPv6 *multicast* dentro da sua gama de endereços. Por exemplo, à rede IPv6 atribuída ao Instituto de Telecomunicações (IT) – Pólo de Aveiro identificada pelo prefixo 2001:0690:2380:7770::/60, está associada a gama de endereços IPv6 *multicast* FF3x:003c:2001:0690:2380:7770::/92 (onde x representa qualquer valor válido de alcance), que será gerida pelo gestor desta rede.

### Endereços SSM

O formato do endereço IPv6 *multicast* baseado no prefixo de uma rede IPv6 *unicast* foi ligeiramente alterado para definir a gama de endereços SSM, tal como apresentado na Figura 4.

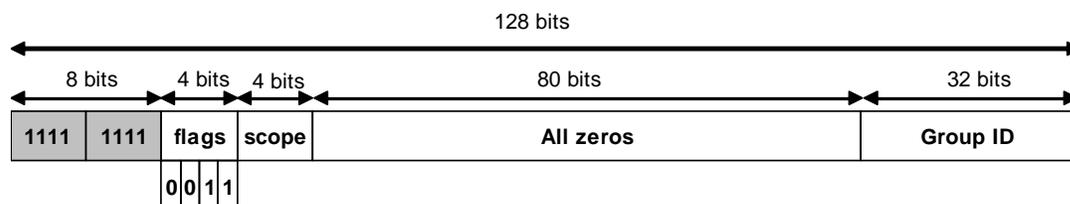


Figura 4 – Endereços IPv6 *multicast* SSM

Comparando o formato da Figura 3 com o formato da Figura 4, verifica-se que os campos *reserved*, *plen* e *Network Prefix*, foram concatenados formando um só campo composto por 80 bits inicializados a zero. Actualmente a gama de endereços IPv6 *multicast* SSM é a gama

FF3x::/96 (onde x toma um valor válido de alcance), existindo uma grande margem de manobra para reservar gamas maiores. As linhas de atribuição dos endereços IPv6 *multicast* dentro desta gama encontram-se definidas em [SSM].

### Endereços que incluem o endereço do *Rendezvous Point* (RP)

O *Rendezvous Point* (RP) é um elemento central do protocolo PIM SM responsável por gerir sessões *multicast*. O conceito de RP será explicado em detalhe no capítulo 4 (secção 4.4).

O formato do endereço IPv6 *multicast* baseado no prefixo de uma rede IPv6 *unicast* foi ligeiramente alterado para que inclua o endereço IPv6 *unicast* do RP e utiliza uma das *flags* inicialmente reservadas para uso futuro (Figura 5).

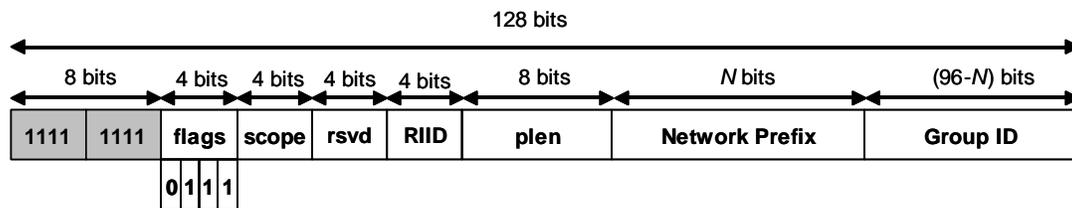


Figura 5 – Endereço IPv6 *multicast* contendo o endereço IPv6 *unicast* do RP

O campo *flags* apresenta o terceiro bit menos significativo inicializado a um. O campo *reserved* (*rsvd*) redimensionado de 8 bits para 4 bits, mantém-se reservado para utilização futura e inicializado a zero. Foi incluído o campo RIID (RP *Interface ID*) composto por 4 bits, para identificar (na rede) a interface do RP a ser usado. Todos os restantes campos foram mantidos inalterados. Note-se que um endereço IPv6 *unicast* de um nó é composto pela parte que identifica a rede (*Network Prefix* composto no máximo por 64 bits) e pela parte que identifica o nó (*Interface ID* de 64 bits). O endereço IPv6 *unicast* do RP a usar, deve seguir a estrutura apresentada na Figura 6 para que possa ser incluído no endereço IPv6 *multicast*. Os últimos 4 bits do endereço IPv6 *unicast* identificam o RP na rede (com o prefixo representado no campo *Network Prefix*).

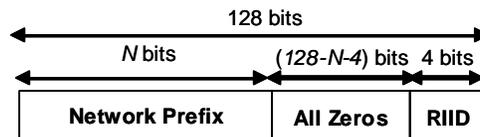


Figura 6 – Formato do endereço do endereço IPv6 *unicast* do RP

Com este formato, existem  $2^{(96-N)}$  grupos *multicast* diferentes que podem ser geridos por um RP. O problema da atribuição dos endereços IPv6 *multicast* dentro da gama de endereços disponíveis associados a um RP, é da responsabilidade dos operadores de rede onde se

encontra localizado o RP. Considere-se por exemplo um RP identificado pelo endereço 2001:690:2380:7770::y/60 (onde y identifica a interface do RP e pode tomar o valor de 1 a F). A gama de endereços IPv6 *multicast* servida por este RP é a gama FF7x::y3c:2001:690:2380:7770::/92 (onde x representa qualquer valor válido de alcance).

A inclusão do endereço IP *unicast* no endereço IP *multicast* só é possível apenas no IPv6, uma vez que o tamanho do endereço IPv6 é suficientemente grande para que se possa incluir o endereço IPv6 *unicast* do RP no endereço IPv6 *multicast* (que identifica um dado grupo).

- **Resumo das gamas de endereços**

A Tabela 3 descreve as gamas de endereços IPv6 *multicast*:

Gama	Descrição
FF00::/12	Endereços IPv6 <i>multicast</i> de uso permanente
FF10::/12	Endereços Gerais IPv6 <i>multicast</i> de uso temporário
FF30::/12	Endereços IPv6 <i>multicast</i> de uso temporário baseados no prefixo IPv6 <i>unicast</i>
FF3x::/96	Endereços SSM IPv6 <i>multicast</i> de uso temporário.
FF70::/12	Endereços IPv6 <i>multicast</i> de uso temporário contendo o endereço IPv6 <i>unicast</i> do RP

Tabela 3 – Gamas de endereços IPv6 *multicast*

### 2.3. Correspondência entre endereços IP *multicast* e endereços IEEE 802

Por norma, as interfaces de rede passam às camadas protocolares superiores os pacotes cujo endereço destino é o seu próprio endereço *Media Access Control* (MAC) ou o endereço MAC de *broadcast*. O endereço MAC IEEE 802 (Figura 7) é composto por 48 bits. A norma IEEE 802 define que o bit menos significativo do primeiro byte é usado para diferenciar os pacotes *broadcast* dos pacotes *multicast*, ou seja, este bit indica se a trama é destinada a todos os receptores ou a um grupo de receptores, dentro de uma rede local.

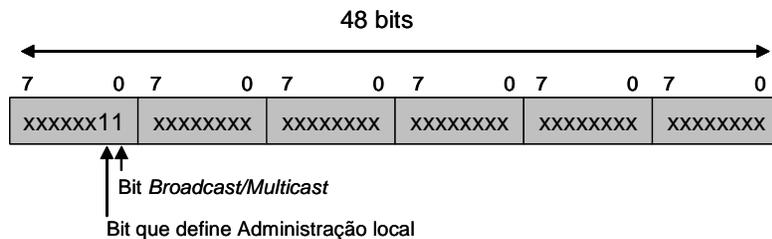


Figura 7 – Formato do endereço MAC IEEE 802

No caso do protocolo IPv4, o bloco de endereços MAC que se inicia em 01:00:5e (notação hexadecimal) está atribuído à IANA. Metade deste bloco é reservado para endereços *multicast*, estando desta forma disponível a gama de endereços MAC (que se inicia em 01:00:5e:00:00:00 e termina em 01:00:5e:7f:ff:ff). A atribuição do endereço IPv4 *multicast* é realizada através dos 23 bits menos significativos do endereço IPv4 do grupo *multicast*, nos 23 bits disponíveis do endereço MAC. Na Figura 8, encontra-se apresentado um exemplo da atribuição de um endereço IPv4 *multicast* num endereço MAC *multicast*:

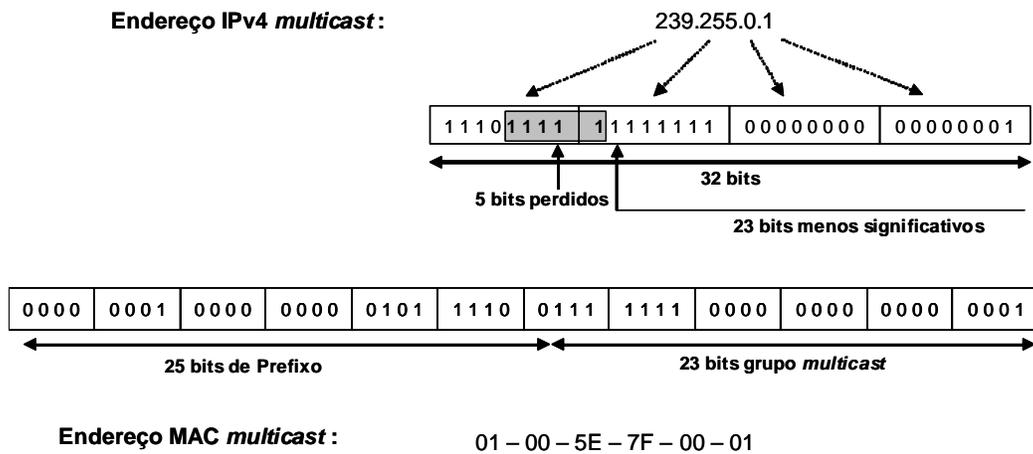


Figura 8 – Atribuição de um endereço IPv4 *multicast* num endereço MAC *multicast*

O facto de não serem usados os 5 bits mais significativos do endereço IP *multicast*, faz com que o endereço MAC *multicast* não seja único. De facto, um endereço MAC *multicast* pode representar 32 grupos *multicast* diferentes. A Figura 9, apresenta um exemplo em que 32 endereços IPv4 *multicast* são atribuídos num único endereço MAC *multicast*:

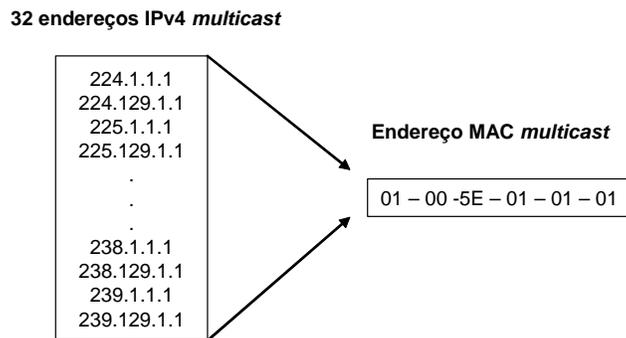


Figura 9 – Atribuição de 32 endereços IPv4 *multicast* num único endereço MAC *multicast*

Como consequência desta atribuição de endereços, se na mesma ligação diferentes endereços IPv4 *multicast* forem representados pelo mesmo endereço MAC *multicast*, os pacotes para os

diferentes endereços são passados à camada protocolar IP e é esta que, pelo conteúdo do cabeçalho IP, consegue distinguir se o pacote é para a sessão que lhe interessa ou não.

Relativamente às comunicações *multicast* IPv6, também foi definida uma regra [RFC 2464] usada na atribuição de um endereço IPv6 *multicast* num endereço MAC *multicast*. Os 32 bits menos significativos do endereço IPv6 *multicast* (correspondentes ao campo *Group ID*) são adicionados ao prefixo MAC, composto por 2 bytes e inicializados com o valor 33:33 (em notação hexadecimal). A Figura 10 apresenta um exemplo da atribuição de um endereço IPv6 *multicast* num endereço MAC *multicast*. Tal como no caso do *multicast* IPv4, podem existir vários endereços IPv6 *multicast* que são representados por um único endereço MAC *multicast*, resultando daí as consequências explicadas anteriormente.

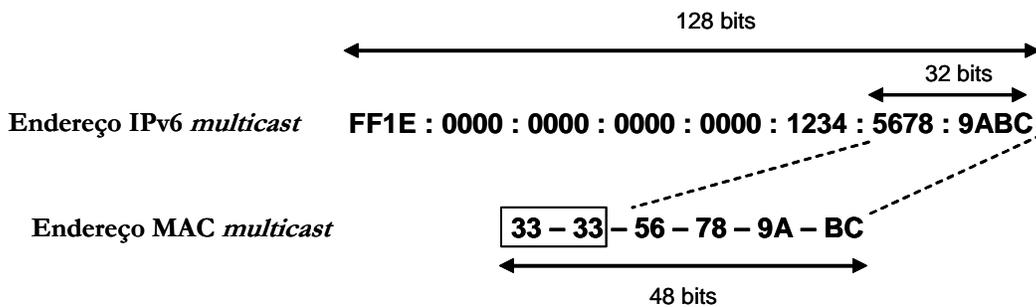


Figura 10 – Atribuição de um endereço IPv6 *multicast* num endereço MAC *multicast*

Na camada 2 do modelo *Open Systems Interconnection* (OSI), tipicamente os *switches* encaminham os pacotes *multicast* destinados a qualquer grupo *multicast* para todas as suas portas, o que conduz a uma situação desnecessária de ocupação dos recursos, uma vez que os pacotes podem ser encaminhados para portas que servem ligações onde não existam receptores pertencentes a esses grupos. De forma a reduzir o tráfego *multicast* que atravessam os *switches*, os protocolos IGMP *snooping* e MLD *snooping* [SNOOPING] permitem que os *switches* encaminhem os pacotes *multicast* de uma forma inteligente, uma vez que têm a capacidade de processar as mensagens IGMP e MLD trocadas entre os receptores e os *routers multicast* e, desta forma, encaminham apenas os pacotes destinados a um determinado grupo *multicast* para as portas que servem as ligações onde existam receptores que pertencem a esse grupo. O funcionamento em detalhe destes protocolos *multicast* de camada 2, não se enquadra nos objectivos desta dissertação.

## 2.4. Mecanismos de anúncio de *sessões multicast*

Uma sessão *multicast* é composta por vários tipos de parâmetros, tais como o endereço IP *multicast* que identifica a sessão, o endereço IP *unicast* do emissor (no modelo SSM), o número de porto usado, o tipo de sessão (áudio, vídeo, etc.), o tipo de codificação, os requisitos de largura de banda, a duração da sessão, entre outros. Os receptores interessados numa sessão *multicast* particular necessitam de conhecer previamente os parâmetros que a caracterizam. Por este motivo, é necessário que exista um mecanismo de anúncio de sessões *multicast*. Uma das formas usadas para a transmissão deste tipo de informação é listar as sessões *multicast* numa página Web e, desta forma, os receptores necessitam apenas de consultar essa página para obterem toda a informação relativa às sessões *multicast* de interesse. Este mecanismo é escalável e tem sido usado com sucesso no anúncio de sessões *multicast*. Outra das formas, passa por usar as comunicações *multicast* para transmitir a informação que caracteriza uma determinada sessão *multicast*, usando-se para isso, protocolos que cumpram com este objectivo.

No modelo ASM o anúncio das sessões *multicast* pode ser feito através de páginas Web ou através das comunicações *multicast*. Usando as comunicações *multicast*, os anúncios das sessões são enviados para um grupo *multicast* e número de porto definidos [IANA][IANA6]. Através da utilização de uma ferramenta que controla as sessões *multicast*, como por exemplo a ferramenta *Session Directory Tool* (SDR) [SDR], os emissores/receptores podem criar/receber anúncios de sessões *multicast* para/do grupo *multicast* definido. Por um lado, a ferramenta SDR faz uso do protocolo *Session Description Protocol* (SDP) [RFC 2327] para criar os parâmetros da sessão e envia periodicamente anúncios (com a descrição dos parâmetros da sessão) para o grupo *multicast* definido, usando para isso o protocolo SAP. Por outro lado, a ferramenta SDR adere ao grupo *multicast* definido e apresenta ao receptor a lista das sessões *multicast* anunciadas, podendo desta forma ser seleccionada a sessão *multicast* pretendida pelo receptor. Este mecanismo, usado nas comunicações *multicast* IPv4 e nas comunicações *multicast* IPv6, permite que qualquer número de receptores possa saber quais são as sessões *multicast* anunciadas. Contudo, não se trata de um mecanismo escalável para um grande número de sessões anunciadas, razão pela qual é considerado pelo IETF como um mecanismo experimental, apesar de ser muito usado especialmente para anunciar sessões *multicast* de interesse público. Relativamente ao modelo SSM e como se trata de um modelo recente, o anúncio das sessões *multicast* é feito recorrendo a páginas Web e correio electrónico.



## Capítulo 3 – Protocolos de sinalização *multicast*

Sempre que um receptor pretenda aderir a (ou abandonar) uma sessão *multicast* deve sinalizar a rede. Esta sinalização é realizada à custa de um protocolo de sinalização *multicast* e consiste na troca de mensagens entre os receptores e os *routers multicast* que se encontrem na mesma rede local, permitindo que estes tenham o conhecimento das sessões *multicast* pretendidas e evitando desta forma o encaminhamento dos pacotes *multicast* para as ligações onde não existam receptores interessados. As mensagens dos protocolos de sinalização não são encaminhadas para outras redes e os *routers multicast* não necessitam de saber qual o número de receptores interessados numa determinada sessão *multicast*, já que basta apenas que exista um, para que os pacotes de dados destinados a essa sessão sejam encaminhados para a rede local.

O protocolo *Internet Group Management Protocol* (IGMP), composto por três versões, é o protocolo de sinalização usado nas comunicações *multicast* IPv4. O protocolo IGMPv1 [RFC 1112] possui algumas limitações, uma das quais é o facto de não definir para os receptores qualquer mecanismo de abandono de uma sessão *multicast*, ou seja, os receptores abandonam uma sessão *multicast* sem sinalizarem a rede, o que conduz a uma ocupação desnecessária da largura de banda em redes locais. Actualmente esta versão já não é usada. O protocolo IGMPv2 [RFC 2236] define, entre outras funcionalidades, um mecanismo de abandono de sessões *multicast* e, é o protocolo de sinalização mais utilizado nas comunicações *multicast* IPv4

do modelo ASM. Recentemente, surgiu o protocolo IGMPv3, que define um mecanismo de filtragem dos endereços dos emissores, permitindo desta forma que possa ser usado como protocolo de sinalização nas comunicações *multicast* IPv4 do modelo SSM.

Nas comunicações *multicast* IPv6, é usado o protocolo *Multicast Listener Discovery* (MLD) [RFC 2710] para sinalização. Este protocolo é composto por duas versões: (i) a primeira versão, designada por MLD, é usada no modelo ASM e o seu funcionamento é semelhante ao do protocolo IGMPv2 e (ii) a segunda versão do protocolo, designada por MLDv2 [RFC 3810], define mecanismos de filtragem dos endereços do emissor à semelhança do que acontece com o protocolo IGMPv3, sendo por este motivo usada nas comunicações *multicast* IPv6 do modelo SSM. Tanto o IGMP, como o MLD, são protocolos assimétricos dado que consideram comportamentos distintos para receptores e para *routers* (um *router multicast* pode também assumir o comportamento de receptor).

Neste capítulo, são apresentados os protocolos de sinalização *multicast* usados no modelo ASM, os protocolos de sinalização *multicast* usados no modelo SSM e a interoperabilidade entre os protocolos de sinalização *multicast* usados nos dois modelos. O capítulo termina com um conjunto de experiências práticas que ilustram o funcionamento dos protocolos de sinalização usados em redes IPv6.

## 3.1 Sinalização *multicast* no modelo ASM

No modelo ASM, o receptor necessita apenas de indicar o grupo *multicast* que identifica a sessão *multicast* pretendida, recebendo os dados enviados por qualquer emissor para essa sessão. Nesta secção, é apresentado o formato das mensagens e o funcionamento dos protocolos IGMPv2 (para comunicações *multicast* IPv4) e MLD (para comunicações *multicast* IPv6).

### 3.1.1 Formato das mensagens IGMPv2 e MLD

As mensagens IGMPv2 são encapsuladas em pacotes IPv4 (Figura 11), sendo atribuído ao campo *Protocol* do cabeçalho IPv4, o valor '2'. Todas as mensagens IGMPv2 são enviadas com o campo *Time To Live* (TTL) igual a '1' e com a opção *Router Alert* [RFC 2711] activada.



Figura 11 – Cabeçalho IPv4 que transporta uma mensagem IGMPv2

O protocolo MLD é parte integrante do protocolo *Internet Control Message Protocol version 6* (ICMPv6) [RFC 2463], ou seja, as mensagens MLD estão contidas nas mensagens ICMPv6. A Figura 12 ilustra os cabeçalhos usados no envio de uma mensagem MLD. O cabeçalho IPv6 contém o campo *Next Header* a zero (*Hop-by-Hop*) e o campo *Hop Limit* igual a ‘1’. O cabeçalho de extensão *Hop-by-Hop* contém o campo *Next Header* a ‘58’ (que indica que o próximo cabeçalho é um cabeçalho ICMPv6) e a opção de *Router Alert* activada. Finalmente, o cabeçalho ICMPv6 contém a mensagem MLD.

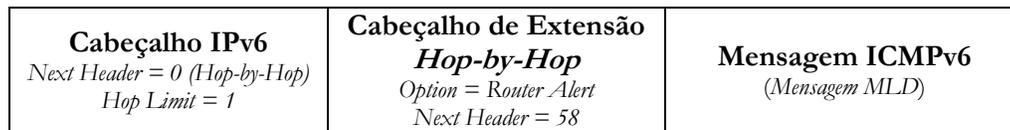


Figura 12 – Cabeçalhos que transportam uma mensagem MLD

Uma vez que os protocolos IPv4 e ICMPv6 não têm nenhum mecanismo que confirme a entrega de mensagens, algumas mensagens IGMPv2 e MLD são enviadas várias vezes de forma a garantir a sua entrega.

Os protocolos IGMPv2 e MLD são constituídos por três tipos de mensagens: *Membership Query*, *Membership Report* e *Membership Leave Group* (no IGMPv2) e *Multicast Listener Query*, *Multicast Listener Report* e *Multicast Listener Done* (no MLD), que passarão a ser referenciadas no decorrer desta secção por IGMPv2 *Query* e MLD *Query*, IGMPv2 *Report* e MLD *Report*, IGMPv2 *Leave* e MLD *Done*, respectivamente. No caso do IGMPv2, as mensagens são enviadas com endereço dado pelo endereço IPv4 *unicast* da interface do emissor e para um endereço destino IPv4 *multicast*. No caso do MLD, as mensagens são enviadas com endereço origem dado pelo endereço IPv6 *unicast link-local* (fe80::/10) da interface do emissor e, tal como no caso anterior, para um endereço destino IPv6 *multicast*. A Figura 13 apresenta o formato da mensagem IGMPv2 e a Figura 14 apresenta o formato da mensagem MLD.

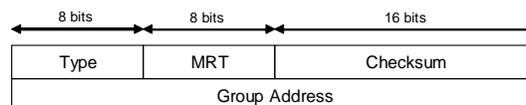


Figura 13 – Formato da mensagem IGMPv2

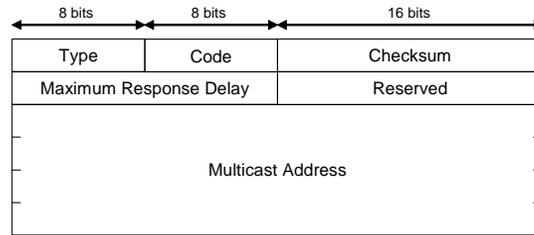


Figura 14 – Formato da mensagem MLD

O campo *Type* (representado em notação decimal) é usado para identificar o tipo de mensagem.

- A mensagem IGMPv2 *Query* (*Type*=17) e a mensagem MLD *Query* (*Type*=130) podem ser de dois sub-tipos. (i) A mensagem *General Query* é enviada pelo *router multicast* com o objectivo de determinar quais são as sessões *multicast* de interesse para os receptores da rede local. No IGMPv2, a mensagem tem como endereço destino o grupo 224.0.0.1 (*all-system multicast group*) e no MLD, tem como destino o grupo FF02::1 (*link-scope All-nodes*). O campo *Group Address* contém o endereço IPv4 0.0.0.0 e o campo *Multicast Address* contém o endereço IPv6 '::', indicando que a mensagem *General Query* não é destinada a nenhuma sessão *multicast* particular. (ii) A mensagem *Group-Specific Query* (IGMPv2) e a mensagem *Multicast-Address-Specific Query* (MLD) são enviadas pelo *router multicast* para o grupo que identifica a sessão *multicast*, com a finalidade de determinar se existem receptores interessados em continuar a receber dados destinados à sessão *multicast* identificada pelo endereço IPv4 *multicast* incluído no campo *Group Address*, ou pelo endereço IPv6 *multicast* incluído no campo *Multicast Address*.
- A mensagem IGMPv2 *Report* (*Type*=22) e a mensagem MLD *Report* (*Type*=131) são enviadas pelo receptor, para sinalizar a rede que pretende aderir a uma determinada sessão *multicast* identificada pelo grupo representado no campo *Group Address* ou no campo *Multicast Address*. Esta mensagem tem como destino o endereço IPv4 *multicast* representado no campo *Group Address*, ou o endereço IPv6 *multicast* representado no campo *Multicast Address*.
- A mensagem IGMPv2 *Leave Group* (*Type*=23) e a mensagem MLD *Done* (*Type*=132) são enviadas pelo receptor, com o objectivo de sinalizar a rede que pretende abandonar uma determinada sessão *multicast*. O destino da mensagem é o grupo 224.0.0.2 (*all-routers multicast group*), no caso do IGMPv2, ou o grupo FF02::2 (*link-scope*

*All-routers*) no caso do MLD e contém no campo *Group Address*, ou no campo *Multicast Address*, o endereço do grupo *multicast* que identifica a sessão que pretende abandonar.

O campo *Maximum Response Time* (MRT), composto por 8 bits, é usado nas mensagens IGMPv2 *Query*, enquanto que o campo *Maximum Response Delay* (MRD), composto por 16 bits, é usado nas mensagens MLD *Query*. Ambos os campos têm como função especificar o tempo máximo (em décimos de segundo para o MRT e em milissegundos para o MRD) que um receptor deve esperar até enviar uma mensagem IGMPv2 *Report* ou MLD *Report*. Nas restantes mensagens este campo toma o valor zero. O valor destes campos permite aos *routers multicast* controlar o tempo de abandono de uma sessão *multicast*, ou seja, o momento desde que o último receptor abandona uma sessão *multicast* até ao momento em que o protocolo de encaminhamento é notificado de que já não existem na rede local mais receptores interessados nessa sessão *multicast*.

O campo *Checksum* (composto por 16 bits) é usado para verificar se a mensagem contém erros de transmissão.

Os campos *Code* e *Reserved* foram incluídos na mensagem MLD. O primeiro é inicializado a zero em todas as mensagens, enquanto que o segundo se encontra reservado para uso futuro e também é inicializado a zero.

### 3.1.2 Funcionamento dos protocolos IGMPv2 e MLD

Uma rede local pode ser servida por um ou mais *routers multicast*. Em termos de sinalização *multicast*, apenas um *router multicast* se assume como o responsável pelo diálogo com os receptores e este *router* é designado por *Querier Router* (QR) (os restantes *routers multicast* são designados por *Non Querier Router* (NQR)). Inicialmente todos os *routers multicast* se assumem como QR e começam por enviar mensagens *General Query*. A partir do momento em que um *router multicast* recebe uma mensagem *General Query* enviada por um *router multicast* com menor endereço (no caso do IPv6, com menor endereço *unicast link-local*) deixa de se assumir como QR e passa a ser um NQR para essa rede. Se durante um determinado intervalo de tempo um NQR não receber mensagens *General Query* (por exemplo na situação em que o QR fique inoperacional) e se for o *router multicast* com menor endereço, então assume-se como o QR da rede local garantindo assim a continuidade do funcionamento do protocolo.

Para manter a informação das sessões *multicast* pretendidas por parte dos receptores numa rede local, o QR envia periodicamente [RFC 2236][RFC 2710] mensagens *General Query*. O valor do campo MRT (MRD no caso MLD) é igual a '10' segundos (valor por omissão). O QR mantém uma tabela com as sessões *multicast* por cada rede local que serve, estando atribuído um tempo de vida máximo [RFC 2236] [RFC 2710] a cada sessão *multicast*. Sempre que o *router* recebe uma mensagem *Report* para uma sessão *multicast*, o seu tempo de vida é actualizado com o valor máximo. Uma vez expirado esse tempo, a sessão *multicast* é apagada da tabela. Cada receptor tem um tempo de resposta (valor aleatório entre 0 e o valor do MRT (ou MRD)) que deve cumprir antes de enviar uma mensagem *Report* em resposta a uma mensagem *General Query*. Na mesma rede local podem existir vários receptores interessados em pertencer à mesma sessão *multicast*. Para evitar que todos os receptores da mesma sessão *multicast* enviem uma mensagem *Report*, conduzindo a uma situação de ocupação desnecessária de largura de banda e o processamento desnecessário das mensagens *Report*, após o primeiro receptor enviar esta mensagem, os restantes receptores também a recebem e já não enviam eles próprios a mensagem *Report*. O QR ao receber uma mensagem *Report* verifica se a sessão *multicast* já está presente na sua tabela de sessões *multicast*. Caso exista, actualiza o seu tempo de vida, caso contrário acrescenta uma nova entrada para essa sessão *multicast* com um tempo de vida associado.

Um receptor não precisa de esperar por uma mensagem *General Query* para informar o QR que pretende aderir a uma sessão *multicast*. Sempre que o quiser fazer, envia duas<sup>2</sup> mensagens *Report* [RFC 2236] [RFC 2710] destinadas ao grupo *multicast* que identifica a sessão pretendida.

Para evitar uma ocupação desnecessária da largura de banda de uma ligação na situação em que não existam receptores interessados numa determinada sessão *multicast*, foi definida uma mensagem de abandono (mensagem *Leave Group*, no IGMPv2 e mensagem *Done*, no MLD). O QR ao receber uma mensagem de abandono verifica se ainda existem mais receptores na rede local interessados nessa sessão, através do envio de duas mensagens *Group-Specific Query* (*Multicast-Address-Specific Query* no caso do MLD) destinadas ao grupo *multicast* que identifica a sessão. Se existir mais do que um receptor interessado nessa sessão *multicast*, a mensagem *Report* é enviada pelo receptor que tenha o menor tempo de resposta, tal como foi explicado anteriormente. Caso não existam mais receptores interessados, a sessão *multicast* é apagada da tabela de sessões *multicast* dessa rede local. Com este mecanismo, o QR determina de uma

---

<sup>2</sup> Para garantir que pelo menos uma mensagem é entregue.

forma mais rápida que não existem receptores interessados numa determinada sessão *multicast*, evitando assim ter que esperar o fim do tempo de vida dessa sessão *multicast* antes de a apagar da tabela de sessões *multicast* para essa rede local.

Apesar de, por um lado os receptores enviarem mensagens *Report* para sinalizarem a rede quando pretendem aderir a uma dada sessão *multicast* e por outro lado, enviarem mensagens de abandono (*Leave* e *Done*) para sinalizarem a rede quando pretendem abandonar uma dada sessão *multicast*, o envio periódico de mensagens *General Query* torna os protocolos robustos em situações de falha das mensagens *Report* (possibilitando que em determinada altura um receptor que não tenha conseguido sinalizar a rede acerca do interesse em aderir a uma dada sessão *multicast*, o possa fazer respondendo às mensagens *General Query*) e em situações de falha das mensagens *Done* (evitando que sessões *multicast* sem receptores interessados permaneçam permanentemente activas numa rede local).

## 3.2 Sinalização *multicast* no modelo SSM

Como foi referido anteriormente, um receptor que execute o protocolo IGMPv2 ou o protocolo MLD, indica apenas o grupo *multicast* que pretende aderir recebendo os dados de todos os emissores que enviem para esse grupo. No modelo SSM, o receptor ao aderir a uma sessão *multicast* indica o grupo *multicast* e os endereços dos emissores dos quais pretende (ou não) receber os pacotes de dados. O protocolo de sinalização usado nas comunicações *multicast* IPv4 é o protocolo IGMPv3 e nas comunicações *multicast* IPv6, é usado o protocolo MLDv2. Nesta secção é apresentado o formato das mensagens e o funcionamento de ambos os protocolos.

### 3.2.1 Formato das mensagens IGMPv3 e MLDv2

As mensagens destes protocolos são enviadas em pacotes IP tal qual os pacotes das versões anteriores (Figura 11 e Figura 12). O IGMPv3 e o MLDv2 são constituídos por dois tipos de mensagens: (i) a mensagem *Membership Query* e a (ii) mensagem *Membership Report* (no IGMPv3), e a (i) mensagem *Multicast Listener Query* e a (ii) mensagem *Version 2 Multicast Listener Report* (no MLDv2). No decorrer desta secção estas mensagens são referenciadas por IGMPv3 *Query* e MLDv2 *Query*, e IGMPv3 *Report* e MLDv2 *Report*. Tanto no IGMPv3, como no MLDv2, não foi definida uma mensagem exclusiva para que o receptor sinalize a rede quando

pretende abandonar uma dada sessão *multicast*. Devido à estrutura de ambos os protocolos, a mensagem *Report* também é usada para este efeito.

Mensagem Query

No IGMPv3 as mensagens *Query* (*Type=17*) enviadas periodicamente pelos *routers multicast*, usam como endereço origem o endereço IPv4 *unicast* da interface do emissor e como endereço destino um endereço IPv4 *multicast*. No protocolo MLDv2 (*Type=130*), usam como endereço origem o endereço IPv6 *unicast link-local* (fe80::/10) da interface do emissor e como endereço destino um endereço IPv6 *multicast*. A Figura 15 apresenta o formato de uma mensagem IGMPv3 *Query* e a Figura 16 apresenta o formato de uma mensagem MLDv2 *Query*.

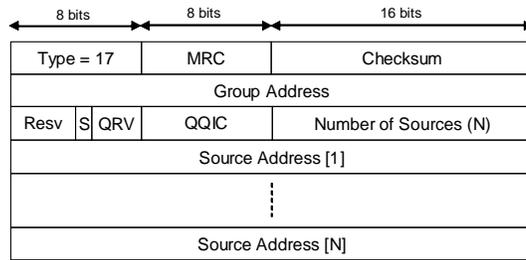


Figura 15 – Formato da mensagem IGMPv3 *Query*

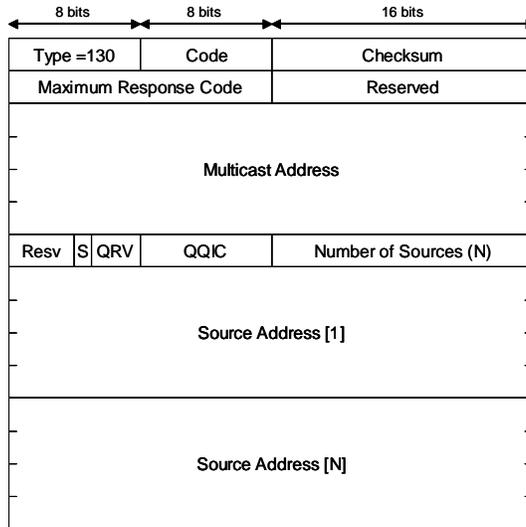


Figura 16 – Formato da mensagem MLDv2 *Query*

Em ambos os protocolos foram definidos três tipos de mensagens *Query*: (i) a mensagem *General Query* (tanto no IGMPv3 como no MLDv2), (ii) a mensagem *Group-Specific Query* (no IGMPv3) e a mensagem *Multicast-Address-Specific Query* (no MLDv2), e (iii) a mensagem *Group-*

*and-Source-Specific Query* (no IGMPv3) e a mensagem *Multicast-Address-and-Source-Specific Query* (no MLDv2).

- A mensagem *General Query* é enviada pelo *router multicast* com a finalidade de determinar quais são as sessões *multicast* pretendidas pelos receptores da rede local. O endereço destino da mensagem é o grupo 224.0.0.1 (*all-systems multicast address*) para o IGMPv3 e o grupo FF02::1 (*link-scope all-nodes*) para o MLDv2. O campo *Group Address* contém o endereço IPv4 0.0.0.0, enquanto que o campo *Multicast Address* contém o endereço IPv6 '::'.
- A mensagem *Group-Specific Query* e a mensagem *Multicast Address Specific Query*, são enviadas pelo *router multicast* com o objectivo de descobrir se existem receptores interessados em continuar a receber dados destinados à sessão *multicast* identificada pelo endereço representado no campo *Group Address* e no campo *Multicast Address*, respectivamente. O endereço destino desta mensagem é o endereço IP *multicast* do grupo que identifica a sessão *multicast*.
- A mensagem *Group-and-Source-Specific Query* e a mensagem *Multicast-Address-and-Source Specific Query*, são enviadas pelo *router multicast* para o endereço IPv4 *multicast* representado no campo *Group Address* e para o endereço IPv6 *multicast* representado no campo *Multicast Address*, respectivamente, com a finalidade de descobrir se existem receptores interessados em continuar a receber dados destinados a uma sessão *multicast* (identificada pelo endereço IPv4 *multicast* representado no campo *Group Address* ou pelo endereço IPv6 *multicast* representado no campo *Multicast Address*), enviados por determinados emissores (identificados pelos endereços *unicast* representados na lista de endereços dos emissores).

O campo *Code* é inicializado a zero em todas as mensagens, enquanto que o campo *Checksum* é usado para verificar se a mensagem contém erros, evitando que seja processada na situação em que contenha erros.

O campo MRT definido na mensagem IGMPv2, permite definir no máximo 25,5 segundos como o tempo máximo que um receptor deve esperar até enviar uma mensagem *Report*. O protocolo IGMPv3 ao definir o campo *Maximum Response Code* (MRC), permite aumentar o tempo máximo de resposta (MRT) que um receptor deve esperar antes de enviar uma mensagem *Report*, já que o seu valor é calculado a partir do valor do MRC (usando um

algoritmo exponencial [RFC 3376]). Da mesma forma, o campo MRD definido na mensagem MLD permite definir no máximo 65,535 segundos como o tempo máximo que um receptor deve esperar até enviar uma mensagem *Report*. O protocolo MLDv2 também define o campo *Maximum Response Code* (MRC), que permite aumentar o tempo máximo de resposta (MRD) que um receptor deve esperar antes de enviar uma mensagem *Report*, pois o seu valor é calculado a partir do valor do MRC (através de um algoritmo exponencial [RFC 3810]). Tal como no IGMPv2 e no MLD, o valor do campo MRT nas mensagens *Group-Specific Query* e *Group-and-Source-Specific Query* e o valor do campo MRD nas mensagens MLD *Multicast-Address-Specific Query* e *Multicast-Address-and-Source-Specific Query*, permitem aos *routers multicast* controlar o tempo de abandono de uma sessão *multicast*, ou seja, o momento desde que o último receptor abandona uma sessão *multicast* até ao momento em que o protocolo de encaminhamento é notificado de que já não existem na rede local mais receptores interessados nessa sessão *multicast*. Para além disso, as rajadas de tráfego IGMPv3 e MLDv2 na rede local são controladas pelo valor do campo MRT e do campo MRD nas mensagens *General Query*.

Os campos *Resv* (de 4 bits) e *Reserved* (de 16 bits) encontram-se reservados para uso futuro, sendo por isso colocado a zero em todas as mensagens.

A flag *S* (*Suppress Router-Side Processing*) condiciona a actualização dos contadores temporais dos *routers multicast* e é usada para melhorar a robustez do IGMPv3 e do MLDv2.

O campo *Querier's Robustness Variable* (QRV), composto por 3 bits, permite adaptar a robustez do IGMPv3 e do MLDv2 em ligações com perda de pacotes na ligação. Por omissão este campo toma o valor '2', significando que o protocolo é robusto se houver perda de um pacote.

O campo *Querier's Query Interval Code* (QQIC) é usado para calcular [RFC 3376][RFC 3810] o intervalo de tempo entre mensagens *Query*. Este intervalo de tempo é representado em segundos e definido como *Querier's Query Interval* (QQI). Valores maiores de QQI permitem diminuir o tráfego IGMPv3 e MLDv2 na rede local.

O campo *Number of Sources* (*N*), composto por 16 bits, especifica o número de endereços de emissor que estão presentes na mensagem *Query*. Este campo toma o valor zero nas mensagens *General Query* e nas mensagens *Group-Specific Query* e *Multicast-Address-Specific Query* e toma um valor diferente de zero, nas mensagens *Group-and-Source-Specific Query* e *Multicast-Address-and-Source-Specific Query*.

Mensagem Report

A mensagem *Report* é enviada por um receptor nas seguintes situações: (i) sinalizar a rede do seu interesse em aderir a uma sessão *multicast*; (ii) caso já pertença a uma sessão *multicast*, sinalizar a rede do seu interesse em continuar a receber dados para essa sessão; (iii) sinalizar a rede do seu interesse em abandonar uma dada sessão *multicast*. No IGMPv3, é usado como endereço destino o endereço IPv4 *multicast* 224.0.0.22 (*All IGMPv3-Capable multicast routers*), enquanto que no MLDv2 é usado como endereço destino o grupo FF02::16 (*All MLDv2-Capable multicast routers*). Nesta versão, cada receptor envia apenas uma única mensagem *Report* contendo toda a informação relativa às sessões *multicast* de interesse, evitando desta forma o envio de uma mensagem *Report* por cada sessão *multicast*, tal como acontece nos protocolos IGMPv2 e MLD. A Figura 17 apresenta o formato da mensagem IGMPv3 *Report* (*Type=34*) e a Figura 18 apresenta o formato da MLDv2 *Report* (*Type=143*).

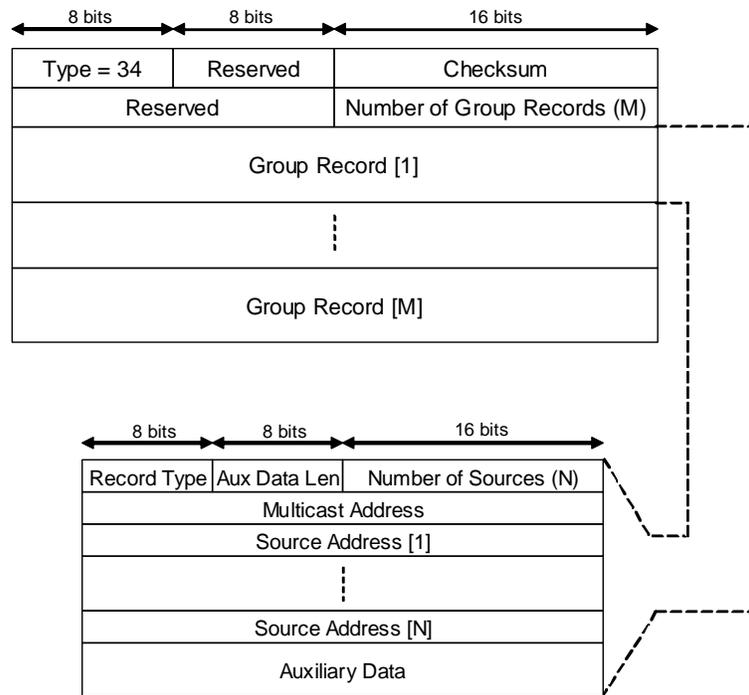


Figura 17 – Formato da mensagem IGMPv3 *Report*

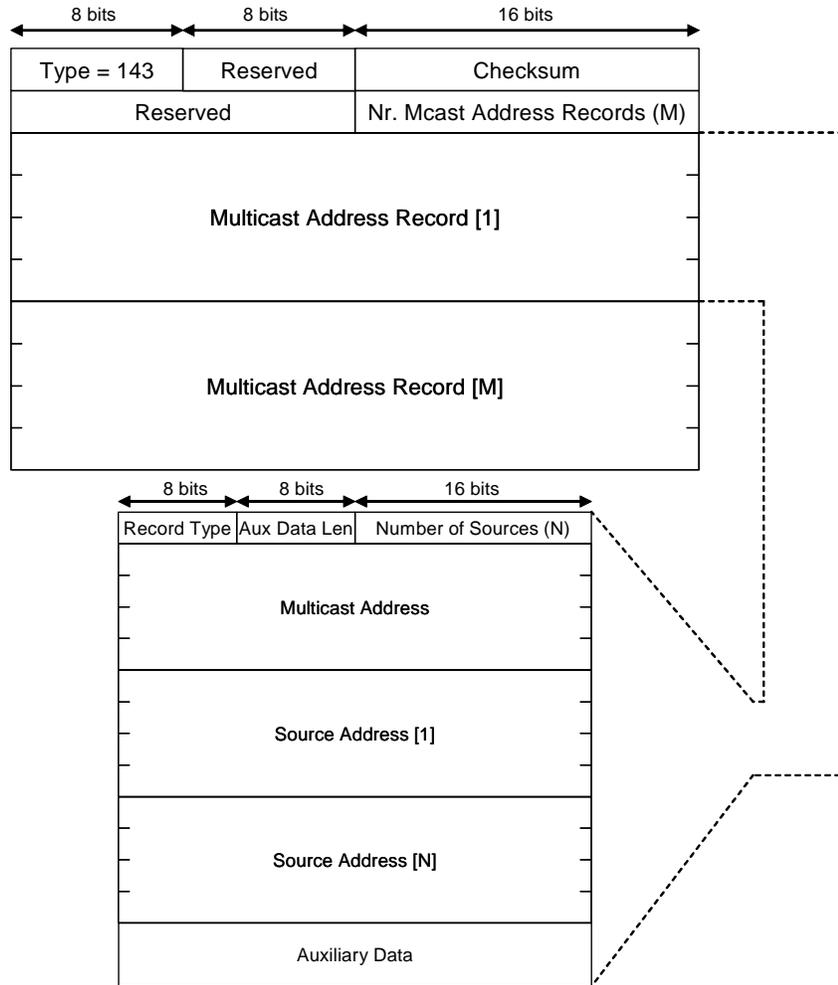


Figura 18 – Formato da mensagem MLDv2 Report

Os campos *Reserved*, encontram-se reservados para uso futuro, sendo por isso colocados a zero e o campo *Checksum* é usado para verificar se a mensagem contém erros de transmissão.

O campo *Number of Group Records (M)*, composto por 16 bits, especifica o número de *Group Records* contidos na mensagem *IGMPv3 Report*, enquanto que o campo *Nr. of Mcast Address Records (M)*, composto por 16 bits, especifica o número de *Multicast Address Records* contidos na mensagem *MLDv2 Report*. O mecanismo de filtragem dos endereços dos emissores de uma sessão *multicast* é feito através dos *Group Records* ou dos *Multicast Address Records*. O *IGMPv3* e o *MLDv2* definem dois modos de filtragem que são aplicados em cada interface, o modo *INCLUDE* e o modo *EXCLUDE*. No modo *INCLUDE* é especificada a lista de emissores pretendidos (por parte dos receptores da rede local) de uma dada sessão *multicast*. Se esta lista estiver vazia significa que não é uma sessão *multicast* de interesse. No modo *EXCLUDE* é

especificada a lista de emissores não desejados (por parte dos receptores da rede local) de uma dada sessão *multicast*. Se esta lista estiver vazia significa que os receptores da rede local pretendem receber os dados enviados por qualquer emissor para essa sessão *multicast*. Por cada sessão *multicast* de interesse é incluído um campo *Group Record* na mensagem *IGMPv3 Report*, ou um campo *Multicast Address Record* na mensagem *MLDv2 Report*, sendo desta forma criado um vector de *M* posições para representar os vários *Group Records* ou os vários *Multicast Address Records*. Cada *Group Record* e cada *Multicast Address Record*, é composto por vários campos que contêm a informação relativa a uma sessão *multicast* de interesse.

O campo *Record Type* é utilizado para diferenciar os *Group Records* e os *Multicast Address Records*. Existem três tipos de *Records* que podem ser incluídos numa mensagem *Report*.

- O *Current State Record* é enviado em resposta a uma mensagem *Query*, com o objectivo do receptor indicar o estado actual da sua interface relativamente a uma dada sessão *multicast*. Este registo contém o modo de filtragem e os endereços dos emissores (caso sejam especificados). O campo *Record Type* pode assumir o valor `MODE_IS_INCLUDED` (0x01) ou o valor `MODE_IS_EXCLUDED` (0x02).
- O *Filter Mode Change Record* é enviado sempre que o receptor pretende alterar o modo de filtragem da interface. Este registo é composto pelo modo de filtragem e pelos endereços dos emissores (caso sejam especificados). O campo *Record Type* pode assumir o valor `CHANGE_TO_INCLUDE_MODE` (0x03) ou o valor `CHANGE_TO_EXCLUDE_MODE` (0x04).
- O *Source List Change Record* é enviado sempre que houver alteração da lista de emissores associados a um dado grupo *multicast*. O modo de filtragem (INCLUDE ou EXCLUDE) é mantido nesta situação. O campo *Record Type* pode assumir o valor `ALLOW_NEW_SOURCES` (0x05) ou `BLOCK_OLD_SOURCES` (0x06). O *Record Type* com o valor `ALLOW_NEW_SOURCES` (0x05) é usado para acrescentar mais emissores à lista previamente declarada (se o modo presente for o INCLUDE, são acrescentados à lista os novos emissores; se o modo presente for o EXCLUDE estes emissores são retirados da lista de emissores de interesse). O *Record Type* com o valor `BLOCK_OLD_SOURCES` (0x06) é usado para retirar emissores da lista previamente declarada (se o modo presente for o INCLUDE, são retirados da lista esses emissores; se o modo presente for o EXCLUDE estes emissores são acrescentados à lista de emissores de interesse).

O campo *Aux Data Len* especifica o tamanho dos dados auxiliares (campo *Auxiliary Data* que, caso exista, contém informação adicional relativa ao *Group Record*) incluídos no final do *Group Record* e no final do *Multicast Address Record*. Caso não sejam transmitidos dados auxiliares, este campo toma o valor zero.

O campo *Multicast Address* contém o endereço do grupo que identifica a sessão *multicast*. O campo *Number of Sources (N)* especifica o número de endereços de emissor que estão presentes no *Group Record* e no *Multicast Address Record*. Este campo toma o valor zero quando não é especificado nenhum emissor para a sessão *multicast* e toma um valor diferente de zero, quando é especificado o endereço dos emissores, situação onde é usado o campo *Source Address [N]* que representa um vector de *N* posições com os endereços IPv4 *unicast*, ou com os endereços IPv6 *unicast*, dos emissores desse grupo *multicast*.

### 3.2.2 Funcionamento dos protocolos IGMPv3 e MLDv2

A introdução de um mecanismo de filtragem dos endereços dos emissores tornou mais complexo o funcionamento dos protocolos IGMPv3 e MLDv2 quando comparados com o funcionamento dos protocolos IGMPv2 e MLD.

Cada receptor tem um tempo de resposta ao fim do qual deve enviar uma mensagem *Report* em resposta a uma mensagem *Query*. O tempo de resposta é um valor aleatório compreendido entre 0 e o MRT (calculado a partir do valor do MRC), no IGMPv3, ou um valor aleatório entre 0 e o MRD (calculado a partir do valor do MRC), no MLDv2. Note-se que, conforme descrito anteriormente, uma mensagem *Report* transporta a informação relativa a todas as sessões de interesse de um receptor. Assim, cada receptor só não envia a mensagem *Report* se todas as sessões que são do seu interesse forem anunciadas pelas mensagens *Report* enviadas previamente por outros receptores. No caso de faltar alguma sessão *multicast*, o receptor envia a mensagem *Report* com a informação de todas as sessões *multicast* que pretende receber (mesmo as previamente declaradas pelos outros receptores).

O processo de eleição do *Querier Router* (QR) é idêntico ao das versões anteriores, sendo o QR da rede local, o *router multicast* que envie mensagens *General Query* com o menor endereço IPv4 *unicast* (IGMPv3) ou com o menor endereço IPv6 *unicast link-local* (MLDv2). O funcionamento do QR é mais complexo do que nas versões anteriores, porque tem que gerir os seis tipos de *Record Type* e manter a informação do estado de cada sessão *multicast* de interesse em cada

interface. A informação do estado de cada sessão *multicast* é composta pelo: (i) grupo *multicast*, (ii) modo de filtragem, (iii) lista de emissores e (iv) contadores temporais. Por cada mensagem *Report* recebida, o *router multicast* actualiza a sua lista de sessões *multicast*.

Por omissão, as interfaces (dos receptores e dos *routers multicast*) que executam os protocolos IGMPv3 e MLDv2 encontram-se no modo de filtragem INCLUDE. O *router multicast* mantém o modo INCLUDE para um dado grupo *multicast* se todos os receptores da rede local estiverem no modo INCLUDE para esse grupo. A partir do momento em que um receptor mude o seu modo de filtragem para EXCLUDE (relativo a esse grupo *multicast*), o *router multicast* também muda o seu modo de filtragem para EXCLUDE (mesmo que os restantes receptores interessados nesse grupo estejam no modo INCLUDE). Depois de expirado o contador temporal relativo ao grupo *multicast*, o *router multicast* volta novamente ao modo de filtragem INCLUDE.

O QR envia periodicamente [RFC 3376][RFC 2710] uma mensagem *General Query* para determinar quais são as sessões *multicast* de interesse para os receptores da rede local. Em resposta a estas mensagens podem ocorrer duas situações: (i) os receptores enviam uma mensagem *Report*, com o campo *Record Type* a MODE\_IS\_INCLUDED (0x01) e com a lista de endereços dos emissores e o grupo *multicast*, caso pretendam especificar os emissores desejados para esse grupo; (ii) os receptores enviam uma mensagem *Report*, com o campo *Record Type* a MODE\_IS\_EXCLUDED (0x02) e com a lista de emissores não desejados para um determinado grupo *multicast*.

À semelhança do que acontece com os protocolos IGMPv2 e MLD, um receptor não tem que esperar necessariamente por uma mensagem *General Query* para sinalizar a rede do seu interesse em aderir a uma determinada sessão *multicast*. Neste caso, podem surgir duas situações: (i) quando um receptor especifica a lista de emissores pretendidos para um dado grupo *multicast*, não altera o modo de filtragem da interface (por omissão no modo INCLUDE) para esse grupo e envia uma mensagem *Report* com o valor ALLOW\_NEW\_SOURCES (0x05) no campo *Record Type* e a lista de endereço dos emissores pretendidos; (ii) quando pretende receber dados enviados por todos menos determinados emissores para um dado grupo, o receptor altera o modo de filtragem da sua interface para o modo EXCLUDE e envia uma mensagem *Report* com o campo *Record Type* a CHANGE\_TO\_EXCLUDE\_MODE (0x04) e a lista desses emissores (note-se que quando um receptor pretende receber dados de qualquer

emissor para um dado grupo, o receptor usa o modo EXCLUDE sem declarar nenhum endereço emissor).

No IGMPv3 e no MLDv2, as mensagens *Report* também são usadas pelos receptores para sinalizarem a rede do seu interesse em abandonar uma sessão *multicast*. Neste caso podem surgir duas situações. Quando o modo presente é o EXCLUDE, o receptor envia mensagens *Report* com o campo *Record Type* a CHANGE\_TO\_INCLUDE\_MODE (0x03) e a lista de emissores vazia. Quando o modo presente é o INCLUDE, o receptor envia mensagens *Report* com o campo *Record Type* a BLOCK\_OLD\_SOURCES (0x06) e a lista de emissores previamente declarada. Em ambos os casos, o receptor envia duas mensagens *Report*. O QR ao receber estas mensagens envia duas mensagens *Group-Specific Query* (ou *Multicast-Address-Specific Query*) para verificar se continuam a existir na rede receptores interessados nessa sessão *multicast*. Caso existam receptores interessados, actualiza a sua lista de sessões *multicast* (actualização de contadores temporais) e caso contrário, elimina essa sessão *multicast* da sua lista de sessões *multicast* para essa interface.

### 3.3 Compatibilidade entre os protocolos de sinalização *multicast* ASM e SSM

Nas redes que suportam comunicações *multicast*, torna-se útil a coexistência entre os dois modelos de transmissão de dados *multicast*, uma vez que o modelo SSM não substitui completamente o modelo ASM. Como o modelo SSM é ainda um modelo recente, existem muitos receptores e *routers multicast* que não têm a capacidade de suportar os protocolos de sinalização *multicast* usados neste modelo. Assim sendo, torna-se necessário que os protocolos de sinalização *multicast* utilizados pelo modelo SSM sejam compatíveis com os protocolos de sinalização *multicast* utilizados pelo modelo ASM. Esta compatibilidade é garantida, porque os protocolos IGMPv3 e MLDv2 incluem nas suas mensagens os campos das mensagens dos protocolos IGMPv2 e MLD, respectivamente. A compatibilidade entre os protocolos de sinalização dos dois modelos pode ser analisada na perspectiva dos receptores ou na perspectiva dos *routers multicast*.

Um receptor que suporte os protocolos IGMPv3/MLDv2 possui na sua interface uma variável [RFC 3376][RFC 3810] que pode assumir o estado IGMPv3/MLDv2 ou o estado IGMPv2/MLD. Inicialmente a variável encontra-se no estado IGMPv3/MLDv2, mas a partir

do momento em que circule na rede local uma mensagem IGMPv2/MLD *Query* altera o seu estado para IGMPv2/MLD. Desta forma, é possível incluir um receptor IGMPv3/MLDv2 numa rede onde existam *routers multicast* que suportem apenas o protocolo IGMPv2/MLD, já que o receptor passa a enviar mensagens IGMPv2/MLD *Report*. Para determinar a que versão pertence a mensagem *Query*, o receptor analisa o comprimento da mensagem. A mensagem IGMPv2 *Query* tem o comprimento de 8 bytes, enquanto que a mensagem IGMPv3 *Query* tem o tamanho maior ou igual a 12 bytes e a mensagem MLD *Query*, tem o comprimento de 24 bytes, enquanto que a mensagem MLDv2 *Query*, tem o comprimento maior ou igual a 28 bytes. Se ao fim de um determinado período de tempo [RFC 3376][RFC 3810] deixarem de circular na rede mensagens IGMPv2/MLD *Query*, os receptores voltam novamente a executar o protocolo IGMPv3/MLDv2. Para além deste cenário, um receptor IGMPv3/MLDv2 também pode ser incluído numa rede local onde existam receptores que suportem apenas os protocolos IGMPv2/MLD, uma vez que as mensagens IGMPv3/MLDv2 *Report* são substituídas por mensagens IGMPv2/MLD *Report*.

Relativamente aos *routers multicast* que suportam o protocolo IGMPv3/MLDv2, por um lado, podem ser colocados em redes locais onde exista pelo menos um *router multicast* que suporte apenas o protocolo IGMPv2/MLD, desde que se garanta administrativamente que as mensagens *Query* usem o protocolo IGMPv2/MLD. Por outro lado, também podem ser colocados em redes onde existam receptores IGMPv2/MLD, bastando para isso que os *routers* IGMPv3/MLDv2 operem no modo de compatibilidade com a versão IGMPv2/MLD. Os *routers* IGMPv3/MLDv2 mantêm o modo de compatibilidade por cada *Group Record (Multicast Address Record)* determinado por uma variável [RFC 3376][RFC 3810] que pode assumir o valor IGMPv3/MLDv2 ou o valor IGMPv2/MLD. Ao ser recebida uma mensagem IGMPv2/MLD *Report*, esta variável toma o valor IGMPv2/MLD e ao mesmo tempo o grupo *multicast* passa a ter um novo tempo de vida. Uma vez expirado o tempo de vida do grupo *multicast* e se não for recebido mais nenhuma mensagem IGMPv2/MLD *Report*, a variável toma novamente o valor IGMPv3/MLDv2 para esse grupo *multicast*.

## 3.4 Experiências práticas

Conforme descrito anteriormente, o funcionamento dos protocolos MLD é semelhante ao dos protocolos IGMP. Assim, foram realizadas experiências práticas apenas com os protocolos MLD e MLDv2 e as conclusões que se retiram são extensíveis aos protocolos IGMP. Os *routers multicast* são estações FreeBSD 4.9 com a pilha *Kame* de 26/07/2004 (os passos de instalação e configuração da pilha *Kame* são apresentados no Anexo I). Os receptores MLD são estações Linux (RedHat 9.0) que executam a aplicação WBD<sup>3</sup>. Em contraste com o protocolo MLD, onde existem várias aplicações para diferentes sistemas operativos, no protocolo MLDv2 não existe uma grande variedade de aplicações. Por este motivo, houve a necessidade de usar como receptores MLDv2, estações FreeBSD 4.9 com a pilha *Kame* instalada (uma vez que esta contém a aplicação *mcastread*<sup>4</sup>).

Para que o protocolo MLD esteja activo nos *routers* é necessário que estes corram um protocolo de encaminhamento *multicast*. Em todas as experiências desta secção foi usado o protocolo PIM SSM (em redes IPv6), cujo o seu funcionamento será descrito no Capítulo 4. São objectivos comuns de todas as experiências analisar o comportamento do protocolo MLD (nas suas duas versões) em diferentes cenários práticos: (i) adesão de um receptor a uma sessão *multicast*, (ii) abandono de um receptor a uma sessão *multicast*, (iii) coexistência de receptores que suportam versões diferentes do protocolo MLD.

### 3.4.1 Cenário MLD

De forma a analisar o comportamento do protocolo MLD, em particular (i) o processo de eleição de *Querier Router* (QR) de uma rede local servida por mais do que um *router* e (ii) as mensagens MLD trocadas entre os receptores e os *routers*, configurou-se em laboratório a rede apresentada na Figura 19. As estações FBSD\_1 e FBSD\_2 foram configuradas como *router multicast* e para suportar apenas o protocolo MLD nas suas interfaces (*x11* e *vx0*, respectivamente). Nos receptores (Dabase, Aquarius e Bean) é usada a aplicação WBD que executa apenas o protocolo MLD. Os *routers multicast* foram configurados para anunciar a rede 2001:690:2380:7776::/64, possibilitando que os receptores adquiram de forma automática o endereço IPv6 *unicast global* (na Figura 19, são apenas apresentados os 64 bits menos

---

<sup>3</sup> *White Board* – aplicação usada para desenhos e texto. Suporta apenas o protocolo MLD.

<sup>4</sup> *Mcastread* – aplicação usada para receber o conteúdo de um ficheiro ou de informação passada por linha de comandos. Suporta o protocolo MLD e o protocolo MLDv2.

significativos dos endereços adquiridos, que são construídos com base nos endereços MAC segundo a norma EUI-64).

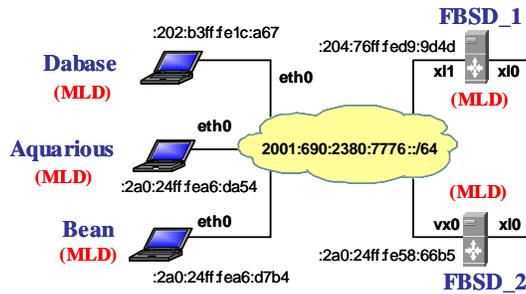


Figura 19 – Cenário MLD

### Configurações:

As opções de configuração do protocolo de encaminhamento *multicast* encontram-se no ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf`. Este ficheiro é comum para as configurações dos protocolos de sinalização e do protocolo de encaminhamento *multicast* PIM SSM (que não é objecto de estudo nesta secção) em redes IPv6. As configurações apresentadas de seguida referem-se ao protocolo de sinalização MLD.

<b>FBSD_1:</b> phyint x11 mld_version 1;	<b>FBSD_2:</b> phyint vx0 mld_version 1;
---	---

### Procedimento experimental:

Inicialmente activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 executando para isso o comando:

```
/usr/local/v6/sbin/pim6sd -c /usr/local/v6/etc/pim6sd.conf
```

A partir deste momento, o *router* FBSD\_1 começa a enviar periodicamente mensagens MLD *General Query* (Figura 20) para verificar quais os grupos *multicast* de interesse na rede local.

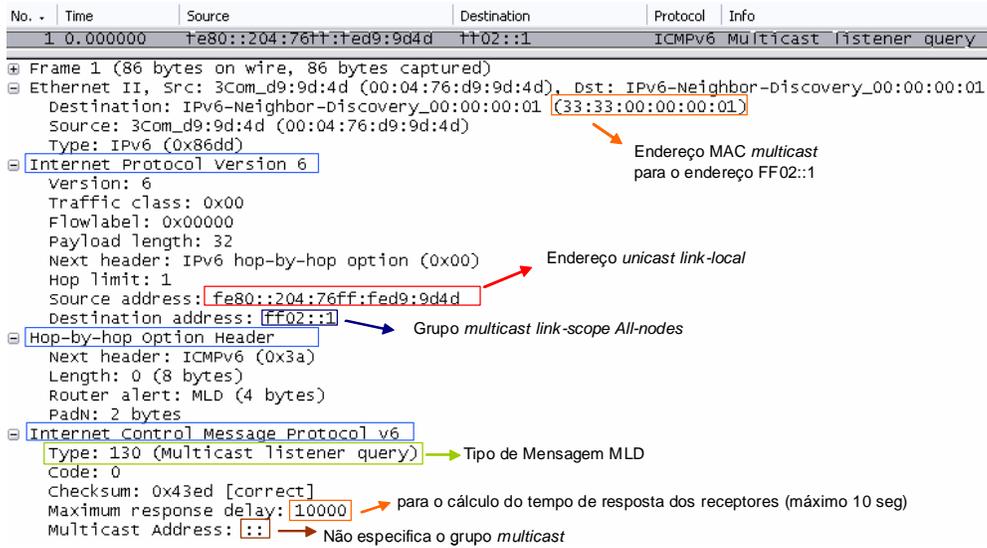


Figura 20 – Mensagem MLD *General Query* enviada pelo router FBSD\_1

Através do comando *pim6stat* pode-se analisar a informação *multicast* do router FBSD\_1:

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/PrefixLen      Scope Flags
1    x11  2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9d4d/64  0    DR  QRY  NO-NBR
      fe80::204:76ff:fed9:9d4d/64          2
Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 2:05
possible MLD version = 1

MLD Querier List
Mif  PhyIF Address                          Timer      Last
1    x11  fe80::204:76ff:fed9:9d4d              255       1m11s

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
  
```

A tabela *Multicast Interface Table* apresenta a informação relativa às interfaces que suportam *multicast*. Neste caso, para a interface *x11*, essa informação é composta pelo número da interface, pelo seu endereço IPv6 *unicast global* (2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9d4d) e pelo seu endereço IPv6 *unicast link-local* (fe80::204:76ff:fed9:9d4d). É também apresentado o intervalo de tempo entre o envio de mensagens MLD *General Query* (2:05 minutos). O campo *Flags* indica que o router FBSD\_1 assume o papel de QR (QRY) nessa interface. Nesta entrada também é indicado qual a versão do protocolo MLD (*possible MLD version*) que está a correr na interface, neste caso o protocolo MLD. Os restantes parâmetros são relativos ao protocolo de encaminhamento *multicast*, não sendo por isso explicados nesta secção.

A tabela *MLD Querier List* apresenta a lista de interfaces onde são enviadas as mensagens *Queries*. Como neste cenário só foi configurada a interface *x11*, só aparece a informação relativa a essa interface, composta pelo número da interface e pelo seu endereço IPv6 *unicast link-local*.

A tabela *Reported MLD Group* apresenta as interfaces das ligações onde existem receptores interessados em participar em determinadas sessões *multicast*. Nesta fase, em resposta às mensagens MLD *General Query* (como se verá mais adiante na Figura 21), as mensagens MLD *Report* têm como endereço destino grupos *multicast* de alcance de ligação local (FF02::/16). Os pacotes de sessões *multicast* para grupos de alcance de ligação local, por definição, não são encaminhados pelos *routers* pelo que não existem entradas nesta tabela.

Depois de activado do protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1, as mensagens MLD *Query* são enviadas de 125 em 125 segundos (2:05 minutos), com excepção das duas primeiras mensagens (Figura 21):

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
2	0.329608	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6 Multicast	listener report
3	0.524833	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener report
4	1.000935	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6 Multicast	listener report
5	2.601159	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6 Multicast	listener report
6	3.329348	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2:7637:a2d	ICMPv6 Multicast	listener report
7	9.128937	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1:ffd9:9d4d	ICMPv6 Multicast	listener report
8	30.247756	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
9	31.528840	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener report
10	32.004918	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6 Multicast	listener report
11	33.528720	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2:7637:a2d	ICMPv6 Multicast	listener report
12	33.926930	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6 Multicast	listener report
13	37.926676	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1:ffd9:9d4d	ICMPv6 Multicast	listener report
14	39.205816	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6 Multicast	listener report
15	155.797666	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

Figura 21 – Periodicidade das mensagens MLD *General Query*

Analisando os pacotes capturados verifica-se que em resposta à mensagem MLD *General Query* são enviadas mensagens MLD *Report* com destino a diferentes grupos *multicast*, todos eles de alcance de ligação local (FF02::/16). Depois de ser activado o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_2, este enviou uma mensagem MLD *General Query* (pacote 44 da Figura 22) assumindo-se como QR da rede local, até verificar através da mensagem MLD *General Query* enviada pelo *router* FBSD\_1 (pacote 48 da Figura 22) que existe outro *router* na rede local com um endereço IPv6 *unicast link-local* menor do que o seu (fe80::204:76ff:fed9:9d4d < fe80::2a0:24ff:fe58:66b5). Assim, o *router* FBSD\_1 continua a ser o QR da rede local.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
36	530.758236	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
37	531.068354	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener report
38	533.687620	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6 Multicast	listener report
39	534.087551	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2:7637:a2d	ICMPv6 Multicast	listener report
40	537.087328	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1:ffd9:9d4d	ICMPv6 Multicast	listener report
41	538.069263	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6 Multicast	listener report
42	538.269285	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6 Multicast	listener report
43	650.283065	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::d	ICMPv6 Multicast	listener report
44	650.283988	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
45	651.883754	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::d	ICMPv6 Multicast	listener report
46	652.483863	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6 Multicast	listener report
47	653.484089	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener report
48	655.313470	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

Figura 22 – Eleição do QR no protocolo MLD

De forma a avaliar o comportamento do protocolo MLD perante uma situação de falha do QR eleito, desligou-se o cabo de rede da interface *x11* do *router* FBSD\_1. Ao fim de 255 segundos, como não circulam na rede local mensagens MLD *General Query*, o *router* FBSD\_2 assumiu o papel de QR enviando uma mensagem MLD *General Query* (pacote 69 da Figura 23).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
62	905.460097	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
63	905.716053	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6	Multicast listener report
64	906.364137	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::2	ICMPv6	Multicast listener report
65	908.058034	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2:7637:a2d	ICMPv6	Multicast listener report
66	909.257937	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6	Multicast listener report
67	911.116719	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6	Multicast listener report
68	911.257781	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1:ffd9:9d4d	ICMPv6	Multicast listener report
69	1160.69870	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
70	1163.14880	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6	Multicast listener report
71	1163.94889	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6	Multicast listener report
72	1164.57532	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::2	ICMPv6	Multicast listener report
73	1169.34958	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::d	ICMPv6	Multicast listener report
74	1228.75306	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6	Multicast listener report
75	1228.75340	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query

Figura 23 – Falha provocada no QR MLD

Na tabela *Multicast Interface Table* do *router* FBSD\_2, a interface *vx0* contém a *flag* QRY, indicando que se trata, nesta fase, do QR da rede local. Ao ligar-se o cabo de rede da interface *x11* do *router* FBSD\_1, este passou a ser novamente o QR rede (pacote 75 da Figura 23).

Mif	PhyIF	Local-Address/PrefixLen	Scope	Flags
0	vx0	2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe58:66b5/64	0	DR QRY NO-NBR
		fe80::2a0:24ff:fe58:66b5/64	2	

Timers: PIM hello = 0:15, MLD query = 1:45  
possible MLD version = 1

De seguida, executou-se a aplicação WBD no receptor Bean para aderir à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773 e verificou-se que foram enviadas duas mensagens *Report* (cujo conteúdo se apresenta na Figura 24) para o endereço destino FF05::ff:773 (grupo *multicast* pretendido).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
123	1730.389920	fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report
124	1737.996918	fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report

Frame 123 (86 bytes on wire, 86 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 3com\_a6:d7:b4 (00:a0:24:a6:d7:b4), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:ff:07:73  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:ff:07:73 (33:33:00:ff:07:73)  
 Source: 3com\_a6:d7:b4 (00:a0:24:a6:d7:b4)  
 Type: IPv6 (0x86dd)

Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 32  
 Next header: IPv6 hop-by-hop option (0x00)  
 Hop limit: 1  
 Source address: fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4  
 Destination address: ff05::ff:773

Hop-by-hop Option Header  
 Next header: ICMPv6 (0x3a)  
 Length: 0 (8 bytes)  
 Router alert: MLD (4 bytes)  
 PadN: 2 bytes

Internet Control Message Protocol v6  
 Type: 131 (Multicast listener report)  
 Code: 0  
 Checksum: 0x7141 [correct]  
 Maximum response delay: 0  
 Multicast Address: ff05::ff:773

Figura 24 – Adesão do receptor Bean à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773

Nesta fase, o *router* FBSD\_1 (QR) apresenta na sua tabela *Reported MLD Group* a seguinte informação:

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1    x11  ff05::ff:773 (#19 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#19     237
```

Na rede local da interface *x11*, existe um receptor (neste caso o Bean) que pretende aderir à sessão *multicast* de dados enviados de qualquer emissor para o grupo (FF05::ff:773). Cada sessão *multicast* tem um tempo de vida associado, neste caso identificado por '#19' e actualizado a 260 segundos (por cada mensagem MLD *Report* recebida com endereço destino para este grupo). Note-se que a tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_2 apresenta para a interface *vx0*, informação semelhante à apresentada para a interface *x11* do *router* FBSD\_1.

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0  ff05::ff:773 (#219 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#219    199
```

Assim, apesar de apenas o *router* FBSD\_1 manter o diálogo com os receptores, o *router* FBSD\_2 também regista as sessões *multicast* com receptores interessados. Nesta fase, para além das mensagens MLD *Report* de alcance de ligação local (FF02::/16) enviadas em resposta à mensagem MLD *General Query*, é também enviada (pelo receptor Bean) a mensagem MLD *Report* para o endereço destino FF05::ff:773 (pacote 132 na Figura 25). O tempo de resposta da mensagem MLD *Report* (neste caso sensivelmente 9 segundos) é menor ou igual ao tempo máximo definido pelo QR (10 segundos na Figura 20).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
125	1810.631447	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
126	1813.803552	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::2	ICMPv6	Multicast listener report
127	1815.231757	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::2:46ab:aa7f	ICMPv6	Multicast listener report
128	1815.388089	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1:ffd9:9d4d	ICMPv6	Multicast listener report
129	1816.986210	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::2:7637:a2d	ICMPv6	Multicast listener report
130	1817.031966	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1:ff58:66b5	ICMPv6	Multicast listener report
131	1817.586171	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::d	ICMPv6	Multicast listener report
132	1819.996034	fe80::2a0:24ff:feaa6:d7b4	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report

Figura 25 – Resposta a uma mensagem MLD *General Query*

De seguida, o receptor Aquarius e o receptor Database executaram a aplicação WBD e aderiram também à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773, enviando duas mensagens MLD *Report*. Nesta fase, quando surge uma mensagem MLD *General Query* enviada pelo *router* FBSD\_1, o receptor (Bean, ou Aquarius ou Database) que tiver o menor tempo de resposta à mensagem MLD *General Query* é o responsável por enviar a mensagem MLD *Report* com

endereço destino o grupo FF05::ff:773, enquanto que os restantes receptores ao verificarem que já foi enviado uma mensagem MLD *Report* para esse grupo *multicast*, não enviam qualquer mensagem MLD *Report*. A Figura 26 ilustra esta situação onde, a resposta à MLD *General Query* (pacote 136) é enviada pelo receptor Bean (pacote 140), enquanto que a resposta à mensagem MLD *General Query* (pacote 144) é enviada pelo receptor Aquarius (pacote 147). As mensagens MLD *Report* foram enviadas com tempos de resposta diferentes, mas com valores inferiores a 10 segundos.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
136	1935.647409	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
140	1939.889377	fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener report
144	2060.607066	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
147	2064.704763	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener report

Figura 26 – Sinalização das sessões *multicast* de interesse

Ao terminar a execução da aplicação WBD, o receptor Aquarius abandonou a sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773. Uma vez que foi o último receptor a enviar a mensagem MLD *Report* (para esse grupo) em resposta à mensagem MLD *General Query*, envia uma mensagem MLD *Done* (cujo o conteúdo é apresentado na Figura 27) com endereço destino FF02::2 (grupo *link-scope All-routers*).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
170	2390.671189	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener done

⊕ Frame 170 (86 bytes on wire, 86 bytes captured)  
 ⊖ Ethernet II, Src: 3com\_a6:da:54 (00:a0:24:a6:da:54), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:02  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:02 (33:33:00:00:00:02)  
 Source: 3com\_a6:da:54 (00:a0:24:a6:da:54)  
 Type: IPv6 (0x86dd)

⊖ Internet Protocol Version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x0000  
 Payload length: 32  
 Next header: IPv6 hop-by-hop option (0x00)  
 Hop limit: 1  
 Source address: fe80::2a0:24ff:fea6:da54  
 Destination address: ff02::2

⊖ Hop-by-hop Option Header  
 Next header: ICMPv6 (0x3a)  
 Length: 0 (8 bytes)  
 Router alert: MLD (4 bytes)  
 PadN: 2 bytes

⊖ Internet Control Message Protocol v6  
 Type: 132 (Multicast listener done)  
 Code: 0  
 Checksum: 0x7614 [correct]  
 Maximum response delay: 0  
 Multicast Address: ff05::ff:773

Endereço MAC *multicast* para o endereço FF02::2  
 Endereço *unicast link-local*  
 Grupo *link-scope All-routers*  
 Tipo de Mensagem MLD  
 Grupo *multicast*

Figura 27 – Abandono da sessão *multicast* por parte do receptor Aquarius

Depois de receber a mensagem MLD *Done*, o router FBSD\_1 (QR) envia uma mensagem MLD *Multicast-Address-Specific Query* (cujo o conteúdo é apresentado no pacote 171 da Figura 28) para o endereço destino FF05::ff:773, com a finalidade de verificar se existem na rede local receptores interessados nessa sessão *multicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
170	2390.671189	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff02::2	ICMPv6 Multicast	listener done
171	2390.671545	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener query
172	2390.708027	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener report

Frame 171 (86 bytes on wire, 86 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 3Com\_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:ff:07:73  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:ff:07:73 (33:33:00:ff:07:73)  
 Source: 3Com\_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d)  
 Type: IPv6 (0x86dd)

Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 32  
 Next header: IPv6 hop-by-hop option (0x00)  
 Hop limit: 1  
 Source address: fe80::204:76ff:fed9:9d4d  
 Destination address: ff05::ff:773

Hop-by-hop Option Header  
 Next header: ICMPv6 (0x3a)  
 Length: 0 (8 bytes)  
 Router alert: MLD (4 bytes)  
 PadN: 2 bytes

Internet Control Message Protocol v6  
 Type: 130 (Multicast listener query)  
 Code: 0  
 Checksum: 0x5729 [correct]  
 Maximum response delay: 1000  
 Multicast Address: ff05::ff:773

Endereço MAC *multicast* para o endereço FF05::ff:773  
 Endereço *unicast link-local*  
 Grupo *multicast*  
 Tipo de Mensagem MLD  
 para o cálculo do tempo de resposta dos receptores (máximo 1 seg)  
 Grupo *multicast*

Figura 28 – Mensagem MLDv2 *Multicast-Address-Specific Query* para o grupo FF05::ff:773

Como nesta fase existem dois receptores (Bean e Database) interessados, o que tiver o menor tempo de resposta (menor ou igual a 1 segundo) é o responsável por enviar a mensagem MLD *Report* com endereço destino FF05::ff:773, sinalizando a rede que existem receptores na rede local interessados nessa sessão *multicast*. Neste caso, o receptor Database enviou a mensagem MLD *Report* (pacote 172 da Figura 28).

Em resposta à mensagem MLD *General Query* seguinte, enviada pelo *router* FBSD\_1, foi o receptor Bean que respondeu com uma mensagem MLD *Report* com endereço destino FF05::ff:773. De seguida, o receptor Database abandonou a sessão *multicast* (terminando a execução da aplicação WBD) e, como não foi o último receptor a enviar a mensagem MLD *Report* para essa sessão, não foi enviada a mensagem MLD *Done*.

Finalmente, o receptor Bean abandonou o grupo *multicast* FF05::ff:773 (terminando a execução da aplicação WBD). Verificou-se que enviou uma mensagem MLD *Done* e, de seguida, o *router* FBSD\_1 enviou duas mensagens MLD *Multicast-Address-Specific Query* para o endereço destino FF05::ff:773. Como não existe mais nenhum receptor na rede local interessado nessa sessão, deixou de existir informação relativa a essa sessão *multicast* na entrada *Reported MLD Group* dos *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2.

### Conclusões:

No cenário em que numa rede local se encontra mais do que um *router multicast* activo, o *router* com menor endereço IPv6 *unicast link-local* assume o papel de *Querier Router* dessa rede. Quando o *Querier Router* falha, a inexistência de mensagens *General Query* durante o tempo de vida associado a estas mensagens faz com que o próximo *router* com menor endereço IPv6 *unicast link-local* se assuma como QR, garantindo assim desta forma a continuidade do funcionamento do protocolo de sinalização. No entanto, se um novo *router* com menor endereço IPv6 *unicast link-local* que o QR actual é activado na rede, este novo *router* assume sempre o papel de QR.

Sempre que um receptor pretende aderir a uma sessão *multicast*, usa mensagens MLD *Report* para manifestar essa pretensão. Relativamente ao abandono de uma sessão *multicast* por parte de um receptor, é enviada uma mensagem MLD *Done*, se ele tiver sido quem respondeu à última mensagem MLD *General Query*, pois caso contrário, ele sabe que existe outro receptor interessado pelo que assume ser desnecessário o envio da mensagem MLD *Done*.

Em resposta a mensagens *General Query*, cada receptor envia uma mensagem *Report* por cada grupo *multicast* de interesse, mesmo para os grupos de alcance local. Sob o ponto de vista do encaminhamento IP *multicast*, a resposta para grupos *multicast* de alcance local não é justificável já que os *routers multicast* não encaminham endereços IPv6 *multicast* de alcance local e nessa perspectiva, tratam-se de respostas sem qualquer tipo de efeito. Contudo, este comportamento é justificável quando se consideram protocolos de encaminhamento *multicast* de camada 2 (MLD *Snooping*), uma vez que desta forma os *switches* sabem para que portas devem encaminhar os dados destinados a um determinado grupo *multicast* de alcance de ligação local, evitando assim enviar os pacotes de dados para todas as suas portas.

### **3.4.2 Cenário MLDv2**

De forma a analisar o comportamento do protocolo MLDv2, em particular (i) o processo de eleição de *Querier Router* (QR) de uma ligação servida por mais do que um *router* e (ii) as mensagens MLDv2 trocadas entre os receptores e os *routers*, configurou-se em laboratório a rede apresentada na Figura 29. Os *routers multicast* (FBSD\_1 e FBSD\_2) são configurados para executar apenas o protocolo MLDv2 nas suas interfaces e nos receptores (Pluton, FBSD\_3 e FBSD\_4) é usada a aplicação *mcastread*.

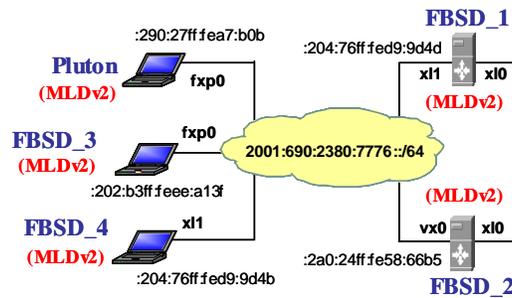


Figura 29 – Cenário MLDv2

Configurações:

As configurações efectuadas nesta experiência são semelhantes às realizadas na experiência anterior (secção 3.4.1), com a diferença de que para esta experiência as interfaces dos *routers* são configuradas para suportar o protocolo MLDv2.

<b>FBSD_1:</b> <pre>phyint xl1 mld_version 2;</pre>	<b>FBSD_2:</b> <pre>phyint vx0 mld_version 2;</pre>
--	--

Procedimento experimental:

Depois de activar o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 e à semelhança do que acontece com o protocolo MLD, verifica-se que o *router* FBSD\_1 envia periodicamente mensagens MLDv2 *General Query* (cujo o conteúdo é apresentado na Figura 30) para verificar quais as sessões *multicast* de interesse na rede local.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

+ Frame 1 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)  
 - Ethernet II, Src: 3Com\_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:01 (33:33:00:00:00:01)  
   source: 3Com\_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d)  
   Type: IPv6 (0x86dd)  
 - Internet Protocol Version 6  
   Version: 6  
   Traffic class: 0x00  
   Flowlabel: 0x00000  
   Payload length: 36  
   Next header: IPv6 hop-by-hop option (0x00)  
   Hop limit: 1  
   Source address: fe80::204:76ff:fed9:9d4d  
   Destination address: ff02::1  
 - Hop-by-hop Option Header  
   Next header: ICMPv6 (0x3a)  
   Length: 0 (8 bytes)  
   Router alert: MLD (4 bytes)  
   Padn: 2 bytes  
 - Internet Control Message Protocol v6  
   Type: 130 (Multicast listener query)  
   Code: 0  
   Checksum: 0x416c [correct]  
   Maximum response delay[ms]: 10000  
   Multicast Address: ::  
   S Flag: OFF  
   Robustness: 2  
   QQI: 125

Anotações de interpretação:  
 - Endereço MAC *multicast* para o endereço FF02::1 (destino da linha de destino)  
 - Endereço unicast link-local (endereço de origem)  
 - Grupo *multicast* link-scope All-nodes (destino da linha de destino)  
 - Tipo de Mensagem MLD (Tipo: 130)  
 - para o cálculo do tempo de resposta dos receptores (máximo 10 seg) (Maximum response delay)  
 - Não especifica o grupo *multicast* (Multicast Address: ::)  
 - Intervalo de tempo entre mensagens MLDv2 *General Query* (QQI: 125)

Figura 30 – Mensagem MLDv2 *General Query* enviada pelo *router* FBSD\_1

Através do comando *pim6stat* pode-se analisar a informação *multicast* do *router* FBSD\_1.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen      Scope Flags
1    x11  2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9d4d/64  0    DR  QRY  NO-NBR
      fe80::204:76ff:fed9:9d4d/64          2
      Timers: PIM hello = 0:15, MLD query = 1:20
      possible MLD version = 2

MLD Querier List
Mif  PhyIF Address          Timer      Last
1    x11  fe80::204:76ff:fed9:9d4d  255       1m17s

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group=Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat=Timer))/Source(TimerID)

```

O significado da informação é igual ao explicado na experiência anterior. Neste caso, o campo *possible MLD version* apresenta o valor ‘2’ indicando que a interface *x11* se encontra configurada para suportar o protocolo MLDv2.

Depois de activar o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1, as mensagens MLDv2 *General Query* (pacotes 1, 7 e 13 na Figura 31) são enviadas de 125 em 125 segundos (2:05 minutos), com a excepção das duas primeiras mensagens.

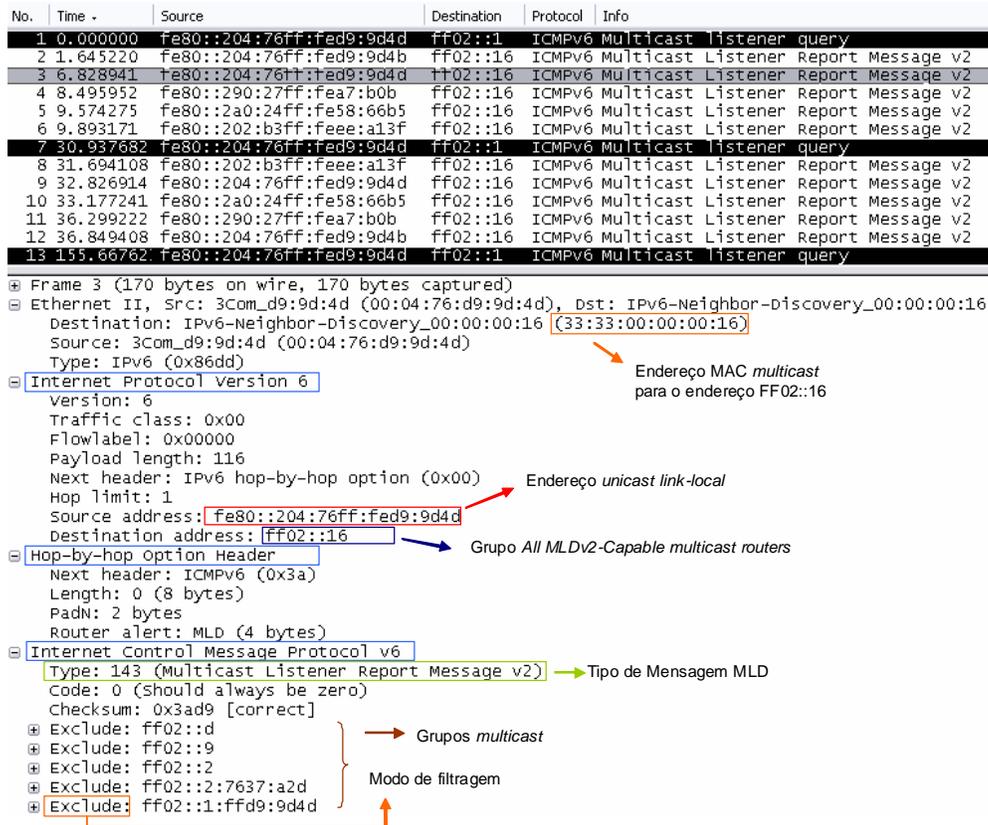


Figura 31 – Mensagens MLDv2 *General Query* e mensagens MLDv2 *Report*

Em resposta às mensagens MLDv2 *General Query* todas as estações da rede local enviam uma única mensagem MLDv2 *Report* (cujo conteúdo é ilustrado no pacote 3 da Figura 31) com endereço destino FF02::16, contendo a informação de todos os grupos que identificam as sessões *multicast* de interesse e o modo de filtragem associado cada grupo. Nesta fase, os grupos *multicast* reportados são de alcance de ligação local FF02::/16 (razão pela qual não aparece qualquer entrada na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1).

Ao ser activado o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_2, este enviou uma mensagem MLDv2 *General Query* (pacote 20 da Figura 32) assumindo-se como QR da rede local, até verificar através da mensagem MLDv2 *General Query* enviada pelo *router* FBSD\_1 (pacote 26 da Figura 32), que existe outro *router* na rede com um endereço IPv6 *unicast link-local* menor do que o seu (fe80::204:76ff:fed9:9d4d < fe80::2a0:24ff:fe58:66b5), à semelhança do que acontece para o protocolo MLD. Assim, o *router* FBSD\_1 continua a ser o QR da rede local.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
13	155.66762	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
14	158.89973	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
15	158.99333	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
16	160.81693	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
17	160.91384	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
18	164.46590	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
19	206.87474	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
20	206.87546	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
21	210.01309	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
22	212.11981	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
23	212.40020	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
24	213.27020	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
25	215.90224	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
26	240.95397	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

Figura 32 – Eleição do QR no protocolo MLDv2

De forma a avaliar o comportamento do protocolo MLDv2 perante uma situação de falha do QR eleito, desligou-se o cabo de rede da interface *x/1* do FBSD\_1. Neste caso, ao fim de 251 segundos, como não circulam na rede local mensagens MLDv2 *General Query*, o *router* FBSD\_2 assume o papel de QR enviando uma mensagem MLDv2 *General Query* (pacote 50 da Figura 33).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
44	530.11810	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
45	530.71606	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
46	532.58790	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
47	532.90792	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
48	533.44115	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
49	535.15763	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
50	781.05284	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
51	782.93741	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
52	786.27343	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
53	786.98710	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
54	790.52752	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
55	856.56212	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
56	856.56237	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

Figura 33 – Falha provocada no QR MLDv2

Na tabela *Multicast Interface Table* do *router* FBSD\_2, a interface *vx0* contém a *flag* QRY indicando que se trata do QR da rede local.

Multicast Interface Table					
Mif	PhyIF	Local-Address/Prefixlen	Scope	Flags	
0	vx0	2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe58:66b5/64	0	DR	QRY NO-NBR
		fe80::2a0:24ff:fe58:66b5/64	2		
Timers: PIM hello = 0:05, MLD query = 1:40					
possible MLD version = 2					

Ao ligar-se o cabo de rede da interface *x11* do FBSD\_1, este *router* passou a ser novamente o QR rede (pacote 56 da Figura 33).

Ao ser executada a aplicação *mcastread* no receptor Pluton para a sessão *multicast* FF05::ff:773 sem especificar qualquer emissor, verificou-se que é enviada uma mensagem MLDv2 *Report* (cujo o conteúdo é apresentado na Figura 34) para o endereço destino FF02::16, que contém apenas o grupo *multicast* pretendido (FF05::ff:773) e o modo de filtragem associado a este grupo.

The screenshot displays a network packet capture analysis. Key components and annotations include:

- Packet Header:** No. 92, Time 1294.4417, Source fe80::290:27ff:fea7:b0b, Destination ff02::16, Protocol ICMPv6, Info Multicast Listener Report Message v2.
- Ethernet II:** Src: Intel\_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:16 (33:33:00:00:00:16). An annotation points to the destination MAC as "Endereço MAC multicast para o endereço FF02::16".
- Internet Protocol version 6:** Version 6, Traffic class 0x00, Flowlabel 0x000000, Payload length 36, Next header IPv6 hop-by-hop option (0x00), Hop limit 1, Source address fe80::290:27ff:fea7:b0b, Destination address ff02::16. An annotation points to the source address as "Endereço unicast link-local".
- Hop-by-hop Option Header:** Next header ICMPv6 (0x3a), Length 0 (8 bytes), PadN 2 bytes, Router alert MLD (4 bytes).
- Internet Control Message Protocol v6:** Type 143 (Multicast Listener Report Message v2), Code 0 (Should always be zero), Checksum 0x3354 [correct]. An annotation points to the type field as "Tipo de mensagem MLD".
- MLD Details:** Changed to exclude: ff05::ff:773. Mode: Changed to exclude. Aux data len: 0. Multicast Address: ff05::ff:773. Annotations point to the mode as "Modo de filtragem" and the address as "Grupo multicast".

Figura 34 – Adesão do receptor Pluton à sessão *multicast* do grupo FF05:ff:773

O modo de filtragem do receptor (por omissão a INCLUDE) é alterado para CHANGE\_TO\_EXCLUDE (com a lista de emissores vazia), informando o QR que a partir deste momento este receptor pretende receber os dados enviados por qualquer emissor para este grupo. Nesta fase, o *router* FBSD\_1 (QR) apresenta na sua tabela *Reported MLD Group* a seguinte informação:

Reported MLD Group			
Mif	PhyIF	Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)	
1	x11	ff05::ff:773 (#38 (v2 EX #0))	
		(any source) (-)	
-----CallOut Timer Queue-----			
TimerID	Expiry-Time[s]		
#38	251		

Na rede local da interface *x/1*, existe um receptor (neste caso o Pluton) que pretende aderir à sessão *multicast* de dados enviados por qualquer emissor para o grupo FF05::ff:773. Cada sessão *multicast* tem um tempo de vida associado, neste caso identificado por '#38 e actualizado a 260 segundos (por cada mensagem MLDv2 *Report* contendo no *Record Type* informação deste grupo). Note-se que a tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_2 apresenta para a interface *vx0*, informação semelhante à apresentada para a interface *x/1* do *router* FBSD\_1.

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0 ff05::ff:773 (#10 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#10     231
```

Assim, tal como no protocolo MLD, apesar de apenas o *router* FBSD\_1 manter o diálogo com os receptores, o *router* FBSD\_2 também regista as sessões *multicast* com receptores interessados, garantindo a continuidade do funcionamento do protocolo no caso de falha do FBSD\_1 (QR). Nesta fase, a mensagem MLDv2 *Report* (pacote 100 da Figura 35) enviada pelo receptor Pluton em resposta à mensagem MLDv2 *General Query* (pacote 98 da Figura 35), inclui para além dos grupos de alcance de ligação local (FF02::/16), também o grupo FF05::ff:773. O modo de filtragem de todos os grupos é EXCLUDE (e a lista de emissores vazia), uma vez que pretende receber dados enviados por qualquer emissor para os grupos *multicast* pretendidos. O tempo de resposta da mensagem MLDv2 *Report* (neste caso sensivelmente 7 segundos) é menor do que tempo máximo definido pelo QR (10 segundos na Figura 30).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
98	1341.8173	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
99	1346.9518	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
100	1348.8527	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
101	1349.9238	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
102	1350.0042	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
103	1350.1451	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
104	1371.9828	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query

[+] Frame 100 (130 bytes on wire, 130 bytes captured)  
 [+] Ethernet II, Src: Intel\_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:16  
 [+] Internet Protocol Version 6  
 [+] Hop-by-hop Option Header  
 [+] Internet Control Message Protocol v6  
   Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2)  
   Code: 0 (Should always be zero)  
   Checksum: 0x9099 [correct]  
   Excl: ff05::ff:773 → Novo grupo multicast  
   Excl: ff02::2:d1a0:c633  
   Excl: ff02::1:ffa7:b0b

Figura 35 – Mensagens MLDv2 *General Query* e mensagens MLDv2 *Report*

De seguida, os receptores FBSD\_3 e FBSD\_4 executaram a aplicação *mcastread* e aderiram também à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773 (para qualquer emissor), enviando cada um

uma mensagem MLDv2 *Report*. Nesta fase (Figura 36), quando surge uma mensagem MLDv2 *General Query* enviada pelo *router* FBSD\_1 (pacote 136), cada receptor (FBSD\_4, Pluton e FBSD\_3) responde com uma mensagem MLDv2 *Report* (pacotes 137, 139 e 142, respectivamente) contendo, para além dos grupos *multicast* de alcance de ligação local, o grupo FF05::ff:773 com o modo de filtragem a EXCLUDE. Todas as mensagens MLDv2 *Report* foram enviadas com tempo de resposta diferentes, mas com valores inferiores a 10 segundos.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
136	1747.1068	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
137	1751.2153	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
139	1754.7001	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
142	1756.7697	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2

Figura 36 – Respostas à mensagem MLDv2 *General Query*

Ao terminar a execução da aplicação *mcastread*, o receptor FBSD\_4 abandonou a sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773, enviando duas mensagens MLDv2 *Report* (cujo o conteúdo é ilustrado na Figura 37) contendo o grupo FF05::ff:773 com o modo de filtragem a CHANGE\_TO\_INCLUDE (com a lista de emissores vazia).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
169	1968.843	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2
170	1968.843	fe80::204:76ff:fed9:9d4b	ff02::16	ICMPv6 Multicast	Listener Report Message v2

```

+ Frame 169 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)
+ Ethernet II, Src: 3Com_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:16
+ Internet Protocol Version 6
+ Hop-by-hop Option Header
- Internet Control Message Protocol v6
  Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2)
  Code: 0 (Should always be zero)
  Checksum: 0x536d [correct]
- Changed to include: ff05::ff:773 → Modo de filtragem
  Mode: changed to include
  Aux data len: 0
  Multicast Address: ff05::ff:773
    
```

Figura 37 – Abandono da sessão *multicast* por parte do receptor FBSD\_4

Ao receber a mensagem MLDv2 *Report* com a alteração do modo de filtragem para o grupo FF05::ff:773, o *router* FBSD\_1 (QR) envia duas mensagens *Multicast-Address-Specific Query* (cujo o conteúdo é ilustrado na Figura 38) com endereço destino FF05::ff:773, para verificar se continuam a existir receptores interessados nessa sessão *multicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
171	1968.844	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener query
172	1969.845	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener query

```

+ Frame 171 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)
- Ethernet II, Src: 3Com_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:ff:07:73
  Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:ff:07:73 (33:33:00:ff:07:73)
  Source: 3Com_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d)
  Type: IPv6 (0x86dd) → Endereço MAC multicast para o endereço FF05::ff:773
+ Internet Protocol Version 6
+ Hop-by-hop Option Header
- Internet Control Message Protocol v6
  Type: 130 (Multicast listener query)
  Code: 0
  Checksum: 0x3180 [correct]
  Maximum response delay[ms]: 10000 → para o cálculo do tempo de resposta dos receptores (máximo 10 seg)
  Multicast Address: ff05::ff:773 → Grupo multicast
  S Flag: OFF
  Robustness: 2
  QQI: 125
    
```

Figura 38 – Mensagem MLDv2 *Multicast-Address-Specific Query* (grupo FF05::ff:773)

Como ainda existem dois receptores (Pluton e FBSD\_3) interessados na sessão *multicast*, ambos respondem com uma mensagem MLDv2 *Report* contendo apenas o grupo FF05::ff:773 e o modo de filtragem a EXCLUDE (Figura 39).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
173	1971.779	fe80::202:b311:eee:a13f	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
174	1976.525	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2

+ Frame 173 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)  
 + Ethernet II, Src: Intel\_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:16  
 + Internet Protocol Version 6  
 + Hop-by-hop Option Header  
 + Internet Control Message Protocol v6  
   Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2)  
   Code: 0 (Should always be zero)  
   Checksum: 0x1366 [correct]  
   + Exclude: ff05::ff:773      Modo de filtragem

Figura 39 – MLDv2 *Report* (Pluton) à mensagem MLDv2 *Multicast-Address-Specific Query*

Finalmente, os receptores FBSD\_3 e Pluton abandonaram a sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773 (terminado a execução da aplicação *mcastread*). Nesta fase, como nenhum receptor responde às duas mensagens MLDv2 *Multicast-Address-Specific Query* enviadas pelo router FBSD\_1, a entrada relativa ao grupo *multicast* FF05::ff:773 é apagada da tabela *Reported MLD Group* dos routers FBSD\_1 e FBSD\_2.

#### Conclusões:

Em cenários onde numa rede local se encontram mais do que um *router multicast* activo, o processo que garante que em todo o momento um dos *routers* é o *Querier Router* é idêntico ao verificado na experiência anterior.

A estrutura do protocolo MLDv2, permite reduzir o número de mensagens *Report* enviadas pelos receptores da rede local em resposta a mensagens *General Query*, quando comparado com o número de mensagens *Report* no protocolo MLD, já que cada receptor envia apenas uma única mensagem MLDv2 *Report* com endereço destino FF02::16, contendo todos grupos *multicast* de interesse (incluindo os grupos de alcance de ligação local e os grupos comuns a outros receptores) e a lista de emissores.

O processo de adesão de um receptor a uma sessão *multicast* consiste no envio de mensagens MLDv2 *Report* (contendo apenas o grupo pretendido e a lista de emissores) para manifestar essa pretensão. Este processo é idêntico ao processo de adesão do protocolo MLD. Relativamente ao abandono de uma sessão *multicast*, o processo é ligeiramente diferente do usado no protocolo MLD, uma vez que os modos de filtragem permitem que o receptor manifeste interesse em abandonar uma dada sessão *multicast* através de mensagens MLDv2 *Report* e, por isso, sem necessidade de recorrer a uma mensagem específica de *Done*.

O protocolo MLDv2 permite aos receptores especificar (ou não) a lista de emissores dos quais pretendem receber dados para um determinado grupo *multicast*. Nesta experiência, estudou-se apenas o comportamento do protocolo na situação em que os receptores não especificam a lista de emissores, podendo receber os dados enviados por qualquer emissor. O comportamento do protocolo MLDv2 no cenário em que os receptores especificam a lista de emissores é ilustrado no Capítulo 4 (secção 4.6.4), nas experiências do protocolo de encaminhamento *multicast* que implementa o modelo SSM.

### 3.4.3 Cenários MLD e MLDv2

Devido ao recente aparecimento do protocolo MLDv2 é expectável que existam cenários onde numa rede local coexistam o protocolo MLD e o protocolo MLDv2. Nesta secção, são considerados três cenários configurados em laboratório que ilustram a coexistência entre os dois protocolos.

#### 3.4.3.1 Cenário 1

O objectivo deste cenário é analisar o comportamento dos protocolos quando um receptor que suporta o protocolo MLDv2, é inserido numa rede local onde os receptores e os *routers multicast* suportam apenas o protocolo MLD. A Figura 40 apresenta a rede configurada em laboratório. As configurações efectuadas nos *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2 são as descritas anteriormente na secção 3.4.1.

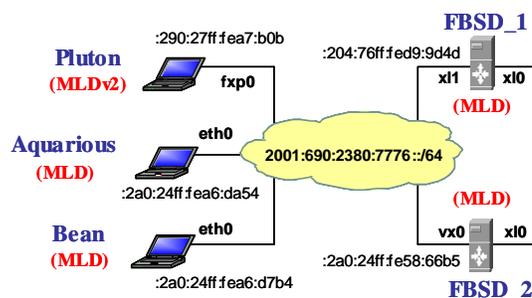


Figura 40 – Receptores MLD, Receptor MLDv2 e Routers MLD

#### Procedimento experimental:

Inicialmente activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 e no *router* FBSD\_2. De seguida, executou-se a aplicação WBD nos receptores Aquarius e Bean para

aderiram à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773. Nesta fase, os *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2 têm uma entrada relativa ao grupo FF05::ff:773 na sua tabela *Reported MLD Group*.

#### FBSD\_1

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1    xll ff05::ff:773 (#47 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#47     214
```

#### FBSD\_2

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0 ff05::ff:773 (#11 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#11     214
```

Ao executar-se a aplicação *mcastread* no receptor Pluton, este manifestou interesse em aderir à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:772 para qualquer emissor, enviando para isso uma mensagem MLDv2 *Report* com endereço destino FF02::16. Nesta fase, verificou-se que não foi adicionada qualquer entrada na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1 e do *router* FBSD\_2, mantendo-se apenas a entrada relativa ao grupo FF05::ff:773. A partir do momento (Figura 41) em que o receptor Pluton verificou que na rede circulam mensagens MLD *General Query* (pacote 58), passou a responder com uma mensagem MLD *Report* (pacotes 66 e 71) com endereço destino FF05::ff:772, significando que a aplicação se adaptou ao protocolo MLD.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
58	530.89970	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
61	533.44241	fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener report
66	539.53034	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:772	ICMPv6 Multicast	listener report
68	655.88987	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6 Multicast	listener query
71	657.34406	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:772	ICMPv6 Multicast	listener report
72	657.91386	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:773	ICMPv6 Multicast	listener report

Figura 41 – Actualização da variável de compatibilidade por parte do receptor Pluton

Nesta fase, verificou-se que foi adicionada uma nova entrada na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1 e do *router* FBSD\_2, relativa ao grupo FF05::ff:772.

#### FBSD\_1

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1    xll ff05::ff:772 (#116 (v1 EX #0))
      (any source) (-)
1    xll ff05::ff:773 (#114 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#114    183
#116    6
```

**FBSD\_2**

```

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0 ff05::ff:772 (#107 (v1 EX #0))
      (any source) (-)
0    vx0 ff05::ff:773 (#105 (v1 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#105    178
#107    6
    
```

De seguida, o receptor Pluton abandonou a sessão *multicast* e verificou-se que não foi enviada qualquer mensagem MLD *Done*, ao contrário do que seria esperado. Tal comportamento poderá dever-se à aplicação usada. Nesta situação, uma vez expirado o tempo de vida associado ao grupo FF05::ff:772, já que não é renovado por mensagens MLD *Report* (porque neste cenário existia apenas um receptor interessado nesse grupo), a entrada na tabela *Reported MLD Group* relativa ao grupo FF02::ff:773 foi eliminada.

Conclusões:

Em cenários em que os *routers* de uma rede local suportam apenas o protocolo MLD é possível introduzir um receptor MLDv2. A existência de mensagens MLD *Query*, periodicamente enviadas pelo QR, permite ao receptor MLDv2 verificar que a rede suporta apenas o protocolo MLD e alterar o protocolo de sinalização para esta versão. Note-se, no entanto, que neste caso a rede nunca lhe poderá permitir aderir a sessões *multicast* SSM.

**3.4.3.2 Cenário 2**

O objectivo deste cenário é analisar o comportamento dos protocolos quando um receptor MLD é inserido numa rede local com receptores MLDv2 e com *routers multicast* que suportam apenas o protocolo MLDv2 (o modo de compatibilidade não foi activado nos *routers*). A Figura 42 apresenta a rede configurada em laboratório. As configurações efectuadas nos *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2 são as explicadas anteriormente na secção 3.4.2.

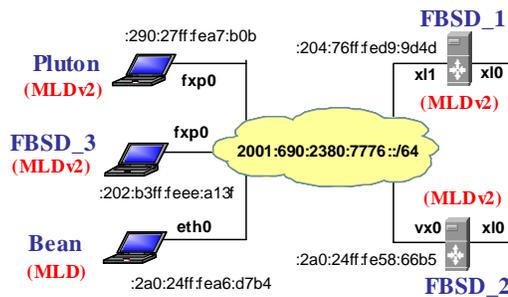


Figura 42 – Receptores MLDv2, Receptor MLD e Routers MLDv2

Procedimento experimental:

Inicialmente activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 e no *router* FBSD\_2. De seguida, executou-se a aplicação *macstread* nos receptores FBSD\_3 e Pluton para aderiram à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773 de qualquer emissor. Nesta fase, os *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2 têm uma entrada relativa ao grupo FF05::ff:773 na sua tabela *Reported MLD Group*.

**FBSD\_1**

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1    x11  ff05::ff:773 (#6 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#6      251
```

**FBSD\_2**

```
Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0  ff05::ff:773 (#9 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#9      259
```

Ao executar-se a aplicação WBD no receptor Bean, este manifestou interesse em aderir à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:772 através do envio de uma mensagem *MLD Report* com endereço destino FF05::ff:772. Verificou-se que não foi adicionada qualquer entrada na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1 e do *router* FBSD\_2, mantendo-se apenas a entrada relativa ao grupo FF05::ff:773.

Nesta fase (Figura 43), em resposta à mensagem *MLDv2 General Query* (pacote 65) surgem mensagens *MLDv2 Report* enviadas pelos receptores Pluton (pacote 66) e FBSD\_3 (pacote 68). Note-se que o receptor Bean também responde com uma mensagem *MLD Report* (pacote 69). Este facto explica-se porque os primeiros campos das mensagens *MLDv2 General Query* mantêm a mesma estrutura dos campos das mensagens *MLD Query*. No entanto, tal como anteriormente, a sessão de interesse do Bean não foi considerada pelos *routers*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
65	459.84014	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast Listener query
66	462.86461	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
68	465.89627	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
69	467.42016	fe80::2a0:24ff:7ea6:d7b4	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast Listener report

Figura 43 – Mensagens *MLDv2 Report* e *MLD Report*

O passo seguinte da experiência consistiu, em voltar à fase inicial da experiência (onde não existem receptores nem *routers multicast* activos) e configuraram-se os *routers* FBSD\_1 e

FBSD\_2 para operarem no modo de compatibilidade MLD e MLDv2. Para isso, foi necessário alterar no ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf` o modo de operação das interfaces:

<b>FBSD_1:</b> phyint x11 mld version <b>any</b> ;	<b>FBSD_2:</b> phyint vx0 mld version <b>any</b> ;
---	---

Depois de se activar o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 e no *router* FBSD\_2, os receptores FBSD\_3 e Pluton a executaram aplicação *mcastread* (sem especificar os emissores) e aderiram à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773. Nesta fase, a tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1 tem uma entrada para esse grupo *multicast* e verifica-se na tabela *Multicast Interface Table* que a interface *x11* suporta o protocolo MLD e o protocolo MLDv2.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen          Scope Flags
  1    x11 2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9d4d/64  0  PIM QRY
      fe80::204:76ff:fed9:9d4d/64          2
      Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 2:00
      possible MLD version = 1 2

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
  1    x11 ff05::ff:773 (#26 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

```

Note-se que a tabela *Reported MLD Group* e a tabela *Multicast Interface Table* do *router* FBSD\_2, apresenta para a interface *vx0* informação semelhante à apresentada para a interface *x11* do *router* FBSD\_1.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen          Scope Flags
  0    vx0 2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe58:66b5/64  0  DR PIM
      fe80::2a0:24ff:fe58:66b5/64          2
      Timers: PIM hello = 0:25, MLD query = 0:05
      possible MLD version = 1 2

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
  0    vx0 ff05::ff:773 (#26 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

```

Ao executar-se a aplicação WBD no receptor Bean, este aderiu à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:772 através do envio de uma mensagem MLD *Report* com endereço destino FF05::ff:772. Verificou-se que foi adicionada uma nova entrada na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1 e do *router* FBSD\_2.

#### FBSD\_1

```

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
  1    x11 ff05::ff:772 (#52 (v1 EX #53))
      (any source) (-)
  1    x11 ff05::ff:773 (#42 (v2 EX #0))
      (any source) (-)

-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#42      198
#52      36

```

**FBSD\_2**

```

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    vx0 ff05::ff:772 (#52 (v1 EX #53))
      (any source) (-)
0    vx0 ff05::ff:773 (#42 (v2 EX #0))
      (any source) (-)
-----CallOut Timer Queue-----
TimerID Expiry-Time[s]
#42     188
#52     36

```

Finalmente (Figura 44), o receptor Bean abandonou a sessão *multicast* (terminado a execução da aplicação WBD) e enviou uma mensagem MLD *Done* (pacote 79), à qual se seguiram duas mensagens MLDv2 *Multicast-Address-Specific Query* (pacotes 80 e 81) enviadas pelo *router* FBSD\_1 para verificar se continuam a existir mais receptores na rede local interessados na sessão *multicast* desse grupo. Como não existem mais receptores interessados, foi eliminada da tabela *Reported MLD Group* a entrada relativa ao grupo FF05::ff:772.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
79	628.848171	fe80::2a0:2411:fea6:d7b4	ff02::2	ICMPv6	Multicast listener done
80	628.848531	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener query
81	629.857101	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener query

Figura 44 – Abandono da sessão *multicast* do grupo FF05::ff:772 (receptor Bean)

**Conclusões:**

Em cenários em que uma rede local suporte o protocolo MLDv2 é possível introduzir um receptor que suporte apenas o protocolo MLD, desde que se garanta administrativamente que os *routers multicast* activos na rede operem no modo de compatibilidade para o protocolo MLD e para o protocolo MLDv2. Os *routers multicast* configurados para operarem em modo de compatibilidade enviam mensagens MLDv2 para verificar quais as sessões *multicast* de interesse na rede local. Os receptores MLD conseguem responder a mensagens MLDv2 *Query*, uma vez que os campos das MLD *Query* são mantidos nas mensagens MLDv2 *Query* (Figura 14 e Figura 16). Desta forma, registam nas suas tabelas *multicast* os grupos *multicast* aprendidos por MLD e por MLDv2, garantindo as sessões *multicast* dos modelos ASM e SSM.

Note-se que na experiência realizada, o grupo da sessão *multicast* do receptor MLD foi diferente do grupo da outra sessão. Se ambos os receptores usassem o mesmo grupo *multicast*, apenas responde às mensagens MLDv2 *Query* o receptor que tiver o menor tempo de resposta, pelo facto das mensagens MLDv2 *Report* manterem os campos das mensagens MLD *Report* (Figura 14 e Figura 18).

### 3.4.3.3 Cenário 3

O objectivo deste cenário é analisar o comportamento dos protocolos quando numa rede local existem vários receptores que suportam diferentes versões do protocolo de sinalização (MLD e MLDv2), *routers multicast* que suportam apenas MLD e *routers multicast* que suportam MLDv2 (com e sem o modo de compatibilidade configurado). A Figura 45 apresenta a rede configurada em laboratório. A configuração efectuada no *router* FBSD\_1 é a descrita na secção 3.4.2 e a configuração do FBSD\_2 é a descrita na secção 3.4.1.

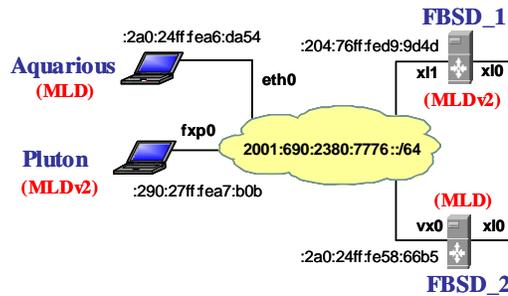


Figura 45 – Receptores MLD e MLDv2 e Routers MLD e MLDv2

#### Procedimento experimental:

Ao activar-se o protocolo de encaminhamento *multicast* nos *routers* FBSD\_1 e FBSD\_2, verificou-se (Figura 46) o envio periódico de mensagens MLDv2 *General Query* (pacotes 1,5 e 32) por parte do *router* FBSD\_1 e o envio periódico de mensagens MLD *General Query* (pacotes 10, 22 e 41) por parte do *router* FBSD\_2.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
5	30.189753	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
10	54.636058	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
22	85.610851	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
32	155.66909	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
⊕ Frame 32 (90 bytes on wire, 90 bytes captured) ⊕ Ethernet II, Src: 3Com_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:01 ⊕ Internet Protocol version 6 ⊕ Hop-by-hop Option Header ⊕ Internet Control Message Protocol v6 Type: 130 (Multicast listener query) Code: 0 Checksum: 0x416c [correct] Maximum response delay[ms]: 10000 Multicast Address: :: S Flag: OFF Robustness: 2 QQI: 125 } <b>MLDv2 General Query</b>					
41	210.20495	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
⊕ Frame 41 (86 bytes on wire, 86 bytes captured) ⊕ Ethernet II, Src: 3com_58:66:b5 (00:a0:24:58:66:b5), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:01 ⊕ Internet Protocol version 6 ⊕ Hop-by-hop Option Header ⊕ Internet Control Message Protocol v6 Type: 130 (Multicast listener query) Code: 0 Checksum: 0xcc6a [correct] Maximum response delay: 10000 Multicast Address: :: } <b>MLD General Query</b>					

Figura 46 – MLDv2 *General Query* (FBSD\_1) e MLD *General Query* (FBSD\_2)

Ao executar no receptor Aquarius a aplicação WBD para o grupo FF05::ff:772, este aderiu à sessão *multicast* desse grupo, enviando duas mensagens MLD *Report* com endereço destino FF05::ff:772 (Figura 47).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
47	254.26764	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener report
48	254.27579	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener report

Figura 47 – Adesão do receptor Aquarius à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:772

Nesta fase, só foi incluída apenas na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_2 uma entrada relativa a esse grupo, uma vez que o *router* FBSD\_1 não foi configurado para operar no modo de compatibilidade, não processando por isso mensagens MLD *Report* (como foi verificado no cenário 2).

De seguida, executou-se no receptor Pluton a aplicação *mcastread* para o grupo FF05::ff:773 sem especificar a lista de emissores e o receptor aderiu à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773, enviando duas mensagens MLD *Report* (Figura 48) com endereço destino FF05::ff:773, uma vez que a sua variável de compatibilidade já foi actualizada para operar no estado MLD.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
63	366.71153	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report
64	369.84750	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report

Figura 48 – Adesão do receptor Pluton à sessão *multicast* do grupo FF05::ff:773

Nesta fase, foi incluída apenas na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_2 uma entrada relativa a esse grupo.

#### FBSD\_2

Reported MLD Group					
Mif	PhyIF	Group	Timer	MLD-ver	(Filter-Mode, Compat-Timer) / Source (TimerID)
0	vx0	ff05::ff:773	(#118	(v1	EX #0))
		(any source)	(-)		
0	vx0	ff05::ff:772	(#120	(v1	EX #0))
		(any source)	(-)		

Uma vez actualizada a sua variável de compatibilidade para operar no estado MLD, o receptor Pluton responde sempre com mensagens MLD *Report* (Figura 49) a mensagens MLDv2 *Query* (enviadas pelo *router* FBSD\_1) e a mensagens MLD *Query* (enviadas pelo *router* FBSD\_2).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
65	405.58909	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
66	406.85121	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report
70	411.02983	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener report
73	460.42474	fe80::2a0:24ff:fea58:6665	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
77	463.25810	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report
78	464.74827	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener report

Figura 49 – MLD *Report* em resposta a MLDv2 e MLD *General Query*

De seguida parou-se a execução do protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_1 e configurou-se este *router* para suportar MLDv2 (em modo de compatibilidade). Depois de activado novamente o protocolo de encaminhamento *multicast*, verificou-se que *router* FBSD\_1

continuou a enviar mensagens MLDv2 *General Query* (pacotes 82, 90, 106 da Figura 50) e o FBSD\_2 mensagens MLD *General Query* (pacote 98 da Figura 50), não se verificando o processo de eleição do QR para a rede local, que seria o *router* FBSD\_1 já que tem o menor endereço IPv6 *unicast link-local* na interface para a rede local.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
82	542.51543	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
83	544.66751	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff05::ff:773	ICMPv6	Multicast listener report
88	550.96484	fe80::2a0:24ff:fea6:da54	ff05::ff:772	ICMPv6	Multicast listener report
90	572.54588	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
98	585.47958	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query
106	697.82563	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	ff02::1	ICMPv6	Multicast listener query

```

⊕ Frame 106 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: 3Com_d9:9d:4d (00:04:76:d9:9d:4d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:01
⊕ Internet Protocol Version 6
⊕ Hop-by-hop Option Header
⊕ Internet Control Message Protocol v6
  Type: 130 (Multicast listener query)
  Code: 0
  Checksum: 0x416c [correct]
  Maximum response delay[ms]: 10000
  Multicast Address: ::
  S Flag: OFF
  Robustness: 2
  QQI: 125
  
```

} MLDv2 General Query

Figura 50 – MLDv2 (no modo de compatibilidade) no *router* FBSD\_1

Os receptores Pluton e Aquarius responderam à mensagem MLDv2 *General Query* (pacote 82 da Figura 50) com mensagens *MLD Report* (pacotes 83 e 88 da Figura 50, respectivamente). Nesta fase, foram incluídos na tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_1, os grupos das sessões *multicast* de interesse para os receptores. Note-se que a tabela *Reported MLD Group* do *router* FBSD\_2 apresenta para a interface *vx0*, informação semelhante à apresentada para a interface *x11* do *router* FBSD\_1.

**FBSD\_1**

Reported MLD Group	
Mif	PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1	x11 ff05::ff:772 (#5 (v1 EX #0)) (any source) (-)
1	x11 ff05::ff:773 (#2 (v1 EX #0)) (any source) (-)

Conclusões:

Em cenários em que uma rede local é servida por *routers multicast* configurados para suportarem diferentes versões (MLD e MLDv2) do protocolo de sinalização, se não for garantido administrativamente que o *Querier Router* (*router* com menor endereço IPv6 *unicast link-local*) suporte apenas o protocolo MLD, então não se verifica o processo de eleição do QR para essa rede, assumindo-se cada um dos *routers* como o QR da rede local (ou seja, o QR da versão MLDv2 continua a enviar mensagens MLDv2 *Query* para a rede)

Os *routers multicast* configurados apenas com o protocolo MLDv2 (ou seja, sem o modo de compatibilidade activo), não registam qualquer sessão *multicast* porque os receptores MLDv2, pelo facto de circularem mensagens MLD *Query* na rede, apenas enviam mensagens MLD *Report* que não são processadas por estes *routers*. Uma vez configurado os *routers* que suportam MLDv2 para operarem em modo de compatibilidade, verifica-se que embora continuem a ser enviadas mensagens MLDv2 *Query*, apenas são recebidas mensagens MLD *Report* que, neste caso, permitem a esses *routers* registar as sessões *multicast* de todos os receptores.

Em cenários onde existam *routers multicast* activos configurados com diferentes versões do protocolo de sinalização (MLD e MLDv2 em modo de compatibilidade) só são permitidas sessões *multicast* usando o modelo ASM.



## Capítulo 4 – Família de protocolos PIM

A família de protocolos PIM permite suportar tanto comunicações *multicast* IPv4 como comunicações *multicast* IPv6. A única diferença no formato das mensagens PIM é relativa ao tamanho de alguns campos, resultante da diferente estrutura dos endereços IPv4 e IPv6. Nesta dissertação são abordados os protocolos PIM *Dense Mode* (PIM DM), PIM *Sparse Mode* (PIM SM) e o PIM *Source Specific Multicast* (PIM SSM). O protocolo PIM SSM, surgiu recentemente e garante o suporte às comunicações *multicast* para o modelo SSM, enquanto que os restantes protocolos garantem o suporte às comunicações *multicast* para o modelo ASM.

Na primeira parte deste capítulo são descritos o formato das mensagens de controlo dos protocolos PIM e o seu funcionamento. A segunda parte do capítulo descreve um conjunto de experiências práticas que ilustram o funcionamento dos protocolos em redes IPv6.

### 4.1. Árvores de encaminhamento *multicast*

Através dos protocolos de encaminhamento *multicast* os pacotes de dados de cada sessão *multicast* são encaminhados por um conjunto de ligações de custo mínimo entre os *routers multicast* que interligam os emissores e os receptores pertencentes a cada sessão. Ao conjunto de ligações usado para o encaminhamento dos pacotes de dados de cada emissor, designa-se por árvore de encaminhamento *multicast* ou simplesmente árvore *multicast*, onde um dos *routers multicast* representa a origem da árvore e os restantes *routers multicast* formam os membros da árvore até às suas extremidades. A localização da origem da árvore depende do protocolo de

encaminhamento *multicast* usado. Existem dois tipos de árvores *multicast*: (i) árvore de distribuição por emissor (*Source Based tree* ou *Shortest Path tree*) e (ii) árvore de distribuição central (*Group Shared tree*).

Nos protocolos de encaminhamento *multicast* que usam árvores de distribuição por emissor é criada uma árvore *multicast* por cada emissor que envie dados para um determinado grupo *multicast*, sendo o *router multicast* que serve o emissor a origem da árvore. A Figura 51 ilustra um cenário composto por duas estações, que desempenham simultaneamente o papel de emissor/receptor e por uma estação que desempenha apenas o papel de receptor. Considera-se apenas um grupo *multicast* e atribui-se custos às ligações entre *routers*.

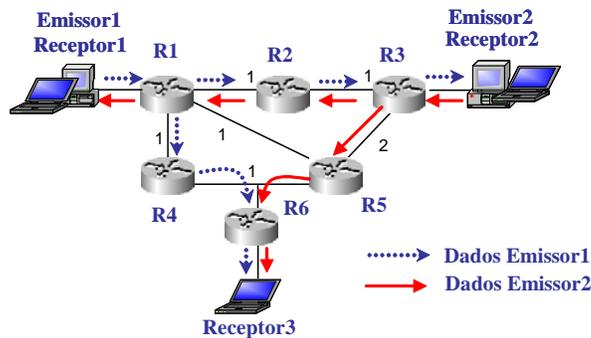


Figura 51 – Árvores de distribuição por emissor

O *router* R1 é a origem da árvore *multicast* usada para encaminhar os pacotes de dados enviados pelo Emissor1. Nesta árvore, os *routers* R2 e R3 formam o membro da árvore usado para o encaminhamento dos pacotes de dados até ao Receptor2, enquanto que os *routers* R4 e R6 formam o membro da árvore usado para o encaminhamento dos pacotes de dados até ao Receptor3, já que se encontram no caminho de custo mínimo para o Emissor1. A árvore de distribuição do Emissor2, tem como origem o *router* R3 e como membros, os *routers* R2 e R1 (para encaminhamento dos pacotes de dados para o Receptor1) e os *routers* R5 e R6 (para encaminhamento dos pacotes de dados para o Receptor3).

Nos protocolos de encaminhamento *multicast* que fazem uso da árvore de distribuição central é criada uma única árvore *multicast* por cada grupo *multicast*. Para a origem da árvore é seleccionado um *router multicast* localizado num determinado ponto da rede. Os protocolos de encaminhamento *multicast* que usam este tipo de árvores definem um mecanismo específico de transporte dos pacotes de dados enviados pelo emissor, desde o *router* que o serve até à origem da árvore. A Figura 52 ilustra um cenário de uma árvore de distribuição central composto por duas estações, que desempenham simultaneamente o papel de emissor/receptor e por uma

estação que desempenha apenas o papel de receptor. Considera-se apenas um grupo *multicast* e atribui-se custos às ligações entre *routers*.

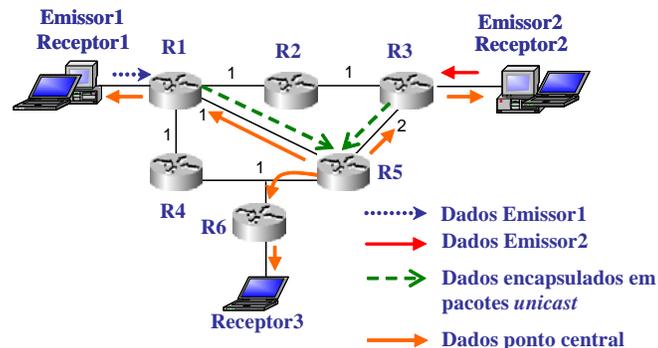


Figura 52 – Árvore de distribuição central

A origem da árvore é o *router* R5 e os *routers* R1 e R3 encapsulam os pacotes de dados enviados pelo Emissor1 e pelo Emissor2, respectivamente, em pacotes *unicast* encaminhando-os pelo caminho de custo mínimo para a origem da árvore, que por sua vez descapsula esses pacotes e encaminha-os para os receptores interessados através da árvore de distribuição central.

Por um lado, os protocolos de encaminhamento *multicast* que usam árvores de distribuição por emissor sofrem de problemas de escalabilidade quando o número de emissores aumenta, porque os *routers multicast* pertencentes à árvore têm que manter a informação do estado do grupo *multicast* para todos os emissores que enviam dados para esse grupo. No entanto, ao ser usado este tipo de árvores, o tráfego *multicast* é distribuído por um maior número de ligações, o que conduz a um menor congestionamento do tráfego. Por outro, os protocolos de encaminhamento que usam árvores de distribuição central tornam-se mais eficientes em cenários onde existem muitos emissores, já que minimizam a informação do estado do grupo *multicast* que tem que ser mantida nos *routers multicast* e o número de ligações usadas para encaminhar o tráfego *multicast* diminui. No entanto, estes protocolos concentram os problemas de congestionamento de tráfego num número reduzido de ligações, sendo por isso menos eficientes ao nível do encaminhamento óptimo.

Uma árvore *multicast* é criada através de pacotes de controlo enviados pelos *routers multicast* localizados nas extremidades em direcção à origem da árvore. Os protocolos de encaminhamento *multicast* usam o mecanismo *Reverse Path Forwarding* (RPF) baseado no endereço IP *unicast*, do emissor ou da origem da árvore de distribuição central, que permite aos *routers multicast* descobrir qual é a interface usada no caminho de custo mínimo para o emissor ou para a origem da árvore de distribuição central. Essa interface é definida como interface de

entrada (ou interface RPF), onde são enviados os pacotes de controlo e recebidos os pacotes de dados. A interface que liga os *routers multicast* aos receptores ou aos *routers multicast* localizados mais perto das extremidades da árvore, é definida como interface de saída (por onde são encaminhados os pacotes de dados). Nos protocolos de encaminhamento *multicast* o encaminhamento dos pacotes é baseado não só no seu endereço destino (tal como acontece no encaminhamento *unicast*), mas também no endereço origem. Para evitar o encaminhamento de pacotes de dados duplicados e prevenir a existência de ciclos, os *routers multicast* só encaminham os pacotes de dados *multicast* que lhe chegam pela sua interface de entrada, descartando os pacotes de dados que chegam por qualquer outra interface.

Existem protocolos de encaminhamento *multicast* que usam os seus próprios mecanismos para trocarem a informação de encaminhamento necessária à execução do mecanismo RPF. No caso da família de protocolos PIM, para se executar o mecanismo RPF é usada uma tabela *Multicast Routing Information Base* (MRIB) criada com base no protocolo de encaminhamento *unicast*. Podem existir cenários em que a MRIB é igual à tabela de encaminhamento *unicast*, mas existem outros cenários em que as tabelas são diferentes como por exemplo, cenários em que *routers* intermédios não suportem encaminhamento *multicast*. Ao ser usada a tabela MRIB para efectuar o mecanismo RPF, diferente da tabela de encaminhamento *unicast*, os administradores da rede podem configurar diferentes caminhos e políticas de gestão para o tráfego *unicast* e para o tráfego *multicast*. A família de protocolos PIM caracteriza-se por ser independente do protocolo de encaminhamento *unicast* usado para criar a MRIB.

## 4.2. Mensagens PIM

A família de protocolos PIM define vários tipos de mensagens de controlo [PIMSM] que possuem o mesmo cabeçalho e são encapsuladas em pacotes IPv4 ou em pacotes IPv6 com o número de protocolo 103 (0x67). Existem mensagens comuns a todos os protocolos, mas algumas são particulares para determinados protocolos. A Figura 53 ilustra o cabeçalho de uma mensagem PIM.

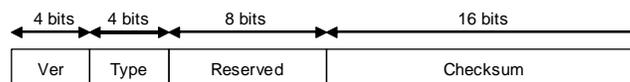


Figura 53 – Cabeçalho da mensagem PIM

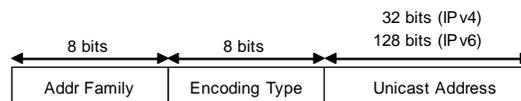
O campo *Ver* é usado para identificar a versão do protocolo PIM. Existem duas versões da família de protocolos PIM, sendo estudada apenas nesta dissertação a versão 2, pelo que este campo assume o valor ‘2’. O campo *Type* é usado para identificar o tipo de mensagem PIM. A Tabela 4 apresenta os diferentes valores do campo *Type*, assim como as mensagens que representam e os protocolos PIM onde são usadas.

<i>Type</i>	Mensagem	Protocolos PIM
0	<i>Hello</i>	Todos
1	<i>Register</i>	PIM SM
2	<i>Register-Stop</i>	
3	<i>Join/Prune</i>	Todos
4	<i>Bootstrap</i>	PIM SM
5	<i>Assert</i>	Todos
6	<i>Graft</i>	PIM DM
7	<i>Graft-Ack</i>	
8	<i>Candidate RP Advertisement</i>	PIM SM

Tabela 4 – Tipos de mensagens PIM

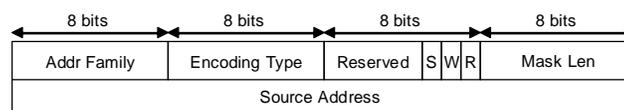
O campo *Reserved*, encontra-se reservado para uso futuro e o campo *Checksum* (calculado para toda a mensagem PIM, com a exceção dos dados da mensagem *Register*) serve para verificar se a mensagem contém erros, não sendo processada se tal acontecer.

As mensagens PIM transportam informação codificada dos endereços IP *unicast* e dos endereços IP *multicast*. Os endereços IP *unicast* são codificados no formato *Encoded-Unicast* apresentado na Figura 54.

Figura 54 – Formato *Encoded-Unicast*

O campo *Addr Family* identifica a família do endereço IP representado (toma o valor ‘1’ para um endereço IPv4 e o valor ‘2’ para um endereço IPv6); o campo *Encoding Type* especifica o tipo de codificação usada (por omissão toma o valor ‘0’); o campo *Unicast Address* contém o endereço IP *unicast*.

No entanto, na mensagem *Join/Prune* os endereços IP *unicast* da origem de uma árvore *multicast*, são codificados no formato *Encoded-Source* apresentado na Figura 55.

Figura 55 – Formato *Encoded-Source*

A *flag S (Sparse bit)* toma o valor ‘1’ quando a mensagem *Join/Prune* é relativa ao protocolo PIM SM e toma o valor ‘0’ para os restantes protocolos. A *flag W (Wildcard)* toma o valor ‘1’ quando a mensagem *Join/Prune* é relativa ao estado (\*,G) (qualquer emissor) e toma o valor ‘0’, quando é relativa ao estado (S,G) (um emissor). A *flag R (Rendezvous Point Tree)* toma o valor ‘1’ quando a informação do estado (S,G) é enviada para o RP e toma o valor ‘0’, quando essa informação é enviada para o emissor (S). O campo *Mask Len* toma o valor ‘32’ para um endereço IPv4 ou valor ‘128’ para um endereço IPv6. O campo *Source Address* representa o endereço IP *unicast* da origem da árvore *multicast*.

Os endereços IP *multicast* são codificados no formato *Encoded-Group* apresentado na Figura 56.

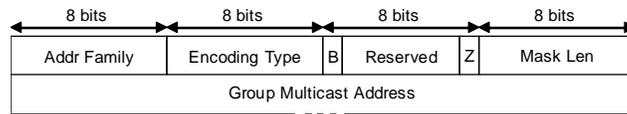


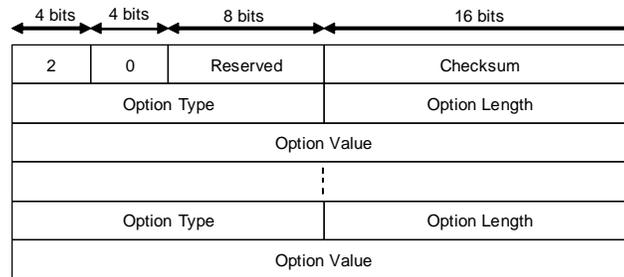
Figura 56 – Formato *Encoded-Group*

A *flag B* quando toma o valor ‘1’ significa que o grupo usa o protocolo PIM *Bidireccional* [PIMBIDIR] e toma o valor ‘0’ para os outros protocolos; o campo *Reserved* (composto por 6 bits) encontra-se reservado para uso futuro; a *flag Z* quando toma o valor ‘1’ significa que o grupo pertence a um alcance configurado administrativamente; o campo *Mask Len*, contém o número de bits da máscara do grupo *multicast* (máximo de 32 bits para IPv4 e 128 bits para IPv6); finalmente o campo *Group Multicast Address* contém o endereço IP *multicast* que identifica o grupo.

De seguida, descreve-se separadamente o formato das mensagens PIM de cada um dos tipos apresentados na Tabela 4.

### Mensagem Hello

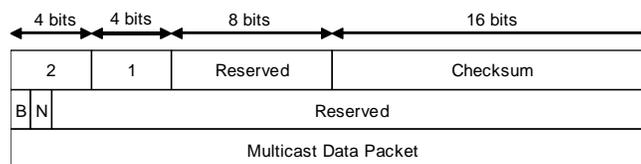
Trata-se de uma mensagem enviada periodicamente [RFC 2362] pelos *routers multicast* em todas as suas interfaces onde é activado o protocolo PIM. Como endereço origem é usado o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e como endereço destino é usado o endereço IP *multicast* ALL\_PIM\_ROUTERS (224.0.0.13 para IPv4 e FF02::d para IPv6). A Figura 57 apresenta o formato da mensagem *Hello*.

Figura 57 – Mensagem *Hello*

Esta mensagem pode transportar várias opções identificadas pelos campos *Option Type* (16 bits), *Option Length* (16 bits) e *Option Value* (32 bits). Uma das opções, é a opção *Holdtime* que especifica o tempo de vida (em segundos) de um *router multicast* antes de ser eliminado da tabela de vizinhos PIM. Se for usado o valor ‘0xFFFF’ significa que esse *router multicast* tem um tempo de vida permanente; se for usado o valor ‘0’ significa que o tempo de vida expira imediatamente. Qualquer outro valor, especifica o tempo de vida do *router multicast* ao fim do qual é apagado das tabelas dos seus vizinhos PIM, se não receberem mais nenhuma mensagem *Hello* que permite renovar esse tempo de vida. Os valores das restantes opções encontram-se definidos em [PIMSM].

#### Mensagem Register

Trata-se de uma mensagem *unicast* enviada pelo DR (*Designated Router*) do emissor para o RP (*Rendezvous Point*) tendo como endereço origem, o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast global* do DR e como endereço destino, o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast global* do RP. A Figura 58 ilustra o formato da mensagem.

Figura 58 – Mensagem *Register*

A *flag B*, quando colocada a ‘1’ indica que a mensagem *Register* tem origem num *PIM Border Multicast Router (PMBR)*<sup>5</sup>. A utilização desta *flag* cai fora do âmbito desta dissertação. A *flag N* é colocada a ‘1’ quando a mensagem é do tipo *Null-Register* (sem dados *multicast*) e colocada a zero quando a mensagem *Register* contém um pacote de dados *multicast* encapsulado. O campo

<sup>5</sup> *Router multicast* fronteira entre redes que suportam o PIM SM e redes que suportam outros protocolos de encaminhamento *multicast* (e.g PIM DM)

*Reserved* (32 bits) encontra-se reservado para uso futuro, enquanto que o campo *Multicast Data Packet* contém o pacote de dados original enviado pelo emissor.

Mensagem Register-Stop

Trata-se de uma mensagem enviada pelo RP para o DR que enviou a mensagem *Register*. A mensagem tem como endereço origem, o destino da mensagem *Register* e como endereço destino, a origem da mensagem *Register*. A Figura 59 apresenta o formato da mensagem.

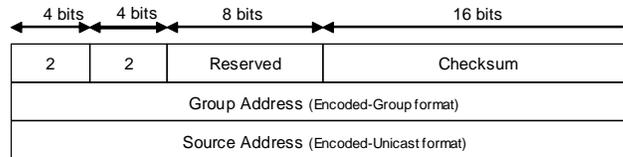


Figura 59 – Mensagem Register-Stop

Mensagem Join/Prune

Trata-se de uma mensagem (Figura 60) enviada pelos *routers multicast* tendo como endereço origem, o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e como endereço destino, o endereço ALL-PIM-ROUTERS. A opção *Join* é usada para aderir à árvore *multicast* e a opção *Prune* é usada para abandonar a árvore *multicast*.

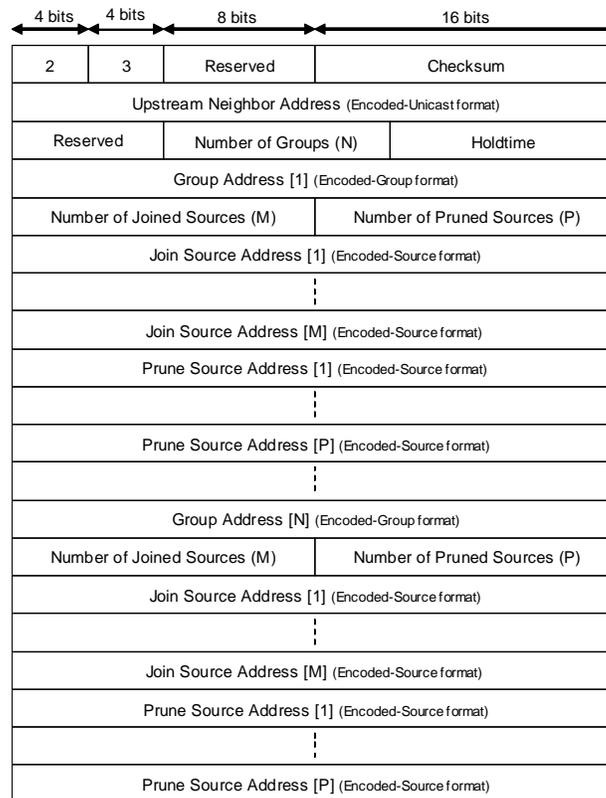


Figura 60 – Mensagem Join/Prune

O campo *Upstream Neighbor Address* representa o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor, ou para a origem da árvore de distribuição central. O campo *Reserved* encontra-se reservado para uso futuro, enquanto que o campo *Number of Groups* representa o número de grupos *multicast* contidos na mensagem. O campo *Holdtime* indica o período de tempo (em segundos) em que o receptor da mensagem deve manter o estado *Join/Prune* activo na interface onde recebeu a mensagem. O campo *Group Address* representa o endereço IP *multicast* do grupo a que se refere a mensagem *Join/Prune*. Este campo é constituído pelos campos: (i) *Number of Joined Sources* que representa o número de *Joins* que a mensagem contém, (ii) *Number of Pruned Sources* que representa o número de *Prunes* que a mensagem contém; (iii) *Join Source Address* que contém o endereço IP *unicast* a quem é feito o *Join*; (iv) *Prune Source Address* que contém o endereço IP *unicast* a quem é feito o *Prune*.

Mensagem Bootstrap

Trata-se de uma mensagem (Figura 61) enviada periodicamente (com o TTL ou o *Hop Limit* a ‘1’) pelo *Bootstrap Router* (BSR) [BOOTSTRAP] e encaminhada pelos *routers* intermédios em todas as suas interfaces onde existam vizinhos PIM (com excepção da interface onde foi recebida).

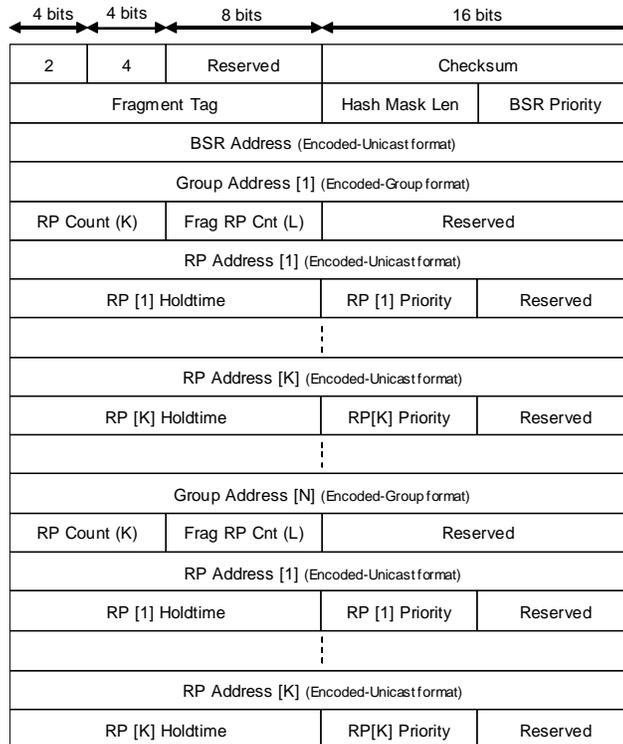


Figura 61 – Mensagem Bootstrap

A mensagem têm como endereço origem, o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e como endereço destino, o endereço ALL-PIM-ROUTERS. O tamanho de uma mensagem *Bootstrap* pode ser maior do que o *Maximum Transmission Unit* (MTU) da ligação, podendo por esse motivo ser necessário fragmentar a mensagem. Assim, o campo *Fragment Tag* representa um número gerado aleatoriamente usado para distinguir os fragmentos que pertencem a diferentes mensagens *Bootstrap*. Os fragmentos que pertencem à mesma mensagem têm este campo igual. O campo *Hash Mask Len* representa o comprimento (em bits) da máscara usada na função *hash*. Nas comunicações *multicast* IPv4 é usado o valor 30, enquanto que nas comunicações *multicast* IPv6 é usado o valor 126. O campo *BSR-priority* contém o valor da prioridade do BSR (*Bootstrap Router*) usado para distinguir qual o BSR a ser usado num domínio onde existam vários candidatos a BSR. O campo *BSR Address* representa o endereço IP *unicast* do BSR. Cada mensagem *Bootstrap* pode conter vários campos *Group Address*, em que cada um representa uma gama *multicast*. Este campo, por sua vez, contém os seguintes campos: (i) *RP Count* que representa o número de candidatos a RP (para essa gama) que a mensagem global contém; (ii) *Frag RP Cnt* que representa o número de candidatos a RP (para essa gama) que o presente fragmento contém; (iii) *Reserved* usado para uso futuro; (iv) *RP Address* que representa o endereço IP *unicast* do candidato a RP (para essa gama); (v) *RP Holdtime* que representa o tempo de vida (em segundos) do candidato a RP; (vi) *RP Priority* que define a prioridade do candidato a RP e (vii) *Reserved* reservado para uso futuro.

Mensagem Assert

Trata-se de uma mensagem (Figura 62) enviada pelos *routers multicast* de uma rede local quando recebem pacotes de dados *multicast* nas suas interfaces de saída.

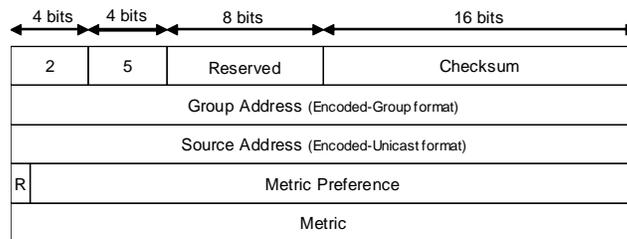


Figura 62 – Mensagem Assert

Como endereço origem é usado o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e como endereço destino, é usado o endereço ALL-PIM-ROUTERS. O campo *Group Address* representa o endereço IP *multicast* do grupo para onde foi enviado o pacote e o campo *Source Address* representa o endereço IP *unicast* do emissor contido no pacote *multicast*.

O bit R (*RPT-bit*) toma o valor ‘1’ quando o pacote *multicast* que originou a mensagem *Assert* é encaminhado através da árvore de distribuição central e toma o valor ‘0’ quando é encaminhado pela árvore de distribuição por emissor. O campo *Metric Preference* representa o valor da preferência associada ao protocolo de encaminhamento *unicast* e o campo *Metric*, representa a métrica da tabela de encaminhamento *unicast*.

Mensagem Graft

Trata-se de uma mensagem *unicast* enviada por um *router multicast* para o seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para a origem da árvore de distribuição por emissor de forma a tornar-se novamente membro da árvore. O endereço origem é o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e o endereço destino, é o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* do vizinho PIM na sua interface RPF. O formato de uma mensagem *Graft* é igual ao formato da mensagem *Join/Prune* com a única diferença de que o campo *Type* toma o valor ‘6’.

Mensagem Graft-Ack

Trata-se de uma mensagem *unicast* enviada pelo vizinho PIM em resposta a uma mensagem *Graft*. Como endereço origem é usado o endereço IPv4 *unicast* ou o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface e como endereço destino, é usado o endereço IPv4 *unicast* ou IPv6 *unicast link-local* da interface do *router multicast* que enviou a mensagem *Graft*. O formato de uma mensagem *Graft-Ack* é igual ao formato da mensagem *Join/Prune* com a única diferença de que o campo *Type* toma o valor ‘7’.

Mensagem Candidate-RP-Advertisement

Trata-se de uma mensagem *unicast* (Figura 63) enviada pelo candidato a RP, para o BSR. Como endereço origem é usado o endereço IP *unicast* da interface do candidato a RP (usada para alcançar o BSR) e como endereço destino é usado o endereço IP *unicast* do BSR.

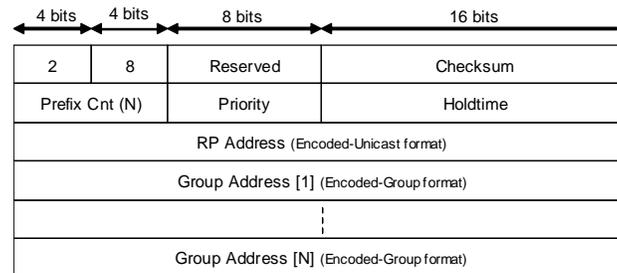


Figura 63 – Mensagem *Candidate-RP-Advertisement*

O campo *Prefix-count* representa o número de gamas *multicast* que a mensagem contém. O valor ‘0’ indica que o candidato a RP serve todos os grupos *multicast*. O campo *Priority* define a prioridade do candidato a RP. O valor ‘0’ indica a maior prioridade. O campo *Holdtime* define o tempo de vida (em segundos) dos anúncios. O campo *RP Address* representa o endereço IP *unicast* do candidato a RP. Finalmente o campo *Group Address* representa a gama *multicast* que o RP serve.

### 4.3. PIM *Dense Mode* (PIM DM)

O protocolo PIM DM [PIMDM] foi concebido para cenários de *Intranet* constituídos por um conjunto relativamente pequeno de redes, em que as sessões *multicast* que se estabelecem envolvem usualmente receptores localizados em (quase) todas as redes. Este protocolo usa árvores de distribuição por emissor e considera inicialmente que todas as ligações da rede são membros da árvore.

Trata-se de um protocolo útil quando existe um grande número de receptores densamente distribuídos que manifestem interesse em participar numa sessão *multicast*. Contudo, existem problemas de escalabilidade associados a este protocolo quando se consideram grandes domínios ou quando existe um grande número de emissores, uma vez que todos os *routers multicast* devem manter a informação de estado para todos os emissores que enviam pacotes de dados para os grupos *multicast*.

Nesta secção iremos descrever o funcionamento de cada uma das partes deste protocolo: (1) descoberta dos vizinhos PIM e processo de eleição do DR; (2) mecanismo de inundação (*flooding*) de pacotes e corte (*prune*) de membros da árvore; (3) Mecanismo de *Assert*; e (4) mecanismo de enxerto (*graft*). O cenário da Figura 64, utilizado para explicar cada uma das partes do protocolo PIM DM, é composto por um emissor e dois receptores interligados entre si por seis *routers multicast*. A cada uma das ligações entre *routers* é atribuído um determinado custo que determina os percursos de custo mínimo para o emissor.

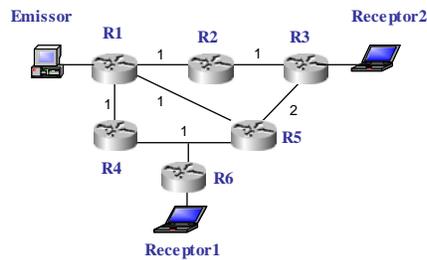
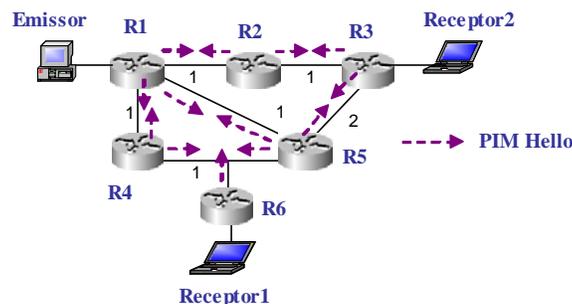


Figura 64 – Cenário PIM DM

### 1. Descoberta dos vizinhos PIM e processo de eleição do DR

Na sua fase inicial, o protocolo PIM DM troca periodicamente mensagens *Hello* (Figura 65) entre os *routers multicast* para se estabelecerem as relações de vizinhança PIM (necessárias à criação da árvore *multicast*). Cada *router multicast* mantém uma tabela para as suas ligações, com os endereços dos vizinhos PIM e o tempo de vida associado a cada um. Num cenário em que uma rede seja servida por vários *routers*, um deles deve ser seleccionado para actuar como DR. O DR é o responsável por enviar mensagens de controlo. No processo de eleição do DR, cada *router* PIM examina a mensagem *Hello* recebida e compara o endereço IP *unicast* do seu vizinho com o seu endereço IP *unicast*. O *router* com o maior endereço IP *unicast* é eleito o DR dessa rede local. Durante um determinado período de tempo, se não forem recebidas mensagens *Hello* do DR, então é eleito um novo DR.

Figura 65 – Cenário PIM DM: Troca de mensagens *Hello*

### 2. Mecanismo de inundação de pacotes e corte de membros da árvore

Quando um emissor (S) começa a enviar pacotes de dados para um grupo *multicast* (G), o *router multicast* que serve esse emissor, cria o estado (S,G) e encaminha os pacotes de dados para todas as suas ligações onde existam vizinhos PIM. Cada *router multicast* ao receber um pacote de dados, cria o estado (S,G) e encaminha esse pacote nas ligações onde existem vizinhos PIM, apenas se o pacote de dados for recebido na interface do caminho de custo mínimo para

o emissor (interface RPF). Caso contrário, o pacote de dados é descartado, prevenindo assim a ocorrência de ciclos na rede. Associado a cada estado (S,G) está um tempo de vida (mantido pela recepção dos pacotes de dados), a interface RPF e a lista de interfaces de saída (por onde são encaminhados os pacotes de dados) para os vizinhos PIM ou para os receptores pertencentes a esse grupo G. A Figura 66 ilustra o processo de inundação dos pacotes de dados enviados pelo Emissor1 para o grupo G, em que apenas o Receptor1 manifestou previamente interesse em receber os dados enviados para esse grupo e o Receptor2, ainda não manifestou interesse.

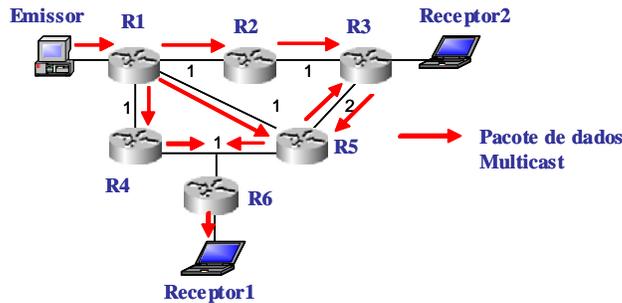


Figura 66 – Cenário PIM DM: inundação da rede

Na rede podem existir *routers multicast* que não tenham interesse em receber os pacotes de dados destinados ao grupo G (não existem interfaces de saída para o estado (S,G)), ou porque os seus vizinhos PIM que o têm no caminho de custo mínimo para o emissor não pretendem receber dados, ou porque não tem nas suas ligações receptores interessados nesse grupo *multicast*. Estes *routers* enviam mensagens *Prune* (contendo o endereço IP *unicast* do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor) relativas ao estado (S,G), através da sua interface RPF. O vizinho PIM envia uma mensagem *Prune* na sua interface de saída, coloca essa interface no estado *Pruned* e deixa de encaminhar os pacotes de dados por essa interface. A Figura 67 ilustra o processo de corte dos membros da árvore *multicast*.

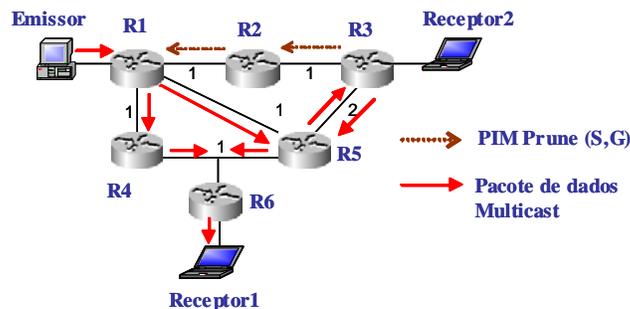


Figura 67 – Cenário PIM DM: Corte de membros da árvore

O *router* R3 envia uma mensagem *Prune*, uma vez que o Receptor2 não manifestou interesse em receber dados enviados para esse grupo. O *router* R2 ao receber a mensagem *Prune*, envia uma mensagem *Prune* nessa interface antes de a colocar no estado *Pruned*. De seguida, envia uma mensagem *Prune* ao *router* R1 e este, por sua vez, também envia uma mensagem *Prune* nessa interface antes de a colocar no estado *Pruned*. Desta forma, é cortado o membro da árvore *multicast* constituído pelos *routers* R2 e R3. As interfaces mantêm o estado *Pruned* durante um período de tempo e uma vez expirado, os pacotes de dados passam a ser novamente encaminhados por essa interface.

Numa rede com vários *routers multicast* (considere-se por um exemplo um *router multicast* inserido na ligação entre os *routers* R2 e R3), o *router* que tiver interfaces de saída para o estado (S,G) ao verificar o envio de uma mensagem *Prune* (S,G) por parte de outro *router*, envia uma mensagem *Join* para cancelar a mensagem *Prune*, evitando desta forma que o seu vizinho PIM (no caminho de custo mínimo para o emissor) coloque a interface que serve essa rede no estado *Pruned* e conseqüentemente deixe de encaminhar os pacotes de dados para essa rede. Caso exista uma falha na mensagem *Join* enviada, o *router* interessado têm uma nova oportunidade de enviar outra mensagem *Join*, isto porque o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor antes de colocar essa interface no estado *Pruned*, envia também uma mensagem *Prune* na sua interface de saída. Caso não seja recebida nenhuma mensagem *Join* em resposta à sua mensagem *Prune*, o vizinho PIM (no caminho de custo mínimo para o emissor) coloca essa interface no estado *Pruned*.

### 3. Mecanismo de *Assert*

Em redes servidas por vários *routers* podem existir diferentes caminhos paralelos para o emissor, conduzindo a uma situação em que os mesmos pacotes de dados são encaminhados pelos diferentes *routers multicast*. Para evitar este problema, os protocolos PIM usam o mecanismo de *Assert* que determina quem é o *router multicast* responsável por encaminhar os pacotes de dados para essa rede local. Um *router multicast* ao receber um pacote de dados na sua interface de saída, apercebe-se que existem nessa rede mais vizinhos PIM a encaminharem os mesmos pacotes de dados destinados a um dado grupo *multicast*. Nesta fase, são trocadas mensagens *Assert* enviadas por cada um dos *routers multicast* da rede local. Se todos os *routers multicast* usarem o mesmo protocolo de encaminhamento *unicast*, o *router multicast* que tiver menor métrica para o emissor passa a ser o eleito para encaminhar os pacotes de dados para a rede local. Em caso de métrica igual, ganha o que tiver o maior endereço IP *unicast*. Se os

*routers multicast* executarem diferentes protocolos de encaminhamento *unicast*, é comparado o valor da preferência da métrica (*Metric Preference Value*) que irá determinar qual dos *routers multicast* assume o papel de encaminhar os pacotes. A preferência da métrica pode ser configurada para cada protocolo de encaminhamento *unicast*. Quando um *router* recebe uma mensagem *Assert* relativa a um grupo particular, o valor da preferência da métrica é comparado com o seu. Se forem iguais é comparada a métrica, mas se forem diferentes o que tiver menor valor de preferência da métrica será o eleito. Se os restantes *routers* não tiverem (noutras interfaces) receptores ou vizinhos PIM interessados em receber tráfego destinado ao grupo *multicast*, enviam uma mensagem *Prune* através da sua interface RPF.

A Figura 68 ilustra duas situações em que são trocadas mensagens *Assert*: (i) os *routers* R3 e R5 executam o mesmo protocolo de encaminhamento *unicast* com diferentes métricas e (ii) os *routers* R4 e R5 executam o mesmo protocolo de encaminhamento *unicast* com métrica igual. No primeiro caso, como o *router* R5 tem menor métrica para o emissor do que o *router* R3, é o responsável por encaminhar os pacotes de dados para essa ligação e o *router* R3, coloca a sua interface no estado *Prune* e deixa de encaminhar os pacotes de dados. No segundo caso, assumindo que o *router* R4 tem maior endereço IP *unicast* do que o *router* R5 e, como o *router* R5 não tem nas suas ligações receptores ou vizinhos PIM interessados nessa sessão *multicast*, deixa de encaminhar os pacotes de dados para essa rede e envia uma mensagem *Prune* (pela sua interface RPF).

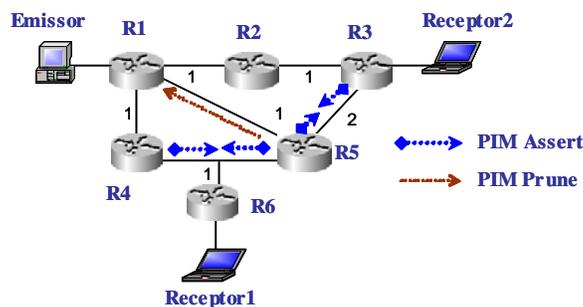


Figura 68 – Cenário PIM DM: Mecanismo de *Assert*

Depois de cortado o membro da árvore *multicast*, composto pelos *routers* R1 e R5, os dados enviados pelo emissor são encaminhados para o Receptor1 através do membro composto pelos *routers* R1, R4 e R6 tal como é ilustrado na Figura 69.

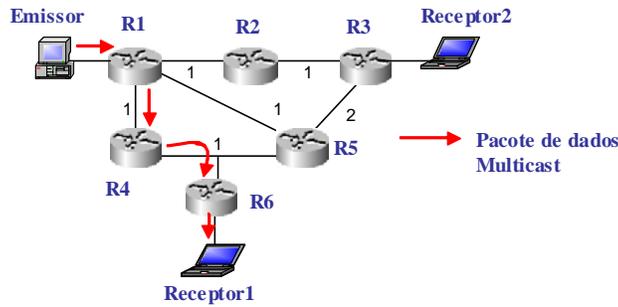


Figura 69 – Cenário PIM DM: Árvore *multicast* resultante do mecanismo *Assert*

4. Mecanismo de enxerto

O protocolo PIM DM implementa o mecanismo de enxerto que permite acelerar o processo da reconstrução da árvore de encaminhamento *multicast* (descrito anteriormente), baseado no tempo em que as interfaces de um *router* estão no estado *Pruned*. Durante esse período de tempo, se um receptor manifestar interesse em pertencer ao grupo G, o DR desse receptor envia uma mensagem *unicast Graft* com destino ao seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor. Em resposta à mensagem *Graft*, esse vizinho PIM envia uma mensagem *unicast Graft-Ack*. O processo de reconstrução da árvore *multicast* é concluído quando, um *router* que mantém interfaces de saída para o estado (S,G) envia uma mensagem *Graft-Ack* em resposta à mensagem *Graft* recebida, ou quando a origem da árvore *multicast* (*router* que serve o emissor) envia uma mensagem *Graft-Ack* em resposta à mensagem *Graft* recebida. A Figura 70 ilustra um exemplo do mecanismo de enxerto usado pelo protocolo PIM DM.

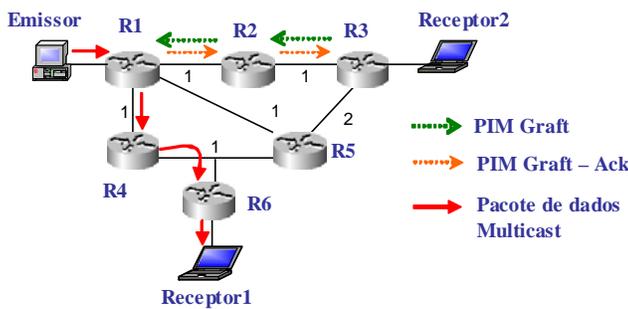


Figura 70 – Cenário PIM DM: Mecanismo de enxerto

O *router* R3 ao ser sinalizado pelo Receptor2 que pretende receber dados destinados ao grupo *multicast*, envia uma mensagem *Graft* para o *router* R2 (vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor). O *router* R2 ao receber a mensagem *Graft* retira o estado *Pruned* da sua interface e envia, por um lado uma mensagem *Graft-Ack* para o *router* R3 e, por outro lado,

uma mensagem *Graft* para o *router* R1. Por sua vez, o *router* R1 ao receber a mensagem *Graft* retira o estado *Pruned* dessa interface e envia uma mensagem *Graft-Ack* para o *router* R2. Com este mecanismo, os receptores passam a receber os pacotes de dados enviados pelo Emissor (Figura 71), sem necessitarem que expire o tempo em que as interfaces dos seus DR abandonem o estado *Pruned*.

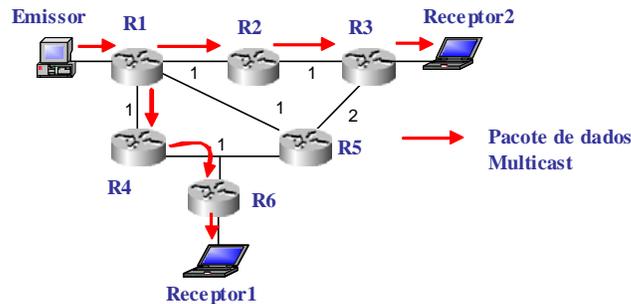


Figura 71 – Cenário PIM DM: Encaminhamento dos pacotes de dados *multicast*

#### 4.4. PIM *Sparse Mode* (PIM SM)

Para grandes volumes de tráfego *multicast* e requisitos apertados de controlo de largura de banda, o protocolo PIM SM [PIMSM] surge como sendo o protocolo *multicast* que permite cumprir com esses requisitos, uma vez que assenta na ideia de que só recebe tráfego *multicast* quem o indicar explicitamente, evitando assim uma inundação de pacotes *multicast* em toda a rede, tal como acontece com o protocolo PIM DM. O PIM SM é um protocolo escalável (os pacotes *multicast* só são enviados para as ligações da rede que os pedem explicitamente através de mensagens próprias e só são criados estados nos *routers multicast* quando são necessários), à custa de um aumento da complexidade do funcionamento do protocolo.

Por omissão, o protocolo PIM SM usa árvores de distribuição central e a origem da árvore é um *router multicast* localizado num determinado ponto da rede, que se designa por *Rendezvous Point* (RP). O *router multicast* que serve um emissor (DR), encapsula os pacotes de dados em mensagens *Register* e usando o encaminhamento *unicast*, envia-as com destino ao RP que, por sua vez, descapsula os pacotes de dados e encaminha-os (através da árvore de distribuição central) para os receptores interessados. Ao serem usadas árvores de distribuição central, os *routers multicast* não têm que guardar informação de estado por cada emissor que envia dados para um determinado grupo *multicast*. Este protocolo também suporta árvores de distribuição

por emissor, que evitam o encapsulamento dos pacotes de dados enviados pelo emissor e permitem otimizar o encaminhamento dos pacotes de dados.

À semelhança do que acontece com o protocolo PIM DM, os *routers multicast* só encaminham os pacotes de dados *multicast*, recebidos na sua interface de entrada (interface RPF) para todas as suas interfaces de saída nas ligações onde existam vizinhos PIM, ou nas ligações onde existem receptores que manifestaram interesse em receber dados destinados a um determinado grupo *multicast*.

O protocolo PIM SM é vantajoso em cenários onde existe um grande número de emissores que enviam dados para um grupo *multicast*, com receptores localizados de forma dispersa e em cenários, onde o volume de tráfego *multicast* não é constante. No entanto, o encapsulamento e descapsulamento dos pacotes de dados entre o emissor e o RP pode tornar-se ineficiente e para além desse facto, não existem normas que definam os grupos *multicast* servidos por cada RP, o que exige uma grande coordenação na definição dos grupos *multicast*.

Ao contrário do que acontece com o protocolo PIM DM, onde a árvore *multicast* é criada à medida que são encaminhados os pacotes de dados, no protocolo PIM SM a árvore *multicast* é criada antes de ser feito o encaminhamento dos pacotes de dados. A descoberta dos vizinhos PIM e o processo de eleição do DR, baseia-se na troca de mensagens *Hello* à semelhança do que acontece para o protocolo PIM DM. O mecanismo de *Assert*, também existe no PIM SM com o mesmo modo de funcionamento que foi descrito no protocolo PIM DM, embora se verifique apenas em redes intermédias partilhadas.

Nesta secção, iremos analisar cada uma das partes do protocolo PIM SM: (1) adesão à árvore de distribuição central; (2) adesão do RP à árvore de distribuição por emissor; (3) adesão do DR do receptor à árvore de distribuição por emissor; (4) corte de um membro da árvore e (5) mecanismos de descoberta do RP.

A Figura 72 apresenta o cenário utilizado para explicar o funcionamento de cada uma das partes do protocolo PIM SM. Este cenário é composto por um emissor e dois receptores interligados entre si por seis *routers multicast*. O RP encontra-se localizado no *router* R5. A cada uma das ligações entre *routers* é atribuído um determinado custo que determina os percursos de custo mínimo para o emissor e para o RP.

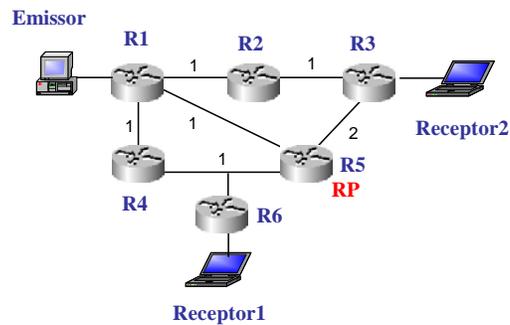


Figura 72 – Cenário PIM SM

### 1. Construção da árvore de distribuição central

Quando um receptor pretende aderir a um determinado grupo *multicast* (G), o DR da rede local cria na sua tabela de encaminhamento *multicast* o estado (\*,G), inclui a interface onde recebeu as mensagens de sinalização na sua lista de interfaces de saída para esse estado, analisa a MRIB para determinar qual é o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP e envia periodicamente uma mensagem *Join* (\*,G). Associado a cada estado (\*,G) está o endereço IP *unicast* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP, a interface de entrada e as interfaces de saída por onde são encaminhados os pacotes de dados destinados ao grupo G.

Um *router multicast* ao receber uma mensagem *Join* (\*,G), verifica se já tem o estado (\*,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast* e pode acontecer uma de duas situações: (i) caso exista o estado, significa que esse *router* já se encontra na árvore de distribuição central e adiciona apenas a interface onde recebeu a mensagem *Join* à lista de interfaces de saída para esse estado; (ii) se não existir, é criado, a interface é incluída na lista de interfaces de saída para esse estado e envia periodicamente uma mensagem *Join* (\*,G), contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP. A árvore de distribuição central fica construída quando o RP tiver o estado (\*,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast*.

A Figura 73 apresenta um exemplo da construção de uma árvore de distribuição central. Neste cenário, o Receptor1 e o Receptor2 manifestam interesse em aderir ao grupo *multicast* G. O *router* R3 e o *router* R6 enviam uma mensagem *Join*, contendo o endereço do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o *router* R5 (RP), construindo a árvore de distribuição central composta pela origem (RP) e pelos membros (R3 e R6). A forma como cada um dos *routers multicast* sabe qual é o RP a utilizar será explicada posteriormente.

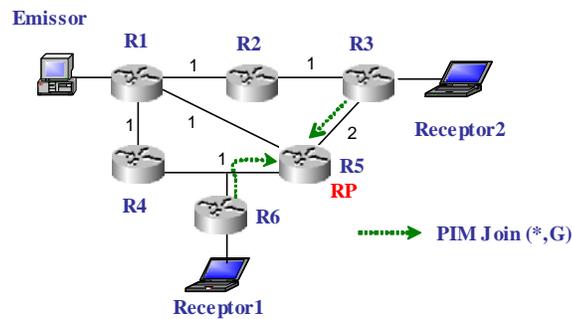


Figura 73 – PIM SM: Construção da árvore de distribuição central

Quando um emissor envia pacotes de dados para um determinado grupo *multicast*, o DR da rede local encapsula cada um dos pacotes de dados em mensagens *Register* e usando a sua tabela de encaminhamento *unicast*, encaminha-os para o RP. Quando o RP recebe as mensagens *Register*, descapsula os pacotes de dados e encaminha-os para os membros da árvore de distribuição central.

Na Figura 74, o *router* R1 encapsula os pacotes de dados enviados pelo Emissor, em mensagens *Register* e encaminha-os para o *router* R5 (RP) que se encarrega de descapsular os pacotes de dados e enviá-los para os *routers* R3 e R5 que, por sua vez, os encaminham para o Receptor2 e para o Receptor1, respectivamente.

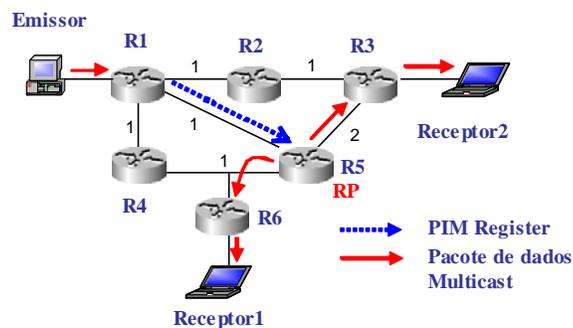


Figura 74 – PIM SM: Encaminhamento dos pacotes de dados

## 2. Adesão do RP à árvore de distribuição por emissor

O encapsulamento e descapsulamento dos pacotes de dados enviados pelo emissor para o RP, penalizam o desempenho dos *routers multicast* especialmente para ritmos de transmissão elevados. Para controlar esta situação, o protocolo PIM SM permite que o RP possa aderir à árvore de distribuição por emissor com origem no *router multicast* da rede local onde está localizado o emissor. Para isso, o RP cria na sua tabela de encaminhamento *multicast* o estado (S,G), onde S identifica o endereço IP *unicast* do emissor e G representa o endereço IP

*multicast* que identifica o grupo pretendido e envia periodicamente uma mensagem *Join* (S,G), contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor. Associado a cada estado (S,G), está o endereço IP *unicast* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor, a interface de entrada e as interfaces de saída por onde são encaminhados os pacotes de dados destinados ao grupo G. Uma vez criada a árvore de distribuição por emissor do DR da rede do emissor para o RP, o DR encaminha os pacotes de dados enviados pelo emissor de duas formas: (i) continua a usar mensagens *Register* e (ii) usa a árvore de distribuição por emissor. A partir do momento em que o RP recebe os pacotes de dados em duplicado, envia uma mensagem *Register-Stop* para o DR do emissor, informando-o desta forma que deve parar de encaminhar pacotes de dados encapsulados em mensagens *Register*, passando apenas a encaminhar os pacotes através da árvore de distribuição por emissor. A Figura 75 ilustra o mecanismo de adesão do *router* R5 (RP) à árvore de distribuição por emissor (com origem no *router* R1).

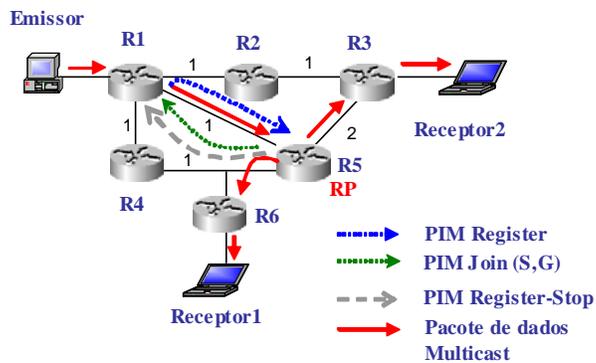


Figura 75 – PIM SM: Adesão do RP à árvore de distribuição por emissor

A mensagem *Register-Stop*, também é usada em cenários em que um emissor começa a enviar pacotes de dados destinados a um grupo *multicast* que não tenha uma árvore de distribuição central criada. O DR da rede do emissor envia uma mensagem *Register* (com os pacotes de dados encapsulados) para o RP e este responde-lhe com uma mensagem *Register-Stop*, evitando desta forma que o DR continue a mandar mensagens *Register* desnecessárias. O DR do emissor ao receber uma mensagem *Register-Stop* activa um contador temporal, durante o qual não envia mensagens *Register* com os pacotes de dados encapsulados. Durante esse período, envia periodicamente mensagens *Register-Null* (mensagens sem pacotes de dados encapsulados) destinadas ao RP, às quais o RP lhe continua a responder com mensagens *Register-Stop* enquanto não tiver a árvore de distribuição central criada. Desta forma o DR acelera o processo de descoberta da criação da árvore de distribuição central para o grupo em questão,

sem ocupar largura de banda com mensagens *Register* (com pacotes de dados encapsulados). Enquanto o emissor enviar pacotes de dados, o envio periódico de mensagens *Register-Null* e a consequente resposta (mensagem *Register-Stop*) é realizado, mesmo na situação em que o RP recebe os pacotes de dados encaminhados pela árvore de distribuição por emissor.

### 3. Adesão do DR do receptor à árvore de distribuição por emissor

O protocolo PIM SM permite que o DR de cada receptor abandone a árvore de distribuição central e passe a receber os pacotes de dados através da árvore de distribuição por emissor, sempre que for ultrapassado um determinado nível de tráfego *multicast* recebido. Desta forma, a carga do RP é aliviada e existe uma otimização dos recursos da rede. Na comutação para a árvore de distribuição por emissor, o DR cria o estado (S,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast* e envia periodicamente uma mensagem *Join* (S,G) contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor ( Figura 76).

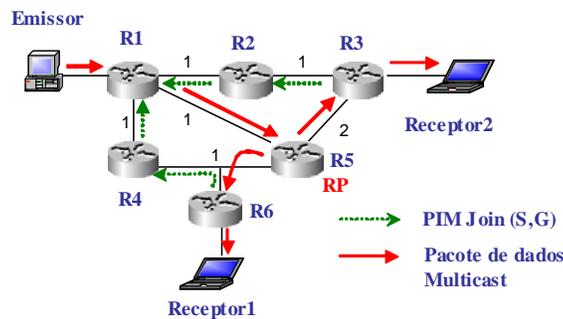


Figura 76 – PIM SM: Adesão do DR do receptor à árvore de distribuição por emissor

A partir do momento em que o DR recebe os pacotes de dados em duplicado, encaminhados pela árvore de distribuição central e pela árvore de distribuição por emissor, envia uma mensagem *Prune* (S,G) contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP. A mensagem *Prune* (S,G) cancela a mensagem *Join* (\*,G) e impede que os pacotes de dados (S,G) sejam encaminhados pela árvore de distribuição central. O RP ao receber a mensagem *Prune*, se não tiver mais nenhum membro da árvore de distribuição central interessado em receber pacotes dados destinados ao grupo G, envia uma mensagem *Prune* (S,G) contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor, deixando de pertencer à árvore de distribuição por emissor (Figura 77).

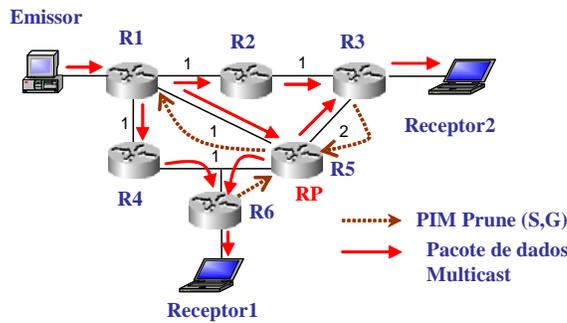


Figura 77 – PIM SM: Mecanismo de corte de um membro da árvore

Depois de abandonar a árvore de distribuição central, os pacotes de dados enviados pelo emissor são apenas encaminhados pela árvore de distribuição por emissor. A Figura 78 ilustra esta situação, onde os pacotes enviados pelo Emissor são encaminhados pela árvore de distribuição por emissor composta pelos *routers* R1, R2, R3, R4 e R6 até atingirem o Receptor1 e o Receptor2.

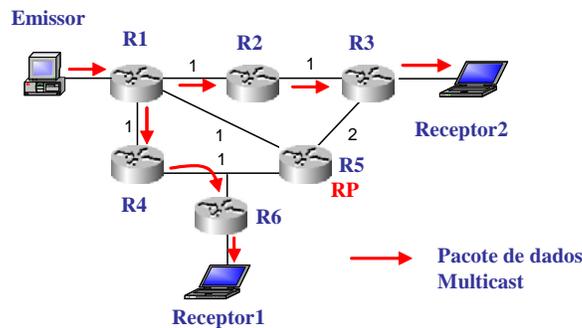


Figura 78 – PIM SM: Encaminhamento dos pacotes na árvore de distribuição por emissor

Note-se que apesar de não estar ilustrada nesta figura, a árvore de distribuição central relativa ao grupo G continua a existir para outros emissores que possam surgir.

#### 4. Corte de um membro da árvore

Quando um receptor pretende abandonar uma sessão *multicast*, se nenhum outro receptor interessado em receber dados destinados ao mesmo grupo G existir nessa rede, o DR envia uma mensagem *Prune* (\*,G) contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP e por cada árvore de distribuição por emissor que entretanto seja criada, envia uma mensagem *Prune* (S,G) pela interface RPF contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor. Por um lado, se o vizinho PIM não tiver nenhuma interface na sua lista de interfaces de saída, a mensagem *Prune* continua a ser encaminhada até ao RP (no caso da árvore de distribuição central) ou até ao DR de cada

emissor (no caso da árvore de distribuição por emissor). Por outro lado, se o vizinho PIM tiver uma interface associada ao estado (\*,G) ou ao estado (S,G), irá apenas remover a interface por onde recebeu a mensagem *Prune* da sua lista de interfaces de saída. Para redes intermédias partilhadas é importante esperar um certo período de tempo até que o processo de corte seja concluído uma vez que podem chegar mensagens *Join* de um outro vizinho PIM, indicando desta forma que o membro da árvore não pode ser cortado.

#### 5. Mecanismos de descoberta do RP

Os *routers multicast* que executam o protocolo PIM SM têm que conhecer qual o endereço IP *unicast* do RP a usar para um determinado grupo *multicast*. Existem três mecanismos para resolver esta questão: (i) configuração estática, (ii) mecanismo de *Bootstrap* e (iii) mecanismo *Embedded-RP*. Os dois primeiros existem tanto em redes IPv4 como em redes IPv6. O último é apenas possível em redes IPv6. De seguida, os três mecanismos são descritos separadamente.

##### ► **Configuração estática**

O mecanismo de configuração estática do RP passa por configurar, de uma forma manual em todos os *routers multicast*, o endereço IP *unicast* do RP e a(s) gama(s) de grupos *multicast* que serve. Por um lado, com este mecanismo a configuração é feita de uma forma simples e é possível suportar qualquer esquema de atribuição de grupos *multicast* a serem servidos por um RP. Por outro lado, em redes com muitos *routers multicast* é necessário um grande esforço na configuração de todos os *routers*. Para além disso, este mecanismo não tem qualquer suporte a tolerância de falhas, uma vez que se o RP configurado falhar deixa-se de suportar as comunicações *multicast*, sendo necessário configurar em todos os *routers multicast* da rede o novo RP a usar.

##### ► **Mecanismo de *Bootstrap***

O mecanismo de *Bootstrap* [BOOTSTRAP] permite que todos os *routers*, que executem o protocolo PIM SM, conheçam de uma forma dinâmica e rápida qual a(s) gama(s) de grupos *multicast* servidas por um ou mais RP's. Para que seja possível implementar este mecanismo, é necessário que todos os *routers multicast* tenham a capacidade de processar as mensagens *Bootstrap*.

Numa rede, podem ser configurados vários *routers multicast* como candidatos a *Bootstrap Router* (BSR), assumindo-se inicialmente cada um como o BSR da rede. Através de mensagens PIM

*Hello* cada *router* conhece os seus vizinhos PIM. Os candidatos a BSR enviam mensagens *Bootstrap* para o endereço destino ALL PIM ROUTERS, pelo que todos os *routers multicast* dessa rede processam essas mensagens. O BSR eleito, é aquele que tiver maior prioridade<sup>6</sup> configurada. Em caso de igual prioridade, o factor de desempate é baseado no endereço IP, sendo eleito o *router* que tiver o maior endereço IP *unicast*. Ao BSR eleito, compete a função de enviar mensagens *Bootstrap* em todas as interfaces onde existam vizinhos PIM. Cada *router multicast*, regista qual é o BSR eleito e encaminha as mensagens *Bootstrap* para os seus vizinhos PIM, apenas se forem recebidas pela interface RPF (para o BSR). As mensagens que chegam por outra interface são descartadas, evitando-se desta forma a formação de ciclos. A partir desta fase, cada candidato a BSR deixa de enviar mensagens *Bootstrap*, limitando-se apenas a encaminhar as mensagens enviadas pelo BSR eleito. No entanto, aguarda um determinado período de tempo, ao fim do qual se não receber mensagens do BSR eleito, assume-se como o BSR da rede.

À semelhança do que acontece com os candidatos a BSR, numa rede também se podem configurar vários *routers multicast* como candidatos a RP, o que permite prevenir eventuais falhas do RP eleito para uma determinada gama *multicast*, dado que é possível vários RP servirem os mesmos grupos *multicast*. A existência de múltiplos candidatos a RP, conjugado com a definição de regiões administrativas, permite também fazer o balanceamento de carga entre os múltiplos RP's. Este assunto, no entanto, não foi endereçado no âmbito desta dissertação.

Cada candidato a RP, ao conhecer o BSR eleito envia-lhe periodicamente (através do encaminhamento *unicast*) uma mensagem *Candidate-RP-Advertisements* com a informação da gama *multicast* que serve. Compete ao BSR enviar a informação do RP nas mensagens *Bootstrap*, possibilitando que todos os *routers* da rede conheçam de uma forma dinâmica qual o RP a usar para determinados grupos *multicast*. Se mais do que um candidato a RP servir a mesma gama, o RP eleito é o que tiver maior prioridade<sup>7</sup> e em caso de igual prioridade, é eleito o que tiver o maior endereço IP *unicast*. O BSR regista o endereço IP *unicast* do RP, a gama *multicast* e o tempo de vida (*holdtime*), contidos na mensagem *Candidate-RP-Advertisements*. Ao fim do período de tempo (dado pelo *holdtime* da mensagem *Candidate-RP-Advertisement*), se não receber

---

<sup>6</sup> O valor '0' é assumido como o de menor prioridade.

<sup>7</sup> O valor '0' é assumido como o de maior prioridade.

mais mensagens *Candidate-RP-Advertisement* relativo a esse RP, deixa de o incluir nas mensagens *Bootstrap*.

O mecanismo de *Bootstrap* requer pouca configuração (excepto nos candidatos a BSR e nos candidatos a RP) e permite tolerância a falhas, à custa do aumento da complexidade do funcionamento do protocolo PIM SM.

#### ► Mecanismo *Embedded-RP*

O mecanismo *Embedded-RP* [RFC 3956] permite incluir o endereço IPv6 *unicast* do RP (que serve um determinado grupo *multicast*) no endereço IPv6 *multicast* que identifica esse grupo. Para este mecanismo foi definida uma gama de endereços IPv6 *multicast* (explicada na secção 2.2.2).

Com a utilização do mecanismo de *Embedded-RP*, não se torna necessário usar outros mecanismos de configuração do RP (como por exemplo o mecanismo *Bootstrap*), uma vez que o endereço de cada grupo *multicast* especifica qual o RP a usar. A divulgação do endereço IPv6 *multicast* que identifica o grupo *multicast* e inclui o endereço do RP, pode ser feita através de páginas Web ou através de anúncios SDR.

Uma das principais desvantagens deste mecanismo é que o endereço do RP torna-se globalmente visível, tornando o RP um alvo fácil a ataques de segurança. Para além disso, como este mecanismo usa apenas uma determinada gama de endereços IPv6 *multicast* (descrita na secção 2.2.2), é sempre necessário recorrer a outro mecanismo para as restantes gamas. pode ser necessário usar um outro mecanismo de configuração do RP. Apesar deste facto, este mecanismo tem como grande motivação resolver as questões do encaminhamento *multicast* entre diferentes sistemas autónomos, como será explicado no capítulo 5 (secção 5.2.1).

## 4.5. PIM *Source Specific Mode* (PIM SSM)

Os protocolos de encaminhamento *multicast* descritos anteriormente são usados apenas para as comunicações *multicast* do modelo ASM, onde a rede é responsável por determinar a localização de todos os emissores que enviam dados para um determinado grupo *multicast* que seja de interesse para os receptores. Enquanto que o processo de descoberta de emissores no protocolo PIM DM consiste simplesmente na inundação dos pacotes de dados enviados pelos emissores para um determinado grupo *multicast* por toda a rede, permitindo que os *routers*

*multicast* conheçam o endereço IP *unicast* do emissor, no protocolo PIM SM a complexidade aumenta uma vez que o RP tem que conhecer todos os emissores e todos os *routers multicast* têm que conhecer o RP, de forma a criarem inicialmente as árvores de distribuição central.

Em cenários com vários emissores que não estão permanentemente a enviar dados, como por exemplo uma vídeo conferência, o modelo ASM é o mais aconselhado. No entanto, em cenários onde existe um emissor a enviar para múltiplos receptores, o modelo SSM pode facilitar a integração de diversas aplicações *multicast* com potencial comercial, como por exemplo a transmissão de um canal de televisão na Internet.

Com o aparecimento do modelo SSM, houve necessidade de criar protocolos de encaminhamento *multicast* que suportem as comunicações *multicast* para esse modelo, onde os receptores no processo de sinalização da rede para além de indicarem os grupos *multicast* de interesse, indicam também os emissores dos quais pretendem receber dados enviados para esses grupos. O protocolo PIM *Source Specific Mode* (PIM SSM) [PIMSSM] é o protocolo de encaminhamento *multicast* actualmente usado no modelo SSM. Apesar de se basear no funcionamento do protocolo PIM SM, este protocolo não usa árvores de distribuição central, nem exige a configuração de um RP e a utilização de mensagens *Register*. Para o encaminhamento dos pacotes de dados são usadas árvores de distribuição por emissor, uma vez que o *router multicast* que serve o receptor conhece qual é o endereço IP *unicast* do emissor pretendido.

Cada *router multicast* encaminha os pacotes de dados recebidos na sua interface RPF (para o emissor), em todas as suas interfaces de saída onde existam vizinhos PIM ou receptores que manifestem interesse em receber os pacotes de dados destinados a um grupo *multicast*, enviados por um determinado emissor. Por cada emissor que envie dados destinados a um determinado grupo, é criada uma árvore de distribuição por emissor. O protocolo PIM SSM funciona apenas numa gama de endereços definida para o modelo SSM, tal como foi explicado no capítulo 2 (secção 2.2.2).

A descoberta dos vizinhos PIM e o processo de eleição do DR numa ligação onde existe mais do que um *router multicast*, é feito tal como foi explicado para o protocolo PIM SM. O mecanismo de *Assert*, também existe no PIM SSM com o mesmo modo de funcionamento que foi descrito no protocolo PIM DM embora se verifique apenas em redes intermédias partilhadas.

Sempre que um receptor pretender aderir a uma sessão *multicast* sinaliza a rede através do protocolo IGMPv3 (para IPv4) ou MLDv2 (para IPv6), informando o seu DR do grupo *multicast* (G) ao qual pretende aderir e do endereço ( $S_1, S_2, \dots$ ) dos emissores dos quais pretende receber dados, ou dos quais não pretende receber dados. O DR ao ser sinalizado, cria na sua tabela de encaminhamento *multicast* os estados ( $S_1, G$ ), ( $S_2, G$ ), etc..., inclui a interface por onde recebe as mensagens de sinalização na sua lista de interfaces de saída para cada estado, analisa a MRIB para determinar qual é o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para cada emissor e envia periodicamente uma mensagem *Join* ( $S_i, G$ ) contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para cada emissor  $i$ .

Associado a cada estado ( $S, G$ ) está o endereço IP *unicast* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor, a interface de entrada e as interfaces de saída por onde são encaminhados os pacotes de dados enviados pelo emissor (S) e destinados ao grupo *multicast* (G).

Quando um vizinho PIM recebe uma mensagem *Join* ( $S, G$ ), verifica se o estado ( $S, G$ ) já está presente na sua tabela de encaminhamento *multicast*. Caso exista, significa que a mensagem *Join* ( $S, G$ ) atingiu a árvore de distribuição por emissor e a interface pela qual foi recebida a mensagem *Join* é adicionada à lista de interfaces de saída para esse estado ( $S, G$ ). Caso não exista, é criado o novo estado ( $S, G$ ) na tabela de encaminhamento *multicast*, a interface é incluída na lista de interfaces de saída para esse estado e a mensagem *Join* ( $S, G$ ) é enviada contendo o endereço do seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor. Quando o estado ( $S, G$ ) for criado no último *router multicast* do caminho de custo mínimo para o emissor, significa que a árvore de distribuição por emissor foi criada, podendo a partir deste momento ser feito o encaminhamento dos pacotes de dados enviados pelo emissor (S) para o grupo (G).

A Figura 79 ilustra a construção de duas árvores de distribuição por emissor num cenário composto por dois emissores (S1 e S2) que enviam dados para grupos *multicast* distintos (G1 e G2) e por um receptor, que pretende receber os dados destinados aos dois grupos enviados pelos dois emissores.

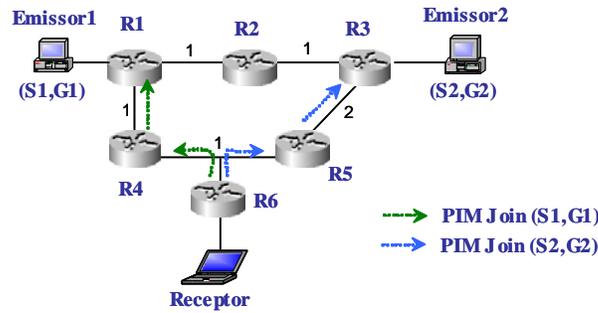


Figura 79 – PIM SSM: Construção da árvore de distribuição por emissor

O *router* R6 é membro das duas árvores *multicast* porque é o DR do receptor que pretende receber os dados enviados pelo Emissor1 (S1) destinados ao grupo G1 e pretende também receber os dados enviados pelo Emissor2 (S2) destinados ao grupo G2. Por este motivo, a tabela de encaminhamento *multicast* do *router* R6 é composta pelos estados (S1,G1) e (S2,G2). Uma vez criada a árvore *multicast* composta pelos *routers* R1 (origem da árvore), R4 e R6, os pacotes de dados enviados pelo Emissor1 são encaminhados até ao Receptor.

Da mesma forma, ao ser criada a árvore *multicast* composta pelos *routers* R3 (origem da árvore), R5 e R6, os pacotes de dados enviados pelo Emissor2 são encaminhados até ao Receptor. A Figura 80 ilustra o encaminhamento dos pacotes de dados enviados pelos Emissor1 e Emissor2.

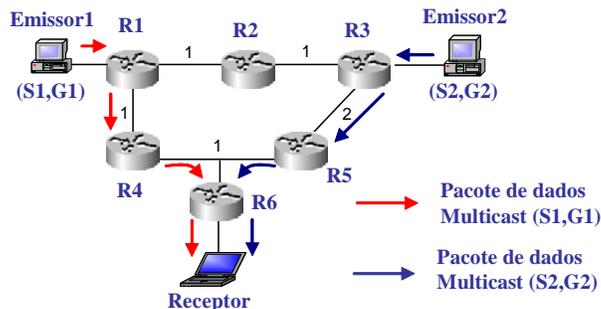


Figura 80 – PIM SSM: Encaminhamento dos pacotes de dados

O processo de corte de um membro de uma árvore *multicast* é o mesmo do explicado para o protocolo PIM SM. A Figura 81 ilustra o cenário em que o receptor pretende deixar de receber os pacotes de dados destinados ao grupo G2 enviados pelo Emissor2 (S2).

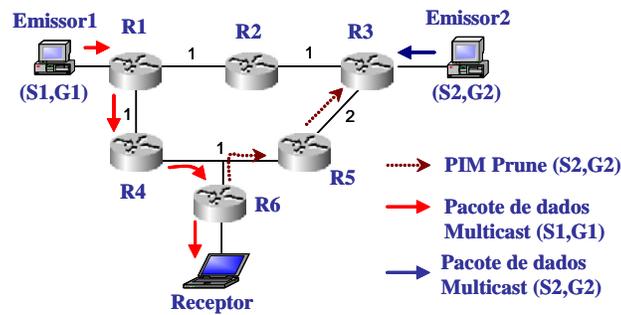


Figura 81 – PIM SSM: Mecanismo de corte de um membro da árvore

O receptor sinaliza a rede (através do protocolo de sinalização IGMPv3 ou MLDv2) que pretende abandonar a sessão *multicast* do Emissor2. O *router* R6 como não tem mais receptores interessados nessa sessão *multicast*, apaga o estado (S2,G2) da sua tabela de encaminhamento *multicast* e envia uma mensagem *Prune* (S2,G2) contendo o endereço do *router* R5 (que é o seu vizinho PIM no caminho do custo mínimo para o Emissor2). Por sua vez, o *router* R5 retira a interface que o liga ao *router* R6 da sua lista de interfaces de saída para o estado (S2,G2), apaga o estado da sua tabela de encaminhamento *multicast* e envia uma mensagem *Prune* (S2,G2) contendo o endereço do *router* R3 (origem da árvore). O processo de corte de um membro da árvore *multicast* continua até a origem da árvore receber uma mensagem *Prune*, ou até que a mensagem *Prune* seja dirigida a um *router multicast* que tenha a sua lista de interfaces de saída vazia para o estado (S2,G2), situação que não é ilustrada no exemplo apresentado.

Depois de cortado o membro da árvore *multicast* usada para encaminhar os pacotes de dados enviados pelo Emissor2, o receptor recebe apenas os pacotes de dados enviados pelo Emissor1.

## 4.6. Experiências práticas

Conforme descrito anteriormente, o funcionamento dos protocolos PIM DM, PIM SM e PIM SSM em redes IPv6 é semelhante ao funcionamento dos protocolos em redes IPv4. Assim, foram realizadas um conjunto de experiências práticas em redes IPv6, para os modelos ASM e SSM, considerando apenas um Sistema Autónomo e as conclusões que se retiram são extensíveis às redes IPv4. Nesta secção designa-se por PIMv6 ao protocolo PIM usado em redes IPv6, embora a versão do protocolo PIM seja a versão 2.

No modelo ASM, foram realizadas experiências práticas com os protocolos PIMv6 DM e PIMv6 SM. Relativamente ao protocolo PIMv6 SM, realizaram-se várias experiências de forma a ilustrar a maior complexidade do seu funcionamento. Numa dessas experiências, foi usado o mecanismo *Bootstrap* que permite que todos os *routers* que executem o protocolo PIMv6 SM conheçam de uma forma dinâmica e rápida, qual o RP a usar para determinados grupos *multicast*. Não foram realizadas experiências práticas recorrendo ao mecanismo de configuração estática do RP, devido a problemas com esse mecanismo na implementação usada, nem experiências práticas com o mecanismo *embedded-RP*, porque a implementação usada não o suporta. Para o modelo SSM, foram realizadas experiências usando o protocolo PIMv6 SSM. O suporte simultâneo de sessões *multicast* ASM e SSM na mesma infra-estrutura, pode ser garantido recorrendo aos (i) protocolos PIMv6 DM e PIMv6 SSM, ou (ii) aos protocolos PIMv6 SM e PIMv6 SSM. Uma vez que o protocolo PIMv6 SM é mais utilizado do que o protocolo PIMv6 DM, especialmente em sessões *multicast* onde os receptores tenham uma localização dispersa (Internet), optou-se por configurar um cenário onde o suporte simultâneo das sessões *multicast* ASM e SSM é feito recorrendo aos protocolos PIMv6 SM e PIMv6 SSM.

O número de plataformas que executam os protocolos de encaminhamento *multicast* em redes IPv6 não é muito grande e por este motivo, foram usados como *routers multicast* estações FreeBSD 4.9 com a pilha *Kame* 26/07/2004. Os passos de instalação e configuração desta implementação encontram-se descritos no Anexo I. Os emissores e receptores usados nas experiências do modelo ASM são estações Windows XP que executam a aplicação *VideoLan0.7.2*<sup>8</sup> [VIDEOLAN]. Em contraste com o modelo ASM, onde existem várias aplicações para diferentes sistemas operativos, para o modelo SSM não existe uma grande variedade de aplicações. Por este motivo, houve a necessidade de usar estações FreeBSD 4.9 com a pilha *Kame* instalada que contém a aplicação *mcastsend*<sup>9</sup> (para emissores) e a aplicação *mcastread*<sup>10</sup> para receptores. Os *routers multicast* foram configurados para anunciar redes de 64 bits, possibilitando que os receptores adquiram de forma automática o endereço IPv6 *unicast global* (nas figuras que ilustram os cenários utilizados são apresentados os prefixos das redes e os 64 bits menos significativos dos endereços adquiridos que são construídos com base nos endereços MAC segundo a norma EUI-64).

---

<sup>8</sup> *VideoLan* – envio e recepção de áudio e vídeo.

<sup>9</sup> *Mcastsend* – envio do conteúdo de um ficheiro ou a informação passada por linha de comandos

<sup>10</sup> *Mcastread* – recepção do conteúdo de um ficheiro ou de informação passada por linha de comandos. Suporta o protocolo MLD e o protocolo MLDv2

### 4.6.1. Cenário PIMv6 DM

De forma a analisar o comportamento do protocolo PIMv6 DM, em particular: (i) o processo de descoberta de vizinhos PIM e eleição do *Designated Router* (DR) numa rede servida por mais do que um *router*, (ii) a criação de árvores de distribuição por emissor, (iii) o mecanismo de corte de membros da árvore *multicast*, (iv) o mecanismo de *Assert* e (v) o enxerto de membros da árvore previamente cortados, configurou-se em laboratório a rede da Figura 82, composta por um emissor, dois receptores e cinco *routers multicast*.

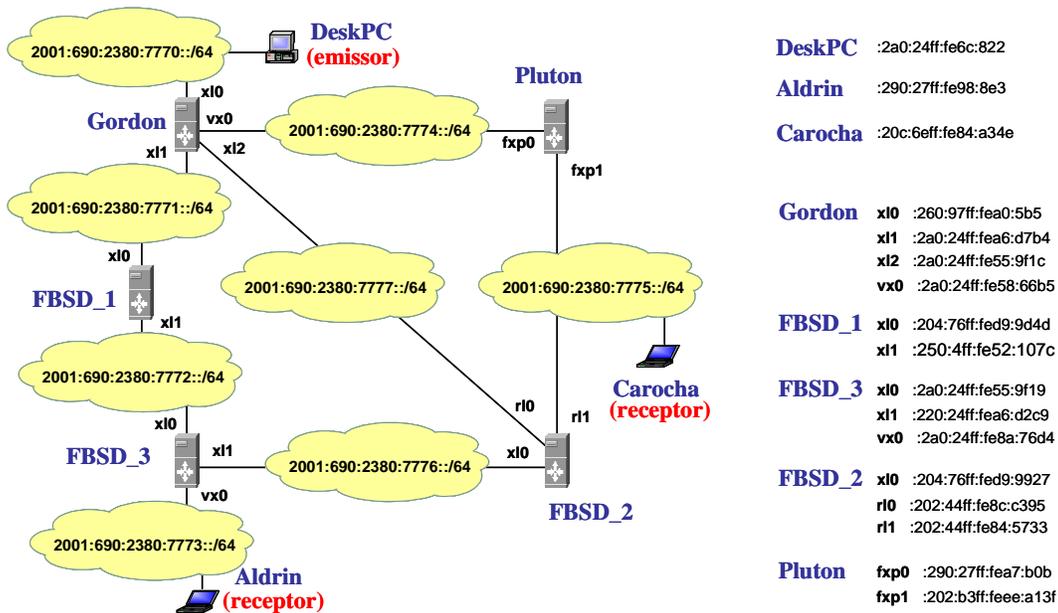


Figura 82 – Cenário PIMv6 DM

#### Configurações:

Para o encaminhamento *unicast* foi usado o protocolo *Open Shortest Path First version 3* (OSPFv3) [RFC 2740] disponível no *software Zebra* [ZEBRA], já que o sistema operativo FreeBSD não implementa este protocolo.

As configurações do protocolo PIMv6 DM (ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6dd.conf`) foram as que se apresentam de seguida. Para cada um dos *routers*, configurou-se a versão MLD.

<b>Gordon:</b> phyint x10 mld_version 1; phyint x11 mld_version 1; phyint x12 mld_version 1; phyint vx0 mld_version 1;	<b>FBSD_1:</b> phyint x10 mld_version 1; phyint x11 mld_version 1;	<b>Pluton:</b> phyint fxp0 mld_version 1; phyint fxp1 mld_version 1;
<b>FBSD_2:</b> phyint x10 mld_version 1; phyint r10 mld_version 1; phyint r11 mld_version 1;	<b>FBSD_3:</b> phyint x10 mld_version 1; phyint x11 mld_version 1; phyint vx0 mld_version 1;	

Procedimento experimental:

1. Depois de activar o encaminhamento *unicast*, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers* executando para isso o comando:

```
/usr/local/v6/sbin/pim6dd -c /usr/local/v6/etc/pim6dd.conf
```

A partir desta fase, todos os *routers* enviam periodicamente (de 30 em 30 segundos) mensagens *Hello* (Figura 83) nas suas interfaces, conhecendo desta forma quais os vizinhos PIM nas suas interfaces e elegendo o DR de cada rede local servida por mais do que um *router*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
117	87.322479	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2	Hello
146	109.36959	fe80::202:44ff:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Hello
160	117.38592	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2	Hello
192	139.43352	fe80::202:44ff:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Hello

Frame 192 (64 bytes on wire, 64 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: SurecomT\_84:57:33 (00:02:44:84:57:33), Dst: IPv6-Neighbor  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:0d [33:33:00:00:00:0d]  
 Source: SurecomT\_84:57:33 (00:02:44:84:57:33)  
 Type: IPv6 (0x86dd)

Internet Protocol Version 6  
 version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x000000  
 Payload length: 10  
 Next header: PIM (0x67)  
 Hop limit: 1  
 Source address: fe80::202:44ff:fe84:5733  
 Destination address: ff02::d

Protocol Independent Multicast  
 version: 2  
 Type: Hello (0)  
 Checksum: 0x44d8 [correct]

PIM parameters  
 Holdtime (1): 105s

Annotations:  
 - Endereço MAC *multicast* para o endereço FF02::d (points to destination)  
 - Endereço IPv6 *unicast link-local* (Interface r11 FBSD\_2) (points to source address)  
 - Grupo All PIM Routers (points to destination)  
 - Tipo de Mensagem PIM (points to Type: Hello)  
 - Tempo de vida da mensagem (points to Holdtime)

Figura 83 – Mensagens *Hello* enviadas pelos *routers* FBSD\_2 e Pluton

A figura anterior apresenta as mensagens *Hello* enviadas pelos *routers* FBSD\_2 e Pluton na rede 2001:690:2380:7775::/64, verificando-se também o envio de mensagens *Hello* nas restantes redes. O tempo de vida (105 segundos especificado no campo *Holdtime*) de um vizinho PIM é actualizado por cada mensagem *Hello* que envie e, uma vez expirado, os *routers* sabem que deixou de existir um vizinho PIM.

Através do comando **pim6stat -d** pode-se analisar a informação *multicast* do *router* Pluton, sendo a informação dos restantes *routers* semelhante à apresentada:

Multicast Interface Table					
Mif	PhyIF	Local-Address/Prefixlen	Flags	Neighbors	
0	fxp0	2001:690:2380:7774:290:27ff:fea7:b0b/64	PIM QRY	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	
		fe80::290:27ff:fea7:b0b/64			
1	fxp1	2001:690:2380:7775:202:b3ff:feee:a13f/64	DR PIM	fe80::202:44ff:fe84:5733	
		fe80::202:b3ff:feee:a13f/64			

MLD Querier List				
Mif	PhyIF	Address	Timer	Last
0	fxp0	fe80::290:27ff:fea7:b0b	255	4m16s
1	fxp1	fe80::202:44ff:fe84:5733	245	2m14s

A tabela *Multicast Interface Table* apresenta a informação relativa às interfaces que suportam *multicast*. Neste caso, para a interface *fxp1*, essa informação é composta pelo número da interface, pelo seu endereço IPv6 *unicast global* (2001:690:2380:7775:202:b3ff:feee:a13f), pelo seu endereço IPv6 *unicast link-local* (fe80::202:b3ff:feee:a13f) e pelos endereços IPv6 *link-local* dos seus vizinhos PIM (no caso da interface *fxp1*, o endereço fe80::202:44ff:fe84:5733 que corresponde à interface *r11* do *router* FBSD\_2). O campo *Flags* indica que o *router* Pluton (na interface *fxp1*) assume o papel de DR dessa rede uma vez que, através da análise dos endereços de origem das mensagens *Hello* que circulam na rede, conclui que o seu endereço IPv6 *unicast link-local* é maior do que o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *r11* do *router* FBSD\_2 (fe80::202:b3ff:feee:a13f > fe80::202:44ff:fe84:5733).

A tabela *MLD Querier List* apresenta a lista de interfaces onde são enviadas as mensagens MLD *Query* e os respectivos tempos de vida.

2. De seguida, configurou-se a aplicação *VideoLan* no emissor DeskPC para enviar pacotes de dados para o grupo FF0e::77:1111. Nesta fase, apesar de nenhum dos receptores ter ainda manifestado qualquer interesse em participar na sessão *multicast*, verifica-se que cada *router multicast* ao receber um pacote de dados enviado pelo emissor DeskPC (Figura 84), cria o estado (S,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast* e encaminha os pacotes de dados para todas as suas interfaces onde existam vizinhos PIM (com excepção da interface onde recebeu o pacote), podendo o mesmo pacote ser encaminhado por vários *routers* que estejam presentes na mesma rede local. Esta situação é observada na rede 2001:690:2380:7775::/64, onde o mesmo pacote de dados aparece em duplicado, encaminhado pelo *router* Pluton (Figura 85) e pelo *router* FBSD\_2 (Figura 86).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol
37	186.15413	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP
+ Frame 37 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)				
- Ethernet II, Src: 3com_6c:82:22 (00:a0:24:6c:82:22), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.				
Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)				
source: 3com_6c:82:22 (00:a0:24:6c:82:22)				
Type: IPv6 (0x86dd)				
- Internet Protocol version 6				
Version: 6				
Traffic class: 0x00				
Flow label: 0x0000				
Payload length: 1324				
Next header: UDP (0x11)				
Hop limit: 64				
Source address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222				
Destination address: ff0e::77:1111				
- User Datagram Protocol, Src Port: 1089 (1089), Dst Port: 1234 (1234)				
Source port: 1089 (1089)				
Destination port: 1234 (1234)				
Length: 1324				
Checksum: 0xd147 [correct]				
Data (1316 bytes)				

Figura 84 – Pacote de dados enviados pelo emissor DeskPC

No. -	Time	Source	Destination	Protocol
244	176.53841	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP

Frame 244 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: Intel\_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)  
 Source: Intel\_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f) → Endereço MAC da interface *fxp1* do Pluton  
 Type: IPv6 (0x86dd)  
 Internet Protocol Version 6  
 User Datagram Protocol, Src Port: 1089 (1089), Dst Port: 1234 (1234)  
 Source port: 1089 (1089)  
 Destination port: 1234 (1234)  
 Length: 1324  
 Checksum: 0xd147 [correct] → Identificação do pacote de dados  
 Data (1316 bytes)

Figura 85 – Encaminhamento do pacote de dados através do *router* Pluton

No. -	Time	Source	Destination	Protocol
245	176.54140	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP

Frame 245 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: SurecomT\_84:57:33 (00:02:44:84:57:33), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.  
 Destination: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)  
 Source: SurecomT\_84:57:33 (00:02:44:84:57:33) → Endereço MAC da interface *r11* do FBSD\_2  
 Type: IPv6 (0x86dd)  
 Internet Protocol Version 6  
 User Datagram Protocol, Src Port: 1089 (1089), Dst Port: 1234 (1234)  
 Source port: 1089 (1089)  
 Destination port: 1234 (1234)  
 Length: 1324  
 Checksum: 0xd147 [correct] → Identificação do pacote de dados  
 Data (1316 bytes)

Figura 86 – Encaminhamento do pacote de dados através do *router* FBSD\_2

Através do endereço de origem MAC (assinalado nas figuras) pode-se distinguir qual dos *routers* faz o encaminhamento dos pacotes de dados. A identificação destes pacotes é feita através do campo *Checksum* do protocolo UDP. Na rede 2001:690:2380:7776::/64, verifica-se a mesma situação de duplicação do mesmo pacote de dados.

O *router* FBSD\_2 ao receber o mesmo pacote de dados pela interface, que não é a interface RPF para o emissor, envia uma mensagem *Assert* (pacote 246 da Figura 87). Pela mesma razão, o *router* Pluton envia também uma mensagem *Assert* (pacote 247 da Figura 87).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol
244	176.538415	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP
245	176.541405	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP
246	176.541408	fe80::202:44ff:fe84:5733	ff02::d	PIMv2 Assert
247	176.541410	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2 Assert

Frame 247 (104 bytes on wire, 104 bytes captured)  
 Ethernet II, src: Intel\_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:0d (33:33:00:00:00:0d)  
 Internet Protocol Version 6  
 Protocol Independent Multicast  
 Version: 2  
 Type: Assert (5) → Tipo de Mensagem PIM  
 Checksum: 0x0379 [correct]  
 PIM parameters  
 Group: ff0e::77:1111/128 → Grupo *multicast*  
 source: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222 → Endereço IPv6 *unicast* do Emissor  
 0... 0... = Not RP Tree  
 Preference: 101  
 Metric: 1024

```

0000 33 33 00 00 0d 00 02 b3 ee a1 3f 86 dd 60 00 33.....?..
0010 00 00 00 32 67 01 fe 80 00 00 00 00 00 02 02 ...2g.....
0020 b3 ff fe ee a1 3f ff 02 00 00 00 00 00 00 00 .....?.....
0030 00 00 00 00 0d 25 00 03 79 02 00 00 80 ff 0e .....%.y.....
0040 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 77 11 11 02 00 .....w.....
0050 20 01 06 90 23 80 77 70 02 a0 24 ff fe 6c 82 22 ...#.wp...$.l.
0060 00 00 00 65 00 00 04 00 .....e....
  
```

Figura 87 – Troca de mensagens *Assert* entre os *routers* FBSD\_2 e Pluton

Como ambos os *routers* usam o mesmo protocolo de encaminhamento *unicast* com a mesma preferência e com a mesma métrica para o emissor, o *router* eleito para encaminhar os pacotes para a rede é o *router* Pluton (já que tem o maior endereço IPv6 *unicast link-local*). O *router* FBSD\_2, ao verificar a mensagem *Assert* enviada pelo *router* Pluton coloca a sua interface *r11* no estado *Pruned* e deixa de encaminhar os pacotes de dados para essa rede.

Enquanto o encaminhamento dos pacotes de dados estiver a cargo do *router* Pluton, o *router* FBSD\_2 envia periodicamente (de 5 em 5 segundos) uma mensagem *Assert*, à qual o *router* Pluton lhe responde também com uma mensagem *Assert* (Figura 88). Desta forma, o *router* que perdeu a eleição do encaminhamento dos pacotes, controla se em algum momento pode passar a ser o eleito para encaminhar os pacotes para a rede.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
706	248.920386	fe80::202:4411:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Assert
707	248.920389	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2	Assert
882	253.908036	fe80::202:4411:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Assert
883	253.908038	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2	Assert

Figura 88 – Periodicidade das mensagens *Assert*

3. Nesta fase, ainda nenhum dos receptores (Aldrin e Carocha) manifestou interesse em aderir à sessão *multicast*, verificando-se o envio de mensagens *Prune* (por parte dos *routers*) de forma a evitar o encaminhamento desnecessário dos pacotes de dados. Na rede 2001:690:2380:7775::/64, o *router* Pluton envia uma mensagem *Prune* (Figura 89) contendo o seu próprio endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *fxp1* no campo do vizinho PIM (do caminho de custo mínimo para o emissor DeskPC) retirando esta rede da árvore de distribuição por emissor. Note-se que o *router* FBSD\_2 não envia qualquer mensagem *Prune* porque colocou previamente a sua interface no estado *Pruned* (resultante do mecanismo *Assert*).

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
248	176.541413	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

⊕ Frame 248 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)  
 ⊕ Ethernet II, Src: Intel\_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.  
 ⊕ Internet Protocol Version 6  
 ⊕ Protocol Independent Multicast  
   Version: 2  
   Type: Join/Prune (3) → Tipo de Mensagem PIM  
   Checksum: 0xb1c4 [correct]  
   ⊕ PIM parameters  
     Upstream-neighbor: fe80::202:b3ff:feee:a13f → Endereço IPv6 *unicast link-local* do vizinho PIM  
     Groups: 1  
     Holdtime: 210  
   ⊕ Group 0: ff0e::77:1111/128 → Grupo *multicast*  
     Join: 0  
     ⊕ Prune: 1 → Mensagem *Prune* → Endereço IPv6 *unicast* do Emissor  
     IP address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222/128

Figura 89 – Mensagem *Prune* enviada na interface *fxp1* do *router* Pluton

Na rede 2001:690:2380:7774::/64, o *router* Pluton envia uma mensagem *Prune* (pacote 176 da Figura 90) contendo o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *rx0* do *router* Gordon (que é

o seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor DeskPC) e o *router* Gordon envia também uma mensagem *Prune* (pacote 177 da Figura 90) contendo o seu próprio endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *vx0*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
176	188.52281	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
177	188.52314	fe80::2a0:24ff:fe58:66b5	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

```

⊞ Frame 176 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)
⊞ Ethernet II, Src: Intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.
⊞ Internet Protocol version 6
⊞ Protocol Independent Multicast
  version: 2
  Type: [Join/Prune (3)] → Tipo de Mensagem PIM
  Checksum: 0x9d35 [correct]
  ⊞ PIM parameters
    upstream-neighbor: fe80::2a0:24ff:fe58:66b5 → Endereço IPv6 unicast link-local do vizinho PIM
    Groups: 1
    Holdtime: 210
    ⊞ Group 0: [ff0e::77:1111/128] → Grupo multicast
      Join: 0
      ⊞ Prune: 1 → Mensagem Prune
        IP address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222/128 → Endereço IPv6 unicast do Emissor
  
```

Figura 90 – Mensagens *Prune* enviadas pelos *routers* Pluton e Gordon

Em todas as redes verificou-se o envio de mensagens *Prune* de forma semelhante à descrita anteriormente. Durante aproximadamente dois segundos depois do envio de mensagens *Prune*, continuaram a ser encaminhados pacotes de dados para a rede, permitindo desta forma que um *router* presente na rede com receptores interessados na sessão *multicast*, envie uma mensagem *Join* (S,G) para evitar que o membro da árvore seja cortado. Nesta fase, a informação *multicast* do *router* Gordon é a apresentada de seguida.

Multicast Interface Table					
Mif	PhyIF	Local-Address/Prefixlen	Flags	Neighbors	
0	x10	2001:690:2380:7770:260:97ff:fea0:5b5/64 fe80::260:97ff:fea0:5b5/64	DR NO-NBR	QRY	
1	x11	2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4/64 fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4/64	DR PIM	fe80::204:76ff:fed9:9d4d	
2	x12	2001:690:2380:7777:2a0:24ff:fe55:9f1c/64 fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c/64	DR PIM	fe80::202:44ff:fe8c:c395	
3	vx0	2001:690:2380:7774:2a0:24ff:fe58:66b5/64 fe80::2a0:24ff:fe58:66b5/64	DR PIM	fe80::290:27ff:fea7:b0b	

Multicast Routing Table					
Source	Group	Flags			
----- (S,G) -----					
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	SG			
Pruned oifs:	.ppp				
Asserted oifs:	...				
Outgoing oifs:	...				
Incoming	: I...				
Upstream nbr:	NONE				
TIMERS:	Entry Prune VIFS:	0 1 2 3			
	205	0 205 205 205			
Number of Groups:	1				

Todos os *routers multicast* mantêm nas suas tabelas de encaminhamento *multicast* o estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC (2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222) e ao grupo *multicast* (FF0e::77:1111). O conteúdo da tabela *Multicast Interface Table* já foi explicado anteriormente. Na tabela *Multicast Routing Table* é apresentada a informação das sessões *multicast* criadas.

Associado a cada estado (S,G), existem quatro entradas que apresentam informação relativa às interfaces que suportam *multicast*: (i) *Pruned oifs* (identificada pela letra ‘p’), representa as interfaces que estão no estado *Pruned*; (ii) *Asserted oifs* (identificada pela letra ‘p’), representa as interfaces que estão no estado *Pruned* provocado pelo mecanismo *Assert*; (iii) *Outgoing oifs* (identificada pela letra ‘o’), representa as interfaces de saída; (iv) *Incoming* (identificada pela letra ‘I’), representa a interface de entrada (interface RPF). Para além desta informação, é também apresentado (na entrada *Upstream nbr*) o endereço do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor, o tempo (na entrada *Timers*) durante o qual cada interface se encontra no estado *Pruned* (não faz o encaminhamento dos pacotes de dados) e o número de grupos *multicast* presentes na tabela (entrada *Number of Groups*).

No caso do *router* Gordon (apresentado anteriormente), foi criado o estado (S,G) composto pelo endereço IPv6 *unicast* do emissor DeskPC (2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222) e pelo endereço IPv6 *multicast* que identifica o grupo (FF0e::77:1111). Note-se que a tabela *Multicast Interface Table* apresenta a lista de interfaces do *router* e a cada uma das interfaces, é atribuído um número usado para identificar as interfaces nas entradas (da tabela *Multicast Routing Table*) que representam o estado das interfaces. A interface de entrada (RPF) é a interface *x10* e como é identificada pelo número ‘0’, aparece na primeira posição da entrada *Incoming*. As interfaces de saída *x11*, *x12* e *vx0* encontram-se no estado *Prune* e como são identificadas pelos números ‘1’, ‘2’ e ‘3’ respectivamente, aparecem nas segunda, terceira e quarta posições da entrada *Pruned oifs*. Neste caso, como o *router* Gordon se encontra localizado na mesma rede do emissor é ele a origem da árvore de distribuição do emissor DeskPC (*Upstream nbr*: NONE).

4. De seguida, executou-se a aplicação *VideoLan* no receptor Carocha para aderir ao grupo *multicast* FF0e::77:1111. Como nesta fase não existem pacotes de dados encaminhados nas redes, ou seja, as interfaces de saída para o estado (S,G) estão a *Pruned*, o *router* Pluton (eleito o DR) envia uma mensagem *Graft* (Figura 91) contendo o endereço do emissor DeskPC para o *router* Gordon, enxertando desta forma o membro previamente cortado da árvore de distribuição do emissor DeskPC.

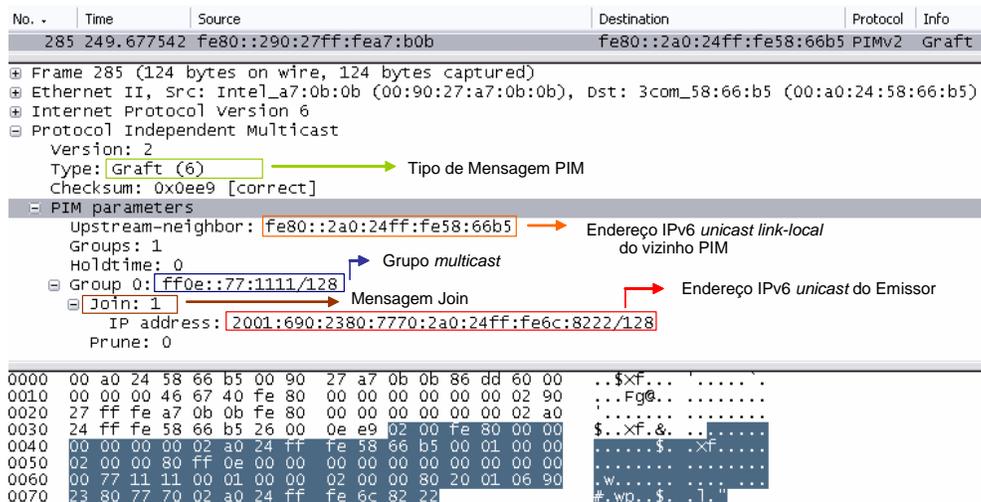


Figura 91 – Mensagem *Graft* enviada do *router* Pluton para o *router* Gordon

Em resposta à mensagem *Graft*, o *router* Gordon envia uma mensagem *Graft-Ack* (Figura 92) para o *router* Pluton, confirmando assim que a rede 2001:690:2380:7774::/64 pertence novamente à árvore *multicast*. Note-se que a informação relativa aos parâmetros PIM não é correctamente descodificada pelo analisador de protocolos *Ethereal*, mas comparando o campo hexadecimal da Figura 92 com o campo hexadecimal da Figura 91, verifica-se que a mensagem *Graft-Ack* contém os mesmos parâmetros da PIM da mensagem *Graft*.

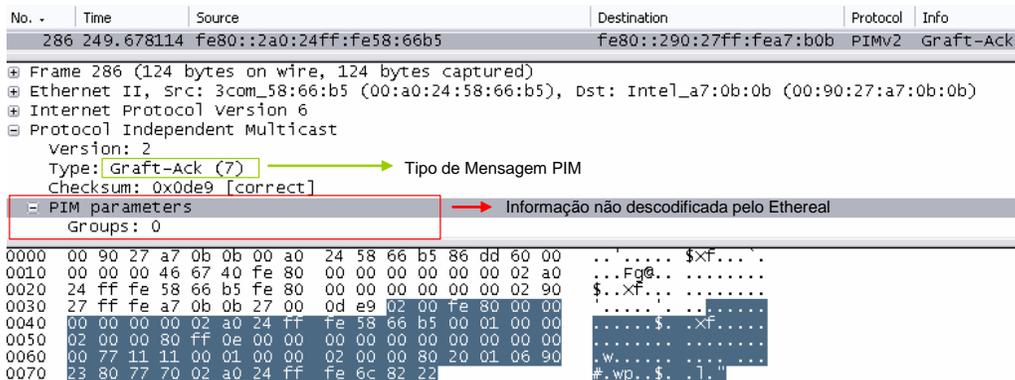


Figura 92 – Mensagem *Graft-Ack* enviada pelo *router* Gordon para o *router* Pluton

A partir deste momento, o *router* Gordon começa a encaminhar (pela interface *vx0*) os pacotes de dados enviados pelo emissor. Por sua vez, o *router* Pluton passa a encaminhar esses pacotes de dados para a rede do receptor Carocha. Durante esta fase e até expirar o tempo de vida das mensagens *Prune* nos restantes *routers* da rede, só existe encaminhamento de pacotes de dados para as redes 2001:690:2380:7774::/64 e 2001:690:2380:7775::/64.

5. Ao ser executada no receptor Aldrin a aplicação *VideoLan* para receber tráfego do grupo FF0e::77:1111, verifica-se o mesmo processo de enxerto (explicado no ponto anterior) de um membro da árvore *multicast* previamente cortado. Assim, o *router* FBSD\_3 coloca a interface *vx0* na sua entrada de interfaces de saída e envia uma mensagem *Graft* com destino ao *router* FBSD\_1 (vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor) e este, por sua vez, responde-lhe com uma mensagem *Graft-Ack* e coloca a interface *x11* na sua entrada de interfaces de saída. Para além disso, envia uma mensagem *Graft* com destino ao *router* Gordon, que por sua vez, lhe responde com uma mensagem *Graft-Ack* e coloca a interface *x11* na sua entrada de interfaces de saída. Uma vez enxertado o novo membro da árvore *multicast* composto pelas redes 2001:690:2380:7771::/64 e 2001:690:2380:7772::/64, o *router* FBSD\_1 recebe os pacotes de dados enviados pelo *router* Gordon e encaminha-os para a sua interface de saída *x11* que o liga ao *router* FBSD\_3, encarregando-se este de encaminhar os pacotes de dados para a interface *vx0* que serve a rede 2001:690:2380:7773::/64 e o receptor Aldrin passa a receber os pacotes de dados destinados ao grupo FF0e::77:1111.

A informação *multicast* relativa ao *router* FBSD\_3 é a apresentada de seguida. De notar que a interface *x11* se encontra na entrada *Asserted oifs*, já que não é a interface usada para encaminhar os pacotes de dados para a rede 2001:690:2380:7776::/64.

Multicast Interface Table				
Mif	PhyIF	Local-Address/PrefixLen	Flags	Neighbors
0	x10	2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f19/64 fe80::2a0:24ff:fe55:9f19/64	DR PIM	fe80::250:4ff:fe52:107c
1	x11	2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9/64 fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9/64	DR PIM	fe80::204:76ff:fed9:9927
2	vx0	2001:690:2380:7773:2a0:24ff:fe8a:76d4/64 fe80::2a0:24ff:fe8a:76d4/64	DR NO-NBR	QRY

Multicast Routing Table		
Source	Group	Flags
------(S,G)-----		
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	SG
Pruned oifs:	.p.	
Asserted oifs:	.p.	
Outgoing oifs:	..o	
Incoming	: I..	
Upstream nbr:	fe80::250:4ff:fe52:107c	
TIMERS:	Entry Prune VIFS:	0 1 2
	205	0 70 0
Number of Groups: 1		

6. Apesar da rede 2001:690:2380:7777::/64 não ser utilizada para encaminhar os pacotes de dados para os receptores, verifica-se que o *router* Gordon encaminha pacotes de dados para essa rede (pacote 90 da Figura 93). Uma vez que o *router* FBSD\_2 tem as suas interfaces *x10* e *r11* no estado *Pruned*, envia uma mensagem *Prune* (pacote 91 da Figura 93) contendo o

endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *x12* do *router* Gordon e este, por sua vez, também envia uma mensagem *Prune* (pacote 92 da Figura 93), deixando de encaminhar pacotes de dados para esta rede. Uma vez expirado o tempo de vida (210 segundos) do estado *Prune*, este processo é repetido novamente (pacotes 977, 978 e 979 da Figura 93), enquanto o emissor estiver a enviar pacotes de dados.

No. .	Time	Source	Destination	Protocol	Info
90	166.10779	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source port: 1089
91	166.11171	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
92	166.11206	fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
968	348.43419	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Hello
971	360.45572	fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c	ff02::d	PIMv2	Hello
977	375.48900	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source port: 1089
978	375.49239	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
979	375.49277	fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

Figura 93 – Período de encaminhamento dos pacotes de dados

### Conclusões

Numa rede local, os *router multicast* conhecem os seus vizinhos PIM através de mensagens *Hello*, que são usadas também no processo de eleição do *Designated Router* (DR). A inexistência de mensagens *Hello* durante o tempo de vida associado a estas mensagens, faz com que o próximo *router* com o maior endereço IPv6 *unicast link-local* se assumira como DR, garantindo assim a continuidade do funcionamento do protocolo nessa rede.

No protocolo PIMv6 DM o conceito de DR não se aplica a redes onde existam apenas emissores, mesmo que estas sejam servidas por mais do que um *router*. Nestes cenários, cada um dos *routers* assume-se como a origem da árvore de distribuição por emissor, sendo criado para cada emissor tantas árvores *multicast* quando o número dos *routers multicast* activos nessa rede.

Inicialmente, quando um emissor começa a enviar pacotes de dados para um determinado grupo *multicast*, mesmo que não existam receptores interessados nessa sessão *multicast*, verificou-se que os *routers multicast* encaminham os pacotes de dados (da sua interface RPF) para todas as redes onde existem vizinhos PIM, com excepção da rede por onde recebe os pacotes (evitando a formação de ciclos). Assim, é criada a árvore de distribuição por emissor. Para evitar o encaminhamento dos pacotes de dados, o que conduz a uma utilização desnecessária dos recursos das redes onde não existam receptores interessados, são enviadas mensagens *Prune* (na interface RPF), contendo o endereço do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor.

Em cenários em que existam redes servidas por mais do que um *router*, existe a possibilidade do mesmo pacote de dados ser encaminhado por diferentes *routers*, conduzindo a uma

ocupação desnecessária de largura de banda. Estas redes, podem ser redes intermédias ou redes que contenham apenas receptores. O mecanismo *Assert* permite otimizar o protocolo já que é eleito um dos *routers* para ser o responsável pelo encaminhamento dos pacotes de dados para a rede.

No protocolo PIMv6 DM, não existe um envio periódico de mensagens *Join/Prune*, *Graft* e *Graft-Ack*. O mecanismo de inundação dos pacotes de dados é particularmente vantajoso, por um lado em cenários onde existem receptores densamente distribuídos e, por outro lado, em cenários que não tolerem falhas num único ponto já que através deste mecanismo podem ser encontradas alternativas de encaminhamento a possíveis falhas da rede.

### 4.6.2. Cenário PIMv6 SM

De forma a analisar o comportamento do protocolo PIMv6 SM, em particular (i) a construção de árvores de distribuição central, (ii) a construção de árvores de distribuição por emissor, (iii) o mecanismo de *Assert* em redes intermédias partilhadas, e (iv) o corte de membros das árvores *multicast*, configurou-se em laboratório a rede da Figura 94 composta por um emissor, dois receptores e por seis *routers multicast*, um dos quais o *Rendezvous Point* (RP) da rede para todos os grupos *multicast*.

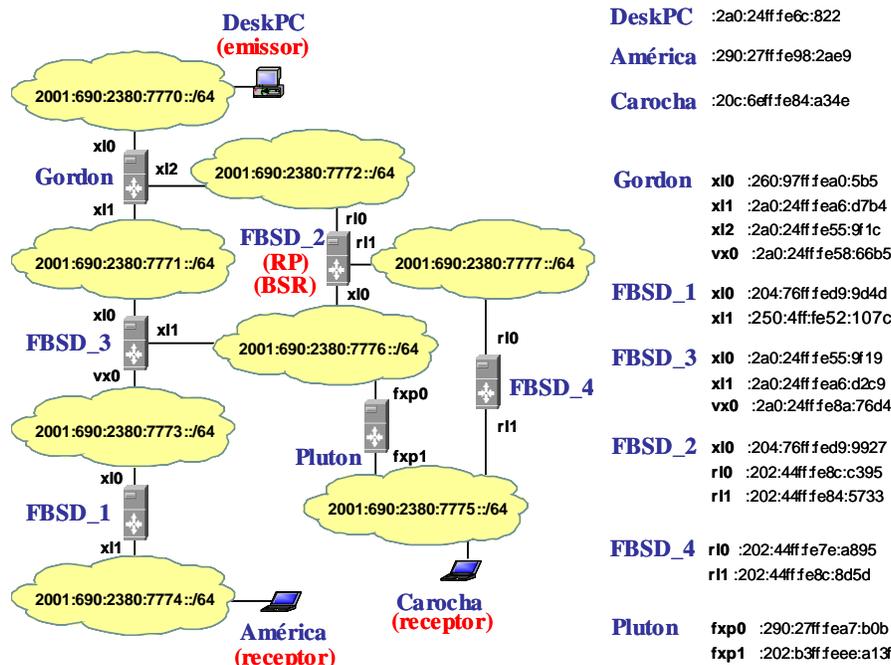


Figura 94 – Cenário PIMv6 SM

Configurações:

Neste cenário, usou-se o mecanismo *Bootstrap* (para que todos os *routers multicast* da rede conheçam de uma forma dinâmica qual o RP a usar) na sua configuração mais simples, isto é, configurar um único *router* simultaneamente como candidato a RP (para todos os grupos *multicast*) e a BSR.

Para o encaminhamento *unicast* foi usado o protocolo *Routing Information Protocol Next Generation* (RIPng) [RFC 2080] com as configurações por omissão, disponível no sistema operativo FreeBSD.

As opções de configuração do protocolo PIMv6 SM encontram-se no ficheiro */usr/local/v6/etc/pim6sd.conf*. Para cada um dos *routers*, efectuaram-se as seguintes configurações:

<b>Gordon:</b> <pre>phyint xl0 mld_version any; phyint xl1 mld_version any; phyint xl2 mld_version any;</pre>	<b>FBSD_2:</b> <pre>phyint r10 mld_version any; phyint r11 mld_version any; phyint xl0 mld_version any; cand_rp r10; cand_bootstrap_router r10; switch_register_threshold rate 300000 interval 20;</pre>
<b>FBSD_3:</b> <pre>phyint xl0 mld_version any; phyint xl1 mld_version any; phyint vx0 mld_version any;</pre>	<b>Pluton:</b> <pre>phyint fxp0 mld_version any; phyint fxp1 mld_version any; switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</pre>
<b>FBSD_1:</b> <pre>phyint xl0 mld_version any; phyint xl1 mld_version any; switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</pre>	<b>FBSD_4:</b> <pre>phyint xl0 mld_version any; phyint xl1 mld_version any; switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</pre>

Configuraram-se as interfaces em todos os *routers* para suportarem qualquer versão do protocolo MLD (MLD ou MLDv2). O *router* FBSD\_2, foi configurado como candidato a RP (usando a interface *r10*) e a BSR (usando a mesma interface). De notar que para estas configurações especificou-se qual a interface a usar, não sendo contudo obrigatório fazê-lo, sendo assumida nesta situação a interface que tiver o maior endereço IPv6 *unicast global*. Neste *router*, foi configurado como limite de ritmo de transmissão de mensagens *Register* (contendo os pacotes de dados *multicast* encapsulados) o valor de 300 Kbps verificado de 20 em 20 segundos (quando um emissor envia pacotes de dados a um ritmo superior a este valor, o RP adere à árvore de distribuição do emissor). O mesmo limite de ritmo de transmissão de pacotes de dados encaminhados pelo RP foi configurado nos DR's (Pluton e FBSD\_4).

Procedimento Experimental:

1. Para verificar a construção da árvores de distribuição central e da árvore de distribuição por emissor em caminhos distintos, activou-se o encaminhamento *unicast* nos *routers* pela seguinte ordem: Pluton, FBSD\_4, FBSD\_3, FBSD\_2 e Gordon. Este procedimento deve-se ao facto de terem sido usadas as configurações por omissão do protocolo RIPng, pelo numa rede servida por mais do que dois *routers*, cada *router* regista apenas na sua tabela de encaminhamento *unicast* as redes do primeiro anúncio recebido, mesmo que os restantes *routers* anunciem as mesmas redes.

Assim, o *router* Pluton alcança a rede 2001:690:2380:7770::/64 (rede do emissor) através do *router* FBSD\_3 e alcança a rede 2001:690:2380:7772::/64 (rede da interface RP) através do *router* FBSD\_2. Quanto ao *router* FBSD\_3, alcança a rede 2001:690:2380:7770::/64 através do *router* Gordon e alcança a rede 2001:690:2380:7772::/64 através do *router* FBSD\_2.

2. De seguida, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers* executando para esse efeito o comando:

```
/usr/local/v6/sbin/pim6sd -c /usr/local/v6/etc/pim6sd.conf
```

Inicialmente, cada *router multicast* envia uma mensagem *Hello*. À semelhança do que acontece para o protocolo PIMv6 DM, através das mensagens *Hello* conhecem-se os vizinhos PIM e é eleito o DR de cada rede local servida por mais do que um *router*. Verificou-se que quando é activado o protocolo PIMv6 SM num *router* de uma rede onde existem outros *routers multicast* activos, cada um desses *routers* ao verificar a existência de mensagens *Hello* enviadas pelo novo *router*, envia imediatamente uma mensagem *Hello* e o novo *router*, por sua vez, envia imediatamente outra mensagem *Hello*. Este processo é ilustrado na Figura 95 que apresenta as mensagens *Hello* enviadas, na rede 2001:690:2380:7772::/64, pelos *routers* Gordon (pacotes 8 e 15) e FBSD\_2 (pacotes 14 e 16). Depois desta troca inicial de mensagens *Hello*, cada um dos *routers* passa a enviar periodicamente (de 30 em 30 segundos) mensagens *Hello* (pacotes 29 e 32 da Figura 95) . Nas restantes redes, verificou-se o mesmo processo de envio de mensagens *Hello*.

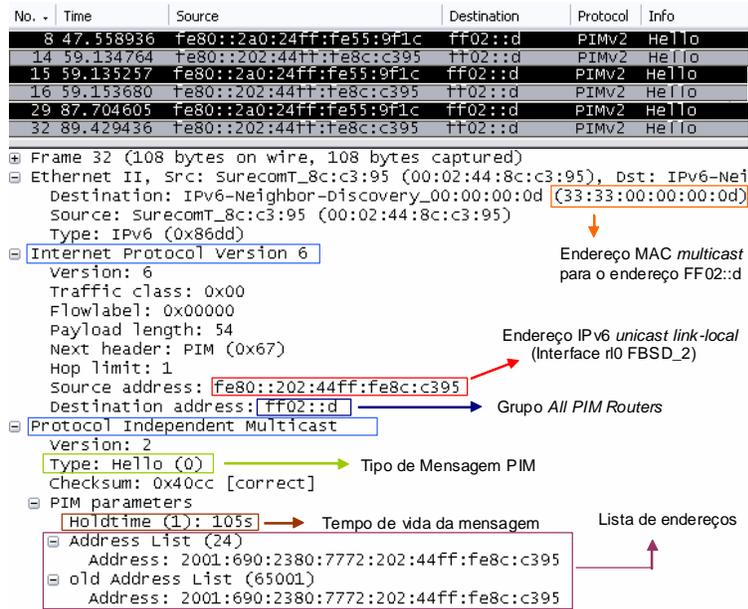


Figura 95 – Mensagens Hello enviadas pelos routers Gordon e FBSD\_2

O tempo de vida (105 segundos) especificado no campo *Holdtime* de um vizinho PIM é actualizado por cada mensagem *Hello* que envie e uma vez expirado, os outros *routers* da rede deixam de o conhecer. De notar que na mensagem *Hello* do protocolo PIMv6 SM foram incluídas mais duas opções [PIMSM]. O campo *Address List*, contém o endereço IPv6 *unicast global* da interface por onde foi enviada a mensagem *Hello*, permitindo desta forma identificar os vizinhos PIM não só pelo seu endereço IPv6 *unicast link-local*, mas também pelo seu endereço IPv6 *unicast global*. Assim, mesmo que as tabelas de encaminhamento *unicast* tenham entradas só com endereços IPv6 *unicast global*, garante-se que o protocolo PIMv6 SM funciona não ficando dependente de entradas IPv6 *unicast link-local* para a descoberta da interface RPF. O campo *Old Address List* é para uso privado [PIMSM]. No decorrer da experiência não se faz uso da utilidade destes dois campos.

Através do comando *pim6stat* pode-se analisar a informação *multicast* do *router* FBSD\_2, sendo a informação dos restantes *routers* semelhante à apresentada:

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen      Scope  Flags
0    r10  2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395/64  0      PIM QRY
      fe80::202:44ff:fe8c:c395/64          2
      Timers: PIM hello = 0:30, MLD query = 0:05
      possible MLD version = 1 2

1    r11  2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733/64  0      DR PIM
      fe80::202:44ff:fe84:5733/64          3
      Timers: PIM hello = 0:30, MLD query = 0:10
      possible MLD version = 1 2

2    x10  2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927/64  0      PIM QRY
      fe80::204:76ff:fed9:9927/64          1
      Timers: PIM hello = 0:30, MLD query = 0:05
      possible MLD version = 1 2

3    lo0  fe80::1/64                                16     DISABLED
      ::1/128                                0
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

4    regist fe80::202:44ff:fe8c:c395/64              2      REGISTER
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF Address                               Timer
0    r10  fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c                 100
      2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f1c
1    r11  fe80::202:44ff:fe7e:a895                 100
      2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895
2    x10  fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9                 100
      2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9
      fe80::290:27ff:fea7:b0b                100
      2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b

Multicast Routing Table
(...)
-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 40
RP-address(Upstream)/Group prefix      Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(myself)
ff00::/8                                0    150 115

```

A tabela *Multicast Interface Table* apresenta a informação relativa aos protocolos PIMv6 SM e MLD. O significado da informação apresentada é igual ao explicado na secção 3.4. De notar que ao ser activado o protocolo PIMv6 SM, é criada uma nova interface virtual identificada por *regist* à qual está associado o menor dos endereços IPv6 *unicast link-local* das interfaces físicas (neste caso o endereço da interface *r10*). O campo *Flags* para esta interface indica que se trata de uma interface usada para as mensagens *Register*. O campo *Flags* para as restantes interfaces apresenta na coluna da esquerda informação relativa ao protocolo PIMv6 SM e na coluna da direita informação relativa ao protocolo MLD. Neste caso, como a interface *r11* do *router* FBSD\_2 tem o endereço IPv6 *unicast link-local* maior do que o endereço da interface *r10* do *router* FBSD\_4, o *router* FBSD\_2 é o eleito como DR da rede 2001:690:2380:7777::/64 (*flag* DR na interface *r11*). A tabela *PIM Neighbor List* apresenta a lista de vizinhos PIM. Associado a cada interface, estão os endereços IPv6 *unicast link-local* (endereço primário) e IPv6 *unicast global* (endereço secundário) dos seus vizinhos PIM, assim como o tempo de vida desses vizinhos. A interface *x10* do *router* FBSD\_2 contém dois vizinhos PIM (a interface *x11* do *router* FBSD\_3 e a interface *fxp0* do *router* Pluton).

Através do mecanismo *Bootstrap* todos os routers *multicast* da rede conhecem qual o RP a usar. Cada *router multicast* activo mantém na tabela *Multicast Routing Table (RP-Set)* essa informação, composta pelo endereço IPv6 *unicast global* do BSR, pelo endereço IPv6 *unicast global* do RP, pelo endereço IPv6 *unicast link-local* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP (que neste caso como é o próprio está identificado por *myself*) e pela gama *multicast* que o RP serve. Como não foi especificada nenhuma gama *multicast* no ficheiro de configuração do *router* FBSD\_2, este *router* (RP) serve todos os grupos dentro da gama (FF00::/8). O funcionamento do mecanismo *Bootstrap* será ilustrado na experiência prática da secção 4.6.3.

3. De seguida, configurou-se a aplicação *VideoLan* no emissor DeskPC para enviar tráfego a um ritmo de 192 Kbps com destino ao grupo FF0e::77:1111. O *router* Gordon (DR do emissor) cria o estado (S,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast* e envia (usando o encaminhamento *unicast*) uma mensagem *Register* (Figura 96), contendo o primeiro pacote de dados encapsulado, com destino ao *router* FBSD\_2 (RP). Nesta fase, como não existe uma árvore de distribuição central criada para esse grupo, o *router* FBSD\_2 (RP) responde ao *router* Gordon com uma mensagem *Register-Stop* (Figura 97) para que este pare de enviar mensagens *Register*.

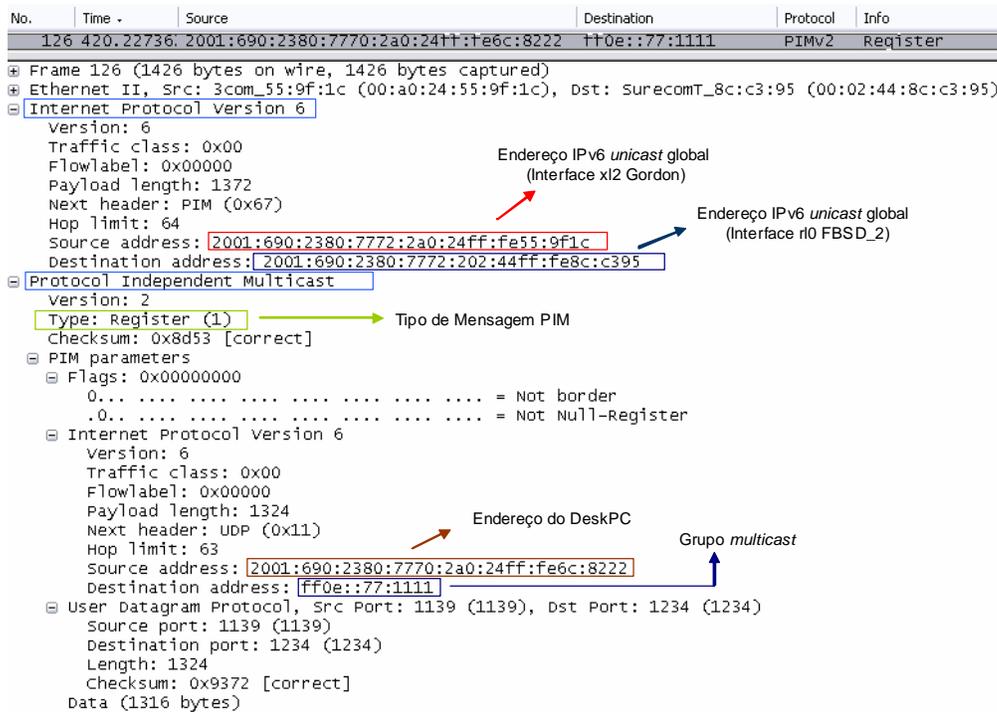


Figura 96 – Primeira mensagem *Register* enviada do *router* Gordon para o RP (FBSD\_2)

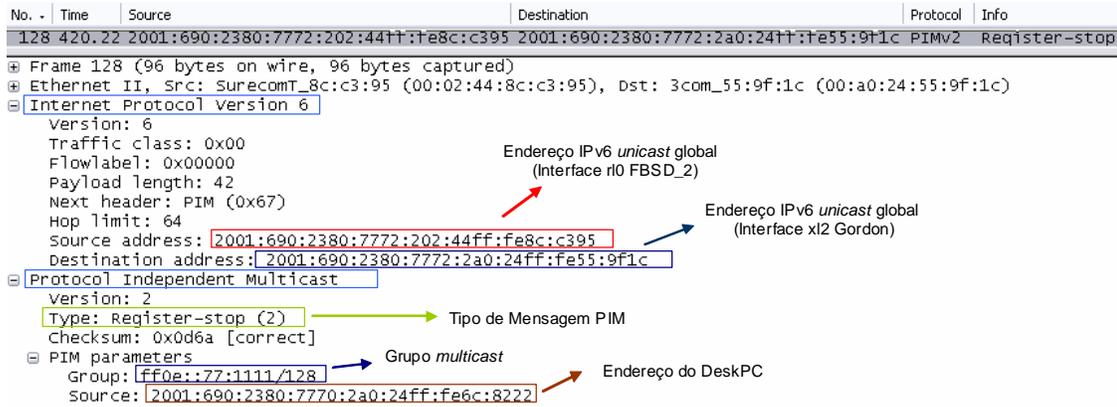


Figura 97 – Mensagem Register-Stop enviada do RP (FBSD\_2) para o router Gordon

Verificou-se que durante aproximadamente 220 segundos o router Gordon deixa de enviar mensagens Register (com pacotes de dados encapsulados) e passa a enviar periodicamente (aproximadamente de 40 em 40 segundos) mensagens Register-Null (pacotes 187, 199 e 207 da Figura 98), sem pacotes de dados encapsulados, com destino ao RP. Por cada mensagem Register-Null recebida, o router FBSD\_2 (RP) responde com uma mensagem Register-Stop (pacotes 188, 200 e 208 da Figura 98).

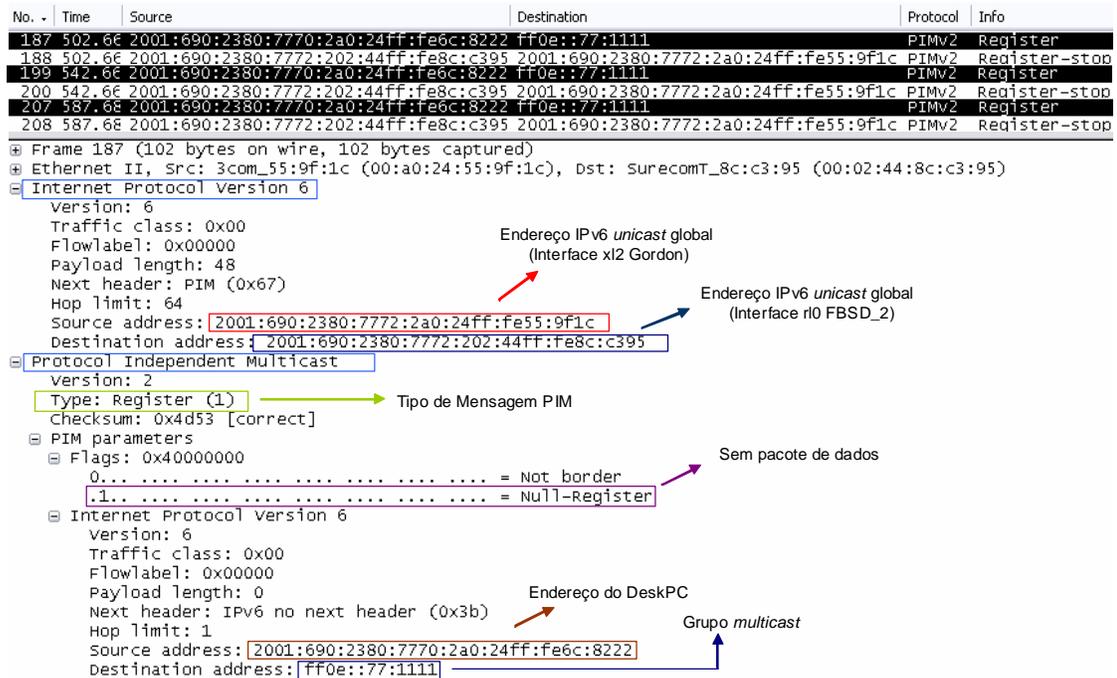


Figura 98 – Mensagens Register-Null e mensagens Register-Stop

Nesta fase, a informação multicast do router Gordon é a apresentada de seguida. Note-se que as tabelas de encaminhamento multicast para os restantes routers não apresentam qualquer entrada.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen  Scope  Flags
0    x10  2001:690:2380:7770:260:97ff:fea0:5b5/64  0      DR QRY NO-NBR
      fe80::260:97ff:fea0:5b5/64          1
      Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 0:10
      possible MLD version = 1 2
1    x11  2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4/64  0      DR PIM
      fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4/64          2
      Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 0:30
      possible MLD version = 1 2
2    x12  2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f1c/64  0      DR PIM
      fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c/64          3
      Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:20
      possible MLD version = 1 2
3    lo0  fe80::1/64                                14     DISABLED
      ::1/128                                0
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1
4    regist fe80::260:97ff:fea0:5b5/64              1      REGISTER
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF Address  Timer
1    x11 fe80::2a0:24ff:fe55:9f19  85
      2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fe55:9f19
2    x12 fe80::202:44ff:fe8c:c395  95
      2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395

Multicast Routing Table
Source  Group  RP-addr  Flags
----- (S,G) -----
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222 ff0e::77:1111 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 SG
Joined oifs: ....j
Pruned oifs: ....p
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: .....
Incoming : I....
Upstream nbr: NONE

TIMERS: Entry=175 JP=30 RS=54 Assert=0
MIF  0  1  2  3  4
    0  0  0  0  0  0

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 135
RP-address(Upstream)/Group prefix  Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(fe80::202:44ff:fe8c:c395%x12)
ff00::/8 0 150 125
    
```

O conteúdo da tabela *PIM Neighbor List* e da entrada *RP-Set* da tabela *Multicast Routing Table* já foi explicado anteriormente. A tabela *Multicast Routing Table* apresenta a informação das sessões *multicast* criadas. Associado a cada estado (S,G) ou (\*,G) existem cinco entradas que apresentam informação relativa às interfaces que suportam *multicast*: (i) *Joined oifs* (identificada pela letra ‘j’), representa as interfaces que estão no estado *Joined*; (ii) *Pruned oifs* (identificada pela letra ‘p’), representa as interfaces que estão no estado *Pruned*; (iii) *Asserted oifs* (identificada pela letra ‘a’), representa as interfaces que estão no estado *Asserted*; (iv) *Outgoing oifs* (identificada pela letra ‘o’), representa as interfaces de saída; (v) *Incoming* (identificada pela letra ‘I’), representa a interface de entrada. Para além desta informação, é também apresentado (na entrada *Upstream nbr*) o endereço do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor (ou para o RP) e vários contadores temporais. Neste caso, no *router* Gordon foi criado o estado (S,G) composto pelo endereço IPv6 *unicast global* do emissor DeskPC (2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222) e pelo endereço IPv6 *multicast* (FF0e::77:1111) que

identifica o grupo. Para além desta informação, é apresentado o endereço IPv6 *unicast global* do RP (interface *xl0* do FBSD\_2) e a *flag* SG que indica que se trata de uma árvore de distribuição por emissor. A interface de entrada (RPF) do *router* Gordon é a interface *xl0* identificada pelo número '0', razão pela qual aparece na primeira posição da entrada *Incoming*. A interface virtual *regist* aparece na entrada *Joined* e na entrada *Pruned*, significando que está no estado *Join/Pending* (JP), isto é, durante um determinado período de tempo a interface está no estado *Prune* (provocado pela recepção de uma mensagem *Register-Stop* enviadas pelo RP) e uma vez expirado esse tempo o DR (*router* Gordon) volta a coloca-la no estado *Join*, momento em que é enviada uma nova mensagem *Register*.

4. De seguida, executou-se a aplicação *VideoLan* no receptor Carocha para aderir ao grupo FF0e::77:1111. O *router* Pluton (DR da rede 2001:690:2380:7775::/64) cria o estado (\*,G) na sua tabela de encaminhamento *multicast* e envia uma mensagem *Join* (Figura 99) pela sua interface RPF (interface *fxp0*) contendo, o seu vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP e as *flags* S (modo *Sparse Mode*), W (qualquer emissor) e R (pedido ao RP), aderindo desta forma à árvore de distribuição central. Periodicamente (60 em 60 segundos), são enviadas mensagens *Join* mantendo actualizadas desta forma as tabelas de encaminhamento *multicast*.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
385	693.97804	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
676	753.25003	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

```

⊕ Frame 385 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: Intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_
⊖ Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 70
  Next header: PIM (0x67)
  Hop limit: 1
  Source address: fe80::290:27ff:fea7:b0b
  Destination address: ff02::d
⊖ Protocol Independent Multicast
  Version: 2
  Type: Join/Prune (3)
  Checksum: 0xb0e6 [correct]
⊖ PIM parameters
  Upstream-neighbor: fe80::204:76ff:fed9:9927
  Groups: 1
  Holdtime: 210
  Group 0: ff0e::77:1111/128
    ⊖ Join: 1
      IP address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395/128 (SWR)
      Prune: 0
  
```

Figura 99 – Mensagem *Join* enviada pelo *router* Pluton (árvore de distribuição central)

A informação *multicast* do *router* Pluton é a apresentada de seguida:

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen      Scope Flags
0    fxp0  2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b/64  0    PIM
     fe80::290:27ff:fea7:b0b/64          1
     Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:25
     possible MLD version = 1 2
1    fxp1  2001:690:2380:7775:202:b3ff:feee:a13f/64  0    DR PIM
     fe80::202:b3ff:feee:a13f/64        2
     Timers: PIM hello = 0:15, MLD query = 0:05
     possible MLD version = 1 2
2    lo0  fe80::1/64                                12   DISABLED
     ::1/128                              0
     Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
     possible MLD version = 1
3    regist fe80::290:27ff:fea7:b0b/64              1    REGISTER
     Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
     possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF Address                               Timer
0    fxp0  fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9                    90
     2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9
     fe80::204:76ff:fed9:9927
     2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927
1    fxp1  fe80::202:44ff:fe8c:8d5d                    85
     2001:690:2380:7775:202:44ff:fe8c:8d5d

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group:Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1    fxp1  ff0e::77:1111 (#163 (v1 EX #164))
     (any source) (-)

Multicast Routing Table
Source      Group      RP-addr      Flags
-----
IN6ADDR_ANY  ff0e::77:1111  2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 WC RP CACHE
Joined oifs: ....
Pruned oifs: ....
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .o..
Incoming   : I...
Upstream nbr: fe80::204:76ff:fed9:9927

TIMERS: Entry=0 JP=45 RS=0 Assert=0
MIF  0  1  2  3
     0  0  0  0  0
-----
Number of Groups: 1
Number of Cache MIRRORs: 1

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 105
RP-address(Upstream)/Group prefix      Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(fe80::204:76ff:fed9:9927&fxp0)
ff00::/8                                0    150  95

```

A tabela *Multicast Routing Table* tem uma entrada para o estado (\*,G) relativo ao grupo FF0e::77:1111, significando que foi criada uma árvore de distribuição central para esse grupo. Para este estado, as *flags* WC RP indicam que se trata de uma árvore de distribuição central com origem no RP e é também apresentado o endereço IPv6 *unicast link-local* do vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o RP (neste caso a interface *x10* do *router* FBSD\_2). A interface de entrada dos pacotes de dados é a interface *fxp0* e a interface de saída é a interface *fxp1*. Note-se que no *router* FBSD\_4 não se verificou qualquer entrada na tabela *Multicast Routing Table*. Depois de receber a mensagem *Join* enviada pelo *router* Pluton, o *router* FBSD\_2 cria na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (\*,G) relativo ao grupo FF0e::77:1111. Nesta

fase, as tabelas *Multicast Routing Table* dos *routers* FBSD\_2 e Gordon apresentam a seguinte informação:

#### FBSD\_2

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
------(*,G)-----			
IN6ADDR_ANY	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	WC RP CACHE
Joined oifs:	..j..		
Pruned oifs:	.....		
Asserted oifs:	.....		
Outgoing oifs:	..o..		
Incoming :	...I		
Upstream nbr:	NONE		

#### Gordon

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
------(S,G)-----			
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	CACHE SG
Joined oifs:	....j		
Pruned oifs:	.....		
Asserted oifs:	.....		
Outgoing oifs:	....o		
Incoming :	I....		
Upstream nbr:	NONE		

Uma vez criada a árvore de distribuição central para o grupo FF0e::77:1111, o *router* FBSD\_2 (RP) deixou de enviar mensagens *Register-Stop* e os pacotes de dados passaram a ser encaminhados através das mensagens *Register* (Figura 100) enviadas pelo *router* Gordon (DR do emissor) com destino ao *router* FBSD\_2 (RP). Para o estado (S,G) criado no *router* Gordon a interface RPF para o emissor é a interface *x10* e a interface virtual *Regist* (última interface da lista de interfaces) passa a estar no estado *Joined* e na lista de interfaces de saída. Para o estado (\*,G) criado no *router* FBSD\_2, a interface de entrada é a interface virtual *Regist* (última interface da lista de interfaces) uma vez que os pacotes de dados recebidos estão encapsulados em mensagens *Register*. Os pacotes de dados são descapsulados e encaminhados pela interface *x10* (que se encontra no estado *Joined* e na lista de interfaces de saída) (Figura 101). Finalmente, o *router* Pluton encaminha os pacotes de dados (Figura 102) pela sua interface de saída (*fxp1*) e os pacotes chegam ao receptor Carocha. Note-se que através do campo *Checksum* dos pacotes de dados UDP verifica-se que se trata do mesmo pacote de dados.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
274	752.936051	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	PIMv2	Register
<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Frame 274 (1426 bytes on wire, 1426 bytes captured)</li> <li>⊕ Ethernet II, Src: 3com_55:9f:1c (00:a0:24:55:9f:1c), Dst: SurecomT_8c:c3:95 (00:02:44:8c:c3:95)</li> <li>⊕ Internet Protocol version 6</li> <li>⊕ Protocol Independent Multicast <ul style="list-style-type: none"> <li>Version: 2</li> <li>Type: Register (1)</li> <li>Checksum: 0x8d53 [correct]</li> <li>PIM parameters <ul style="list-style-type: none"> <li>Flags: 0x00000000</li> <li>Internet Protocol version 6 <ul style="list-style-type: none"> <li>User Datagram Protocol, Src Port: 1140 (1140), Dst Port: 1234 (1234)</li> <li>Source port: 1140 (1140)</li> <li>Destination port: 1234 (1234)</li> <li>Length: 1324</li> <li>Checksum: 0x9ef3 [correct]</li> <li>Data (1316 bytes)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>					

Figura 100 – Pacote de dados encapsulado na mensagem *Register* (*router* Gordon)

No. -	Time	Source	Destination	Protocol
403	738.22641	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP
Frame 403 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)				
Ethernet II, Src: 3Com_d9:99:27 (00:04:76:d9:99:27), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)				
Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)				
Source: 3Com_d9:99:27 (00:04:76:d9:99:27)				
Type: IPv6 (0x86dd)				
Internet Protocol Version 6, Interface x10 do FBSD_2				
User Datagram Protocol, Src Port: 1140 (1140), Dst Port: 1234 (1234)				
Source port: 1140 (1140)				
Destination port: 1234 (1234)				
Length: 1324				
Checksum: 0x9ef3 [correct]				
Data (1316 bytes)				

Figura 101 – Pacote de dados encaminhado pelo *router* FBSD\_2

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1183	666.73626	fe80::20c:6eff:fe84:a34e	ff0e::77:1111	ICMPv6	Multicast listener report
1196	673.24706	fe80::20c:6eff:fe84:a34e	ff0e::77:1111	ICMPv6	Multicast listener report
1231	716.00955	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source port: 1140 Destina
Frame 1231 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)					
Ethernet II, Src: Intel_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)					
Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)					
Source: Intel_ee:a1:3f (00:02:b3:ee:a1:3f)					
Type: IPv6 (0x86dd)					
Internet Protocol Version 6, Interface fxp1 do Pluton					
User Datagram Protocol, Src Port: 1140 (1140), Dst Port: 1234 (1234)					
Source port: 1140 (1140)					
Destination port: 1234 (1234)					
Length: 1324					
Checksum: 0x9ef3 [correct]					
Data (1316 bytes)					

Figura 102 – Pacote de dados encaminhado pelo *router* Pluton

5. Depois de executar a aplicação *VideoLan* no receptor América para aderir ao grupo FF0e::77:1111, o *router* FBSD\_1 cria o estado (\*,G) e passa a enviar periodicamente uma mensagem *Join* (pela sua interface RPF para o RP). Como o *router* FBSD\_3 é o vizinho do PIM no caminho de custo mínimo para o RP, cria também o estado (\*,G) relativo a esse grupo e envia uma mensagem *Join* (aderindo desta forma à árvore de distribuição central). A informação *multicast* dos *routers* FBSD\_1 e FBSD\_3 é a apresentada de seguida:

**FBSD\_1**

Mif	PhyIF	Local-Address/Prefixlen	Scope	Flags
0	x10	2001:690:2380:7773:204:76ff:fed9:9d4d/64	0	PIM QRY
		fe80::204:76ff:fed9:9d4d/64	1	
Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 0:20				
possible MLD version = 1 2				
1	x11	2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c/64	0	DR QRY NO-NBR
		fe80::250:4ff:fe52:107c/64	2	
Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 0:20				
possible MLD version = 1 2				
2	lo0	fe80::1/64	14	DISABLED
		::1/128	0	
Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00				
possible MLD version = 1				
3	regist	fe80::204:76ff:fed9:9d4d/64	1	REGISTER
Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00				
possible MLD version = 1				
<b>Reported MLD Group</b>				
Mif	PhyIF	Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)		
1	x11	ff0e::77:1111 (#197 (v1 EX #198))		
		(any source) (-)		

## FBSD\_1 (continuação)

```

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:1111  2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 WC RP CACHE
Joined oifs:    ....
Pruned oifs:    ....
Asserted oifs:  ....
Outgoing oifs:  .o..
Incoming       : I...
Upstream nbr:  fe80::2a0:24ff:fe8a:76d4

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 120
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(fe80::2a0:24ff:fe8a:76d4%x10)
ff00::/8                                   0      150  110

```

## FBSD\_3

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF  Local-Address/Prefixlen  Scope  Flags
---
0    xl0    2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fe55:9f19/64  0      PIM QRY
      fe80::2a0:24ff:fe55:9f19/64             1
      Timers: PIM hello = 0:25, MLD query = 0:35
      possible MLD version = 1 2
1    xl1    2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9/64  0      DR PIM
      fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9/64             2
      Timers: PIM hello = 0:30, MLD query = 0:30
      possible MLD version = 1 2
2    vx0    2001:690:2380:7773:2a0:24ff:fe8a:76d4/64  0      DR PIM
      fe80::2a0:24ff:fe8a:76d4/64             3
      Timers: PIM hello = 0:25, MLD query = 0:30
      possible MLD version = 1 2
3    lo0    fe80::1/64                                13     DISABLED
      ::1/128                                  0
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1
4    regist fe80::2a0:24ff:fe55:9f19/64              1      REGISTER
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:1111  2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 WC RP CACHE
Joined oifs:    ..j..
Pruned oifs:    .....
Leaves oifs:    .....
Asserted oifs:  .....
Outgoing oifs:  ..o..
Incoming       : .I...
Upstream nbr:  fe80::204:76ff:fed9:9927

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 140
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(fe80::204:76ff:fed9:9927%x11)
ff00::/8                                   0      150  130

```

A partir do momento que *router* FBSD\_1 adere à árvore de distribuição central, os pacotes de dados enviados pelos emissor DeskPC passaram a ser também encaminhados pela árvore de distribuição central para o receptor América.

6. Posteriormente, terminou-se a execução da aplicação *VideoLan* no emissor DeskPC e configurou-se para começar a enviar tráfego a um ritmo de 400 Kbps. O *router* FBSD\_2 (RP) ao receber mensagens *Register* a um ritmo superior ao configurado (300 Kbps), cria um novo estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF0e::77:1111 e envia, pela sua interface RPF (*r/0*) para o emissor, uma mensagem *Join* (Figura 103) (apenas com a *flag* S)

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
8861	1215.4028	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
Frame 8861 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)					
Ethernet II, Src: SurecomT_8c:c3:95 (00:02:44:8c:c3:95), Dst: IPv6-Neighbor					
Internet Protocol Version 6					
Protocol Independent Multicast					
Version: 2					
Type: Join/Prune (3) → Tipo de Mensagem PIM					
Checksum: 0x8bef [correct]					
PIM parameters					
Upstream-neighbor: fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c → Endereço IPv6 unicast link-local (Interface xl2 Gordon)					
Groups: 1					
Holdtime: 210					
Group 0: ff0e::77:1111/128 → Grupo multicast					
Join: 1					
IP address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222/128 (S) → Endereço IPv6 unicast global do Emissor					
Prune: 0					

Figura 103 – Mensagem Join enviada pelo router FBSD\_2 em direção ao emissor

Uma vez criada a árvore de distribuição do emissor entre o *router* Gordon e o *router* FBSD\_2, o *router* Gordon passa a encaminhar os pacotes de dados através da árvore *multicast* e através de mensagens *Register*. O *router* FBSD\_2 quando recebe o mesmo pacote de dados (i) pela árvore *multicast* (pacote 8862 da Figura 104) e (ii) encapsulado numa mensagem *Register* (pacote 8863 da Figura 105), envia uma mensagem *Register-Stop* (pacote 8864 da Figura 105) ao *router* Gordon. A partir desta fase, o *router* Gordon passa a encaminhar os pacotes de dados (pacotes 8865 e 8866 da Figura 105) apenas pela árvore de distribuição do emissor DeskPC.

No.	Time -	Source	Destination	Protocol	Info
8861	1215.4028	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
8862	1215.4508	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	source port: :
Frame 8862 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured)					
Ethernet II, Src: 3com_55:9f:1c (00:a0:24:55:9f:1c), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11					
Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11)					
Source: 3com_55:9f:1c (00:a0:24:55:9f:1c)					
Type: IPv6 (0x86dd) → Endereço MAC → Endereço MAC multicast do grupo FF0e::77:1111					
Internet Protocol Version 6					
Interface xl2 do Gordon					
User Datagram Protocol, Src Port: 1143 (1143), Dst Port: 1234 (1234)					
Source port: 1143 (1143)					
Destination port: 1234 (1234)					
Length: 1324					
Checksum: 0xddec [correct]					
data (1316 bytes)					

Figura 104 – Pacote de dados encaminhado nativamente pelo router Gordon

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
8861	1215.4028	fe80::202:44ff:fe8c:c395	ff02::d	PIMv2	Join/Prune
8862	1215.4508	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source port: :
8863	1215.4520	2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f1c	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	PIMv2	Register
8864	1215.4526	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f1c	PIMv2	Register-stop
8865	1215.4911	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	source port: :
8866	1215.5410	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	source port: :
Frame 8863 (1426 bytes on wire, 1426 bytes captured)					
Ethernet II, Src: 3com_55:9f:1c (00:a0:24:55:9f:1c), Dst: SurecomT_8c:c3:95 (00:02:44:8c:c3:95)					
Internet Protocol Version 6					
Protocol Independent Multicast					
Version: 2					
Type: Register (1)					
Checksum: 0x8d53 [correct]					
PIM parameters					
Flags: 0x00000000					
Internet Protocol version 6					
User Datagram Protocol, Src Port: 1143 (1143), Dst Port: 1234 (1234)					
source port: 1143 (1143)					
Destination port: 1234 (1234)					
Length: 1324					
Checksum: 0xddec [correct]					
Data (1316 bytes)					

Figura 105 – Adesão do router FBSD\_2 à árvore de distribuição do emissor DeskPC

O *router* FBSD\_1 ao receber os pacotes de dados (encaminhados através da árvore de distribuição central) a um ritmo superior a 300 Kbps (valor configurado), cria na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF0e::77:1111 e envia periodicamente uma mensagem *Join* para aderir à árvore de distribuição do emissor DeskPC, para além do envio periódico de mensagens *Join* para aderir à árvore de distribuição central. Uma vez que o *router* FBSD\_3 é o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor DeskPC, cria o estado (S,G) e envia periodicamente uma mensagem *Join* para aderir à árvore de distribuição por emissor. Note-se que o *router* FBSD\_3 tem duas interfaces RPF distintas: uma para o RP (interface *x/1*) e outra para o emissor (interface *x/0*). Por este motivo, ao receber os pacotes de dados pela nova árvore *multicast*, envia uma mensagem *Prune* (Figura 106) (com as *flags* S e R) em direcção ao *router* FBSD\_2 (RP), indicando que não pretende receber os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC. Nesta fase, os pacotes de dados são encaminhados até ao receptor América através da árvore *multicast* composta pelos *routers* Gordon (origem da árvore), FBSD\_3 e FBSD\_1.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
9167	1201.9032	fe80::2a0:24ff:fe6c:d2c9	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

```

⊕ Frame 9167 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: 3com_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9), Dst: IPv6-Neighbor-
⊕ Internet Protocol version 6
⊖ Protocol Independent Multicast
  version: 2
  Type: Join/Prune (3)
  checksum: 0x4f10 [correct]
  ⊖ PIM parameters
    upstream-neighbor: fe80::204:76ff:fed9:9927
    Groups: 1
    Holdtime: 210
  ⊖ Group 0: ff0e::77:1111/128
    Join: 0
    Prune: 1
    IP address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222/128 (SR)
  
```

Endereço IPv6 *unicast link-local* (Interface *x/0* FBSD\_2)

Grupo *multicast*

Endereço IPv6 *unicast global* do Emissor

Figura 106 – Mensagem *Prune* enviada pelo *router* FBSD\_3

Da mesma forma, o *router* Pluton ao receber os pacotes de dados da árvore de distribuição central a um ritmo superior a 300 Kbps (valor configurado) criou na sua tabela *Multicast Interface Table* o estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF0e::77:1111 e passou a enviar periodicamente uma mensagem *Join* (Figura 107). De notar que para este caso, o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor DeskPC é o *router* FBSD\_3, porque na tabela de encaminhamento *unicast* do *router* Pluton a rede do emissor (2001:690:2380:7770::/64) é alcançada através do *router* FBSD\_3.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
9572	1213.930339	fe80::290:2711:fea7:b0b	:::d	PIMv2	Join/Prune
+ Frame 9572 (124 bytes on wire, 124 bytes captured) + Ethernet II, Src: intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00: + Internet Protocol Version 6 + Protocol Independent Multicast Version: 2 Type: Join/Prune (3) → Tipo de Mensagem PIM Checksum: 0x2cd3 [correct] PIM parameters upstream-neighbor: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9 → Endereço IPv6 unicast link-local (Interface x11 FBSD_3) Groups: 1 Holdtime: 210 → Grupo multicast Group 0: ff0e::77:1111/128 → Endereço IPv6 unicast global do Emissor Join: 1 IP address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222/128 (S) Prune: 0					

Figura 107 – Mensagem *Join* enviada pelo *router* Pluton ao emissor DeskPC

À semelhança do que acontece com o *router* FBSD\_1, como a interface RPF do *router* Pluton (interface *fxp0*) é a mesma para o *router* FBSD\_2 (RP) e para o emissor (DeskPC), o *router* Pluton não sabe por qual das árvores recebe os pacotes de dados. Por esse motivo, não envia nenhuma mensagem *Prune*.

Como o *router* FBSD\_3 é o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor DeskPC e já tem criado o estado (S,G), passa a encaminhar os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC para a rede 2001:690:2380:7776::/64. Nesta fase, verifica-se que o mesmo pacote de dados é encaminhado pelo *router* FBSD\_3 (pacote 9573 da Figura 108) e pelo *router* FBSD\_2 (pacote 9574 da Figura 108) para a rede 2001:7776:2380:7776::/64. De forma a definir qual o *router* responsável pelo encaminhamento dos pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC, são trocadas mensagens *Assert* (pacotes 9575, 9576 e 9577 da Figura 108) entre os dois *routers*. Uma vez que o protocolo de encaminhamento *unicast* é o mesmo para os dois *routers* e a preferência a métrica para o emissor são as mesmas, o *router* FBSD\_3 passa a ser o responsável por encaminhar os pacotes *multicast* (pacote 9578 da Figura 108) para a rede, já que a sua interface *x11* tem um endereço maior IPv6 *unicast link-local* do que a interface *x10* do *router* FBSD\_2.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
9573	1213.9601	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source
9574	1213.9611	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source
9575	1213.9613	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Assert
9576	1213.9614	fe80::204:76ff:fed9:9927	ff02::d	PIMv2	Assert
9577	1213.9619	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Assert
9578	1213.9902	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	UDP	Source
+ Frame 9578 (1378 bytes on wire, 1378 bytes captured) + Ethernet II, Src: 3com_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11: Destination: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33:00:77:11:11) Source: 3com_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9) → Endereço MAC Type: IPv6 (0x86dd) → Interface x11 do FBSD_3 → Endereço MAC multicast do grupo FF0e::77:1111 + Internet Protocol Version 6 + User Datagram Protocol, Src Port: 1143 (1143), Dst Port: 1234 (1234) Data (1316 bytes)					

Figura 108 – Mecanismo de *Assert* na rede 2001:690:2380:7776::/64

A informação *multicast* relativa aos *routers* FBSD\_2, Gordon, Pluton e FBSD\_3 é apresentada de seguida. Note-se que o estado (\*,G) relativo ao grupo FF0e::77::1111 continua a ser mantido nas tabelas de encaminhamento *multicast* de ambos os *routers*, porque se houver outro emissor que envie dados para esse grupo, a árvore de distribuição central já se encontra previamente criada.

### FBSD\_2

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
-----(*,G)-----			
INGADDR_ANY	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	WC RP
Joined oifs:	..j..		
Pruned oifs:	....		
Asserted oifs:	....		
Outgoing oifs:	.o..		
Incoming	: ...I		
Upstream nbr:	NONE		
------(S,G)-----			
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	SPT SG
Joined oifs:	..j..		
Pruned oifs:	....		
Asserted oifs:	..a..		
Outgoing oifs:	....		
Incoming	: I....		
Upstream nbr:	fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c		

### Gordon

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
------(S,G)-----			
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	CACHE SG
Joined oifs:	.jj.j		
Pruned oifs:	...p		
Asserted oifs:	....		
Outgoing oifs:	.oo..		
Incoming	: I....		
Upstream nbr:	NONE		

### Pluton

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
-----(*,G)-----			
INGADDR_ANY	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	WC RP
Joined oifs:	....		
Pruned oifs:	....		
Asserted oifs:	....		
Outgoing oifs:	.o..		
Incoming	: I...		
Upstream nbr:	fe80::204:76ff:fed9:9927		
------(S,G)-----			
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	CACHE SG
Joined oifs:	....		
Pruned oifs:	....		
Asserted oifs:	....		
Outgoing oifs:	.o..		
Incoming	: I...		
Upstream nbr:	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9		

**FBSD\_3**

```

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:1111  2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 WC RP
Joined oifs: .j..
Pruned oifs: ....
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .o..
Incoming      : .I...
Upstream nbr: fe80::204:76ff:fed9:9927

-----
(S,G)-----
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222 ff0e::77:1111 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 SPT CACHE SG
Joined oifs: .jj..
Pruned oifs: ....
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .oo..
Incoming      : I...
Upstream nbr: fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4
    
```

Os estados (S,G) e (\*,G) são mantidos em todos os *routers*, resultante do envio periódico de mensagens *Join*. De notar que ao fim de expirar o tempo de vida da mensagem *Join* (\*,G) enviada na interface *x11* do *router* FBSD\_3, este passa a enviar periodicamente nessa interface (rede 2001:690:2380:7776::/64) uma única mensagem (Figura 109) composta por um *Join* (com o endereço do RP) para manter o estado (\*,G) e por um *Prune* (com o endereço do emissor DeskPC), significando que não pretende receber os pacotes de dados enviados por esse emissor através da árvore de distribuição central. Verificou-se também que o *router* Pluton deixou de enviar periodicamente mensagens *Join* (\*,G), porque verifica que já existem mensagens *Join* a circular na rede, neste caso enviadas pelo *router* FBSD\_3.

Figura 109 – Mensagem *Join/Prune* enviada pelo *router* FBSD\_3

7. Na fase seguinte, o receptor América abandonou (terminando a aplicação *VideoLan*) a sessão *multicast* do grupo FF0e::77:1111. Como não existem na rede 2001:690:2380:7774::/64 mais receptores interessados em participar nessa sessão *multicast*, o *router* FBSD\_1 envia uma mensagem *Prune* (Figura 110) abandonando a árvore de distribuição central e a árvore de distribuição por emissor. De notar que foi apenas enviada uma única mensagem *Prune*, já que

o *router* FBSD\_3 é o vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o *router* FBSD\_2 (RP) e para o emissor DeskPC.

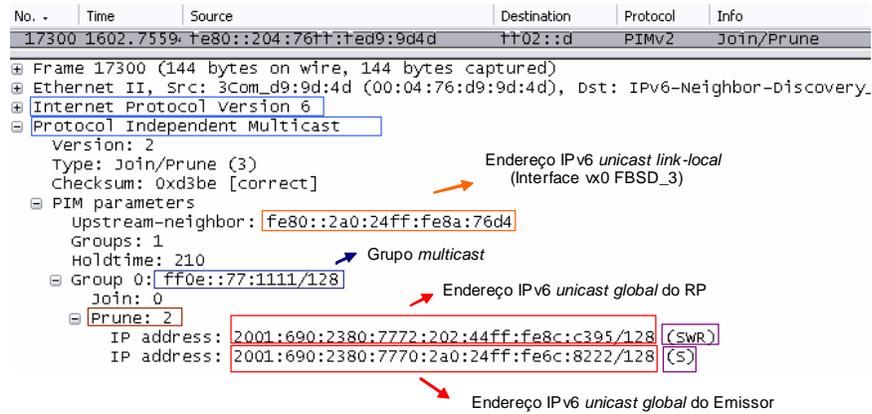


Figura 110 – Mensagem *Prune* enviada pelo *router* FBSD\_1

8. Finalmente, o receptor Carocha abandonou (terminando a aplicação *VideoLan*) a sessão *multicast* do grupo FF0e::77:1111. Neste caso, verificou-se que o *router* Pluton envia duas mensagens *Prune*, uma (Figura 111) na direcção do emissor e outra (Figura 112) em direcção ao *router* FBSD\_2 (RP).

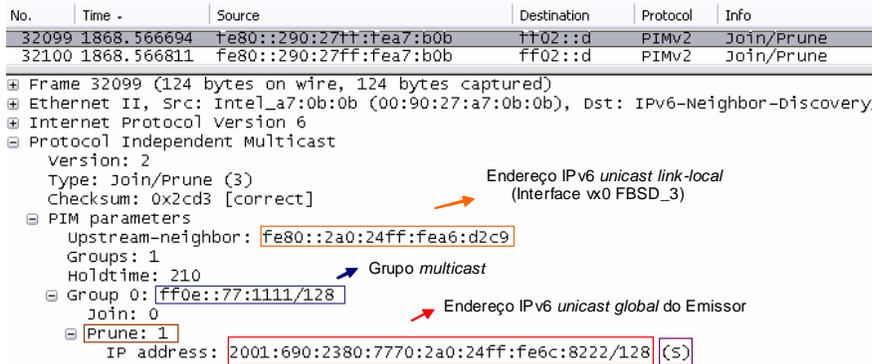


Figura 111 – Mensagem *Prune* enviada pelo *router* Pluton na direcção do emissor

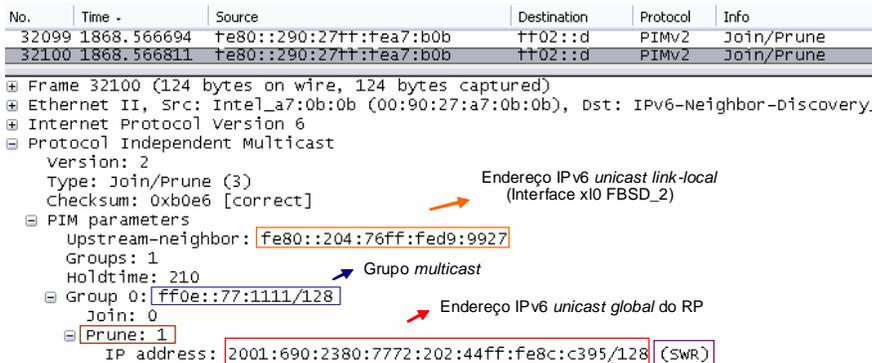


Figura 112 – Mensagem *Prune* enviada pelo *router* Pluton na direcção do RP

Conclusões:

Em cenários em que numa rede local se encontram mais do que um *router multicast* activo, o processo de descoberta dos vizinhos PIM e da eleição do DR da rede é semelhante ao descrito anteriormente para o protocolo PIMv6 DM. No entanto, verificou-se que no caso do protocolo PIMv6 SM houve uma optimização na descoberta dos vizinhos PIM, uma vez que cada *router multicast* ao receber a primeira mensagem *Hello* de um novo vizinho PIM, envia imediatamente uma mensagem *Hello* e desta forma, o novo *router* conhece mais rapidamente os seus vizinhos PIM, não tendo que aguardar pelo envio periódico das mensagens *Hello* para os ficar a conhecer.

Ao contrário do que acontece no protocolo PIMv6 DM, o encaminhamento dos pacotes de dados destinados a um determinado grupo só é feito quando os receptores manifestam interesse em aderir a uma dada sessão *multicast*, isto é, o encaminhamento dos pacotes de dados é realizado apenas quando a árvore de distribuição central relativa a esse grupo se encontra criada. Quando um emissor começa a enviar pacotes de dados e não existem receptores interessados, o DR do emissor envia periodicamente mensagens *Register* (contendo os pacotes de dados encapsulados) para o RP que por sua vez lhe responde com mensagens *Register-Stop*, evitando desta forma a inundação de pacotes de dados nas redes que interligam o RP e o DR do emissor. Durante o período de envio de mensagens *Register*, o DR envia periodicamente mensagens *Register-Null* (sem pacotes de dados encapsulados) com destino ao RP, evitando a ocupação desnecessária da largura de banda ao mesmo que continua a informar o RP que existe um emissor a enviar pacotes de dados para um determinado grupo *multicast*.

O envio dos pacotes de dados usando mensagens *Register* implica uma maior carga no DR do emissor e no RP, já que os pacotes de dados têm que ser encapsulados e descapsulados até serem encaminhados para a árvore de distribuição central. Este protocolo permite que, mediante os requisitos de processamento do RP, este possa aderir à árvore de distribuição por emissor quando for ultrapassado um determinado valor de ritmo de transmissão de mensagens *Register*, passando desta forma a receber os pacotes de dados nativamente, o que conduz a uma diminuição do processamento.

Inicialmente, o encaminhamento dos pacotes é feito através da árvore de distribuição central o que também pode conduzir a uma sobrecarga do RP e possível falha, especialmente para ritmos de transmissão elevados. Tendo em consideração este factor, o protocolo PIMv6 SM permite configurar nos DR's dos receptores um valor de ritmo de recepção de pacotes

encaminhados através da árvore de distribuição central e uma vez ultrapassado este valor, os DR's aderem à árvore de distribuição por emissor passando a receber por esta árvore *multicast* os pacotes enviados por esse emissor.

Em redes intermédias partilhadas, existem situações em que o mesmo pacote de dados é encaminhado por diferentes *routers* e à semelhança do que acontece com o protocolo PIMv6 DM, o mecanismo de *Assert* permite que seja eleito apenas um *router* como responsável pelo encaminhamento dos pacotes de dados para essa rede.

### 4.6.3. Cenário PIMv6 SM – Mecanismo *Bootstrap*

Nesta secção é analisado o funcionamento do mecanismo *Bootstrap*, em particular (i) o processo de eleição do *Bootstrap Router* (BSR) (com e sem prioridades), (ii) o processo de eleição do RP (com e sem prioridades) e (iii) o impacto criado no encaminhamento *multicast* quando existe uma falha no BSR eleito ou no RP eleito. As experiências baseiam-se na rede laboratorial apresentada na secção anterior cuja configuração aqui se repete (Figura 113).

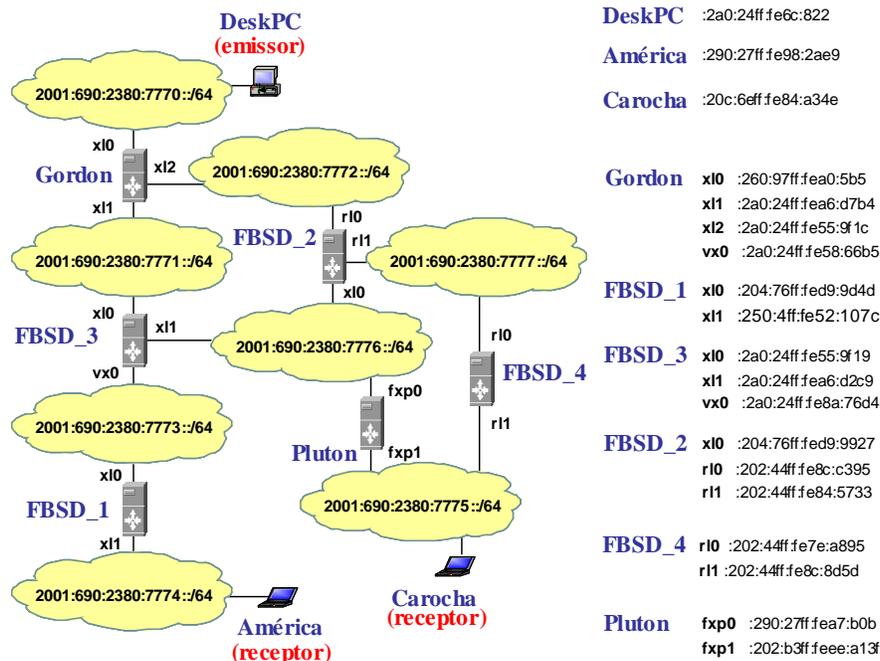


Figura 113 – PIMv6 SM: Mecanismo *Bootstrap*

### 4.6.3.1. Processo de eleição do BSR

#### Configurações:

O *router* FBSD\_2 foi configurado como candidato a RP e não foi especificado qual a interface a usar (sendo usada a que tiver o maior endereço IPv6 *unicast global*). Os *routers* FBSD\_3 e FBSD\_4 foram configurados como candidatos a BSR sem especificar qual a interface a usar (sendo usada a que tiver o maior endereço IPv6 *unicast global*). Os restantes parâmetros das configurações apresentadas de seguida, para cada um dos *routers*, são semelhantes à experiência anterior.

<p><b>Gordon:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  phyint x12 mld_version any;</p>	<p><b>FBSD_2:</b>  phyint r10 mld_version any;  phyint r11 mld_version any;  phyint x10 mld_version any;  <b>cand_rp;</b>  switch_register_threshold rate 300000 interval 20;</p>
<p><b>FBSD_3:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  phyint vx0 mld_version any;  <b>cand_bootstrap_router;</b></p>	<p><b>Pluton:</b>  phyint fxp0 mld_version any;  phyint fxp1 mld_version any;  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p>
<p><b>FBSD_1:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p>	<p><b>FBSD_4:</b>  phyint r10 mld_version any;  phyint r11 mld_version any;  <b>cand_bootstrap_router;</b>  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p>

#### Procedimento Experimental:

1. Depois de activar o encaminhamento *unicast*, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers*, com excepção do *router* FBSD\_4. O *router* FBSD\_3 (BSR) através das mensagens *Hello* verifica que em cada uma das suas interfaces é activado um vizinho PIM e envia uma mensagem *Bootstrap unicast* a cada um dos vizinhos, de forma a que estes conheçam rapidamente qual o BSR da rede. A partir do momento em que cada *router* conhece qual o BSR da rede reencaminha a mesma mensagem *Bootstrap* para os seus vizinhos PIM, propagando-se desta forma, essa informação por toda a rede (conforme descrito na secção 4.4). A Figura 114 ilustra a sequência de pacotes inicialmente trocados na rede 2001:690:2380:7776::/64.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
10	3.673660	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Hello
22	7.862993	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Hello
23	7.865254	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Hello
24	7.865669	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	fe80::290:27ff:fea7:b0b	PIMv2	Bootstrap
48	16.483519	fe80::204:76ff:fed9:9927	ff02::d	PIMv2	Hello
49	16.484106	fe80::290:27ff:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Hello
50	16.485747	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Hello
51	16.486165	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	fe80::204:76ff:fed9:9927	PIMv2	Bootstrap

Frame 51 (80 bytes on wire, 80 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 3com\_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9), Dst: 3com\_d9:99:27 (00:04:76:d9:99:27)  
 Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 26  
 Next header: PIM (0x67)  
 Hop limit: 64  
 Source address: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9  
 Destination address: fe80::204:76ff:fed9:9927  
 Protocol Independent Multicast  
 Version: 2  
 Type: Bootstrap (4)  
 Checksum: 0xc219 [correct]  
 PIM parameters  
 Fragment tag: 0xd835  
 Hash mask len: 126  
 BSR priority: 0  
 BSR: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9

Endereço IPv6 *unicast link-local* (Interface x11 FBSD\_3)  
 Endereço IPv6 *unicast link-local* (Interface x10 FBSD\_2)  
 Tipo de Mensagem PIM  
 Fragmento  
 Endereço IPv6 *unicast global* do BSR (Interface x11 do FBSD\_3)

Figura 114 – Envio de mensagens *Bootstrap* do *router* FBSD\_3 para os vizinhos PIM

O endereço IPv6 *unicast global* que identifica o BSR é o endereço da interface *x11* do *router* FBSD\_3 (interface com maior endereço IPv6 *unicast global*). A partir do momento em que o *router* FBSD\_2 conhece qual é o BSR (*router* FBSD\_3) da rede envia-lhe uma mensagem *Candidate-RP-Advertisement* (Figura 115) com o seu endereço que identifica o RP e a gama de grupos *multicast* que serve. Como não foi especificada nenhuma interface no candidato a RP (FBSD\_2), é usado o endereço da interface *r11* (maior endereço IPv6 *unicast global*) e como não foi especificado nenhuma gama de grupos *multicast*, o RP serve a gama FF00::/8.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
67	21.550592	2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733	2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9	PIMv2	Candidate-RP

Frame 67 (80 bytes on wire, 80 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 3com\_d9:99:27 (00:04:76:d9:99:27), Dst: 3com\_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9)  
 Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 26  
 Next header: PIM (0x67)  
 Hop limit: 64  
 Source address: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733  
 Destination address: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9  
 Protocol Independent Multicast  
 Version: 2  
 Type: Candidate-RP-Advertisement (8)  
 Checksum: 0x5e4c [correct]  
 PIM parameters  
 Prefix-count: 0  
 Priority: 0  
 Holdtime: 150  
 RP: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733

Endereço IPv6 *unicast global* (Interface r10 FBSD\_2)  
 Endereço IPv6 *unicast global* (Interface x10 FBSD\_2)  
 Tipo de Mensagem PIM  
 Tempo de vida  
 Endereço IPv6 *unicast global* do RP (Interface r11 do FBSD\_2)

Figura 115 – Mensagem *Candidate-RP-Advertisement* enviada pelo *router* FBSD\_2

A mensagem *Candidate-RP-Advertisement* é enviada periodicamente (de 60 em 60 segundos) do candidato a RP para o BSR eleito. O tempo de vida (150 segundos especificado no campo *Holdtime*) de um candidato a RP é actualizado por cada mensagem *Candidate-RP-Advertisement* que o BSR *router* recebe e uma vez expirado, o BSR deixa de anunciar esse RP para a rede. O

BSR envia periodicamente (de 60 em 60 segundos) mensagens *Bootstrap* e a partir desta fase passa a incluir também nas mensagens a informação relativa ao RP. A Figura 116 ilustra as mensagens enviadas na rede 2001:690:2380:7776::/64. As mensagens *Bootstrap* são encaminhadas pelos vizinhos PIM, permitindo desta forma que todos os *routers multicast* conheçam qual o endereço do RP e a gama de grupos *multicast* que serve.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
67	21.550	2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733	2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9	PIMv2	Candidate-RP-
173	74.063	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Bootstrap
187	82.092	2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733	2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9	PIMv2	Candidate-RP-
217	134.43	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	ff02::d	PIMv2	Bootstrap

```

Frame 217 (126 bytes on wire, 126 bytes captured)
Ethernet II, Src: 3com_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:0d (33:33:00:00)
Internet Protocol version 6
Protocol Independent Multicast
  Version: 2
  Type: Bootstrap (4)
  Checksum: 0x6f7d [correct]
  PIM parameters
    Fragment tag: 0xd837
    Hash mask len: 126
    BSR priority: 0
    BSR: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9
    Group 0: ff00::/8
      RP count: 1
      FRP count: 1
      RP 0: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733
      Holdtime: 150
      Priority: 0
  
```

Figura 116 – Envio periódico de mensagens *Candidate-RP-Advertisement* e *Bootstrap*

Através do comando **pim6stat**, pode-se analisar a informação *multicast* do *router* FBSD\_3, sendo a informação dos restantes *routers* semelhante à apresentada.

```

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9 Prio: 0 Timeout: 55
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733(fe80::204:76ff:fed9:9927%x11)
ff00::/8                                   0    150  90
  
```

A tabela *RP-Set*, contém na entrada *Current BSR address* o endereço do BSR da rede (endereço IPv6 *unicast global* da interface *x11* do *router* FBSD\_3), a prioridade do BSR (neste caso ‘0’, valor por omissão) e o tempo de vida do BSR (renovado a 150 segundos por cada mensagem *bootstrap*). Na entrada *RP-address*, é apresentado o endereço do RP (endereço IPv6 *unicast global* da interface *r11* do *router* FBSD\_2) para a gama FF00::/8, a prioridade do RP (neste caso ‘0’, valor por omissão) e o tempo de vida (parâmetro *Age*) do RP.

2. De seguida, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_4. Cada vizinho PIM (*router* Pluton e *router* FBSD\_2), assumindo o papel de DR da sua rede, enviou uma mensagem *Bootstrap unicast* (pacote 235 da Figura 117 relativo ao *router* FBSD\_2) com destino ao *router* FBSD\_4, informando-o de uma forma rápida qual o BSR e o RP da rede. Uma vez que ambos os candidatos a BSR (*routers* FBSD\_4 e FBSD\_3) têm igual prioridade, a

eleição do BSR é feita através do maior endereço IPv6 *unicast global*, ou seja, neste caso o BSR é o *router* FBSD\_4 (tem o endereço da interface *r10* maior do que o endereço da interface *x11* do *router* FBSD\_3). Ao assumir-se como BSR, o *router* FBSD\_4 responde com uma mensagem *Bootstrap unicast* (pacotes 237 da Figura 117) a cada vizinho PIM que previamente lhe enviou uma mensagem *Bootstrap unicast*, informando-o que é o BSR eleito e conseqüentemente o responsável por enviar mensagens *Bootstrap*. Nesta fase, as mensagens ainda não têm qualquer informação acerca do RP, mas a partir do momento em que conhece o RP através das mensagens *Candidate-RP-Advertisement* (pacote 246 da Figura 117) enviadas pelo *router* FBSD\_2 (RP), passou a incluir essa informação nas mensagens *Bootstrap* (pacote 297 da Figura 117). Verificou-se que o *router* FBSD\_2 deixou de enviar mensagens *Candidate-RP-Advertisement* com destino ao *router* FBSD\_3 e passou apenas a enviá-las com destino ao *router* FBSD\_4.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
233	203.11573	fe80::202:44ff:fe7e:a895	ff02::d	PIMv2	Hello
234	203.11698	fe80::202:44ff:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Hello
235	203.11735	fe80::202:44ff:fe84:5733	fe80::202:44ff:fe7e:a895	PIMv2	Bootstrap
236	203.13584	fe80::202:44ff:fe7e:a895	ff02::d	PIMv2	Hello
237	203.13634	fe80::202:44ff:fe7e:a895	fe80::202:44ff:fe84:5733	PIMv2	Bootstrap
242	219.37033	fe80::202:44ff:fe84:5733	ff02::d	PIMv2	Bootstrap
243	219.37045	fe80::202:44ff:fe7e:a895	ff02::d	PIMv2	Bootstrap
246	221.38066	2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733	2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895	PIMv2	Candidate-RP-
297	279.92082	fe80::202:44ff:fe7e:a895	ff02::d	PIMv2	Bootstrap

☒ Frame 297 (126 bytes on wire, 126 bytes captured)  
 ☒ Ethernet II, Src: 193.136.92.107 (00:02:44:7e:a8:95), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery\_00:00:00:0d (33:33:00:00:c  
 ☒ Internet Protocol version 6  
 ☒ Protocol Independent Multicast  
   Version: 2  
   Type: Bootstrap (4)  
   Checksum: 0xf845 [correct]  
 ☒ PIM parameters  
   Fragment tag: 0x64e2  
   Hash mask len: 126  
   BSR priority: 0  
   BSR: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895  
   ☒ Group 0: ff00::/8  
     RP count: 1  
     FRP count: 1  
     RP 0: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733  
     Holdtime: 150  
     Priority: 0

Endereço IPv6 *unicast global* do BSR  
(Interface *r10* do FBSD\_4)

Figura 117 – Troca de mensagens na eleição do *router* FBSD\_4 como novo BSR

Nesta fase, todos os *routers* conhecem o novo BSR da rede e o RP a usar. De seguida é apresentada a informação do *router* FBSD\_3 (semelhante aos outros *routers*).

```

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895 Prio: 0 Timeout: 130
RP-address(Upstream)/Group prefix                               Prio Hold Age
2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733(fe80::204:76ff:fed9:9927%x11)
ff00::/8
  
```

3. Depois de configurar a aplicação *VideoLan* no emissor DeskPC para enviar tráfego (a um ritmo de 192 Kbps) com destino ao grupo FF0e::77:1111 e dos receptores Carocha e América aderirem a esse grupo *multicast*, provocou-se uma falha no BSR eleito (FBSD\_4) desactivando para esse efeito o protocolo de encaminhamento *multicast*.

Verificou-se que até expirar o tempo de vida FBSD\_4 (150 segundos) do BSR, o *router* FBSD\_2 continua a enviar mensagens *Candidate-RP-Advertisement* com destino ao *router* FBSD\_4, porque manteve essa informação na sua tabela *RP-Set*. Uma vez expirado o tempo de vida do BSR, o *router* FBSD\_3 assumiu-se novamente como o BSR da rede actuando de igual forma ao explicado no ponto 1. Nesta fase, durante o período de tempo que os *routers* não têm a informação de quem é o RP, resultante do processo de eleição do novo BSR, verificou-se que os receptores deixaram de receber pacotes de dados *multicast*.

De seguida, voltou-se a activar o protocolo de encaminhamento *multicast* no FBSD\_4 (situação descrita no ponto 2) e o *router* FBSD\_4 passou a ser novamente o BSR eleito. Nesta fase, como os *routers multicast* não deixaram de saber qual o RP a usar, verificou-se que os receptores continuaram a receber os pacotes de dados, ou seja, nesta situação o processo de eleição do BSR não afectou o encaminhamento dos pacotes de dados *multicast*.

4. Um dos objectivos desta experiência é também verificar de que forma é que se pode condicionar o processo de eleição do BSR usando prioridades. Para esse efeito, desactivou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no FBSD\_3 e configurou-se para ser candidato a BSR com prioridade ‘1’ (alterando a seguinte instrução no ficheiro de configuração *cand\_Bootstrap\_router priority 1;*), assumindo desta forma maior prioridade do que a prioridade do *router* FBSD\_4 (por omissão com a prioridade ‘0’). De seguida, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_3 e verificou-se que foi eleito o BSR da rede, passando a ser o responsável por enviar as mensagens *Bootstrap* (Figura 118) com a informação do RP.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
15782	1857.865083	fe80::2a0:2411:1ea6:d2c9	:::d	PIMv2	Bootstrap

```

+ Frame 15782 (126 bytes on wire, 126 bytes captured)
+ Ethernet II, Src: 3com_a6:d2:c9 (00:a0:24:a6:d2:c9), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery.
+ Internet Protocol version 6
+ Protocol Independent Multicast
  version: 2
  Type: Bootstrap (4)
  Checksum: 0x7dde [correct]
+ PIM parameters
  Fragment tag: 0xc9d5
  Hash mask len: 126
  BSR priority: 1
  BSR: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9
+ Group 0: ff00::/8
  RP count: 1
  FRP count: 1
  RP 0: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733
  Holdtime: 150
  Priority: 0
  
```

Figura 118 – Mensagem *Bootstrap* com prioridades enviada pelo *router* FBSD\_3

Nesta fase, todos os *routers* da rede têm conhecimento de qual o novo BSR da rede e qual o RP a usar. De seguida apresentamos a informação do *router* FBSD\_3, sendo essa informação semelhante em todos os *routers*.

```
-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:220:24ff:fea6:d2c9 Prio: 1 Timeout: 130
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7777:202:44ff:fe84:5733(fe80::2a0:24ff:fe8a:76d4%x10)
ff00::/8                                   0      150  120
```

#### 4.6.3.2. Processo de eleição do RP

##### Configurações:

As configurações efectuadas para cada um dos *routers*, encontram-se apresentadas de seguida.

<p><b>Gordon:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  phyint x12 mld_version any;</p> <p><b>FBSD_3:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  phyint vx0 mld_version any;</p> <p><b>Pluton:</b>  phyint fxp0 mld_version any;  phyint fxp1 mld_version any;  <b>cand_bootstrap_router;</b>  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p>	<p><b>FBSD_2:</b>  phyint r10 mld_version any;  phyint r11 mld_version any;  phyint x10 mld_version any;</p> <p><b>FBSD_1:</b>  phyint x10 mld_version any;  phyint x11 mld_version any;  <b>cand_rp;</b>  switch_register_threshold rate 300000 interval 20;  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p> <p><b>FBSD_4:</b>  phyint r10 mld_version any;  phyint r11 mld_version any;  <b>cand_rp;</b>  switch_register_threshold rate 300000 interval 20;  switch_data_threshold rate 300000 interval 20;</p>
--	--

O *router* Pluton foi configurado como candidato a BSR e não foi especificado qual a interface a usar. Os *routers* FBSD\_3 e FBSD\_4 foram configurados como candidatos a RP sem especificar qual a interface a usar (sendo usada a que tiver o maior endereço IPv6 *unicast global*). Os restantes parâmetros de configuração foram explicados anteriormente.

##### Procedimento Experimental:

1. Depois de activar o encaminhamento *unicast*, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers*, com excepção do *router* FBSD\_4. Ao serem enviadas mensagens *Bootstrap* pelo *router* Pluton contendo a informação do RP (neste caso o FBSD\_1), todos os *routers* têm na sua tabela *RP-Set* informação semelhante à apresentada para o *router* FBSD\_3:

```
-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 145
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c(fe80::204:76ff:fed9:9d4d%vx0)
ff00::/8                                   0      150  135
```

Neste caso, o BSR da rede é o *router* Pluton, sendo escolhida a interface com maior endereço IP (interface *fxp0*) para identificar o BSR. O RP que serve a gama FF00::/8 é identificado pelo endereço da interface *x11* do FBSD\_1 e como não foi definida nenhuma prioridade no ficheiro de configuração, assume a prioridade ‘0’ por omissão.

2. De seguida, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_4 e a partir do momento em que conheceu o BSR da rede (*router* Pluton), passou a enviar-lhe mensagens *Candidate-RP-Advertisement*. Nesta fase, o *router* Pluton passou a receber mensagens *Candidate-RP-Advertisement* do *router* FBSD\_4 (pacote 147 da Figura 119) e do *router* FBSD\_1 (pacote 158 da Figura 119), registou na sua tabela *RP-Set* a informação relativa aos dois candidatos a RP e passou a enviar periodicamente mensagens *Bootstrap* (pacote 159 da Figura 119) com a informação dos dois RP.

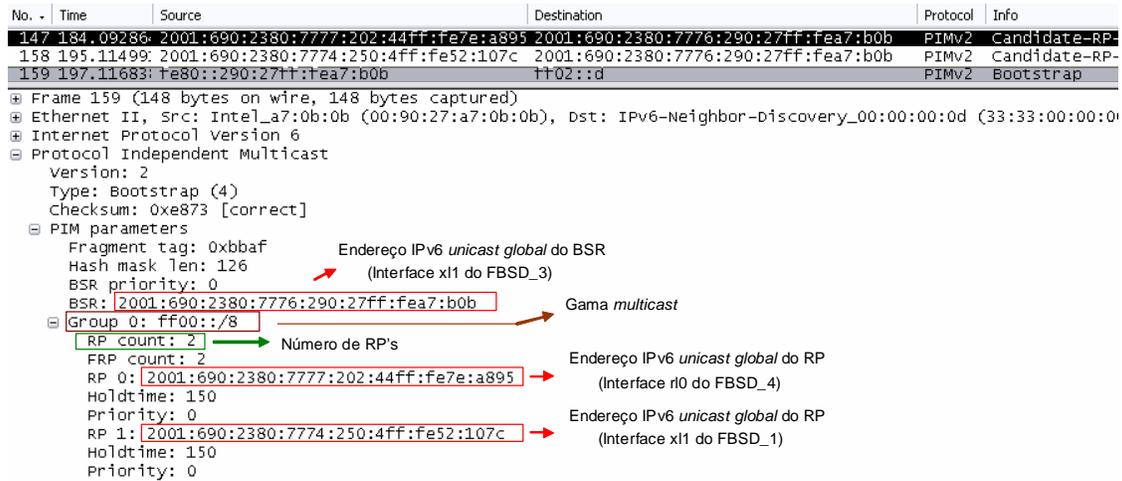


Figura 119 – Mensagens *Bootstrap* com dois RP's de igual prioridade

Nesta fase, todos os *routers* da rede conhecem quais os RP da rede. Como também não foi a gama de grupos *multicast* servida pelo *router* FBSD\_4, os dois RP's servem a mesma gama (FF00::/8), sendo eleito o *router* FBSD\_4 como o RP da rede já que o endereço IPv6 *unicast global* que o identifica é maior do que o endereço IPv6 *unicast global* que identifica o *router* FBSD\_1. A informação da tabela *RP-Set* do *router* FBSD\_3 é apresentada de seguida (semelhante à dos restantes *routers*).

```

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 140
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895(fe80::204:76ff:fed9:9927%x11)
    ff00::/8                                0    150 130
2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c(fe80::204:76ff:fed9:9d4d%vx0)
    ff00::/8                                0    150 130
    
```

3. Depois de configurar a aplicação *VideoLan* no emissor DeskPC para enviar tráfego (a um ritmo de 192Kbps com destino ao grupo FF0e::77:1111) e dos receptores Carocha e América aderirem a esse grupo (activando a aplicação *VideoLan*), verificou-se que o *router* Gordon encapsulou os pacotes de dados em mensagens *Register* (Figura 120) e enviou-as com destino ao *router* FBSD\_4 (RP eleito) que, por sua vez, descapsulou os pacotes de dados e encaminhou-os pela árvore de distribuição central composta pelos *routers* FBSD\_4 (origem da árvore), FBSD\_2, FBSD\_3 e FBSD\_1 (DR do receptor América) até aos receptores.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
312	643.200	2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222	ff0e::77:1111	PIMv2	Register

Frame 312 (1426 bytes on wire, 1426 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 3com\_55:9f:1c (00:a0:24:55:9f:1c), Dst: SurecomT\_8c:c3:95 (00:c0:50:06:08:c3:95)  
 Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 1372  
 Next header: PIM (0x67)  
 Hop limit: 64  
 Source address: 2001:690:2380:7772:2a0:24ff:fe55:9f1c  
 Destination address: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895  
 Protocol Independent Multicast  
 Version: 2  
 Type: Register (1) → Tipo de Mensagem PIM  
 Checksum: 0xa85c [correct]  
 PIM parameters  
 Flags: 0x00000000  
 0... .. = Not border  
 .0... .. = Not Null-Register  
 Internet Protocol version 6  
 Version: 6  
 Traffic class: 0x00  
 Flowlabel: 0x00000  
 Payload length: 1324  
 Next header: UDP (0x11)  
 Hop limit: 63  
 Source address: 2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222  
 Destination address: ff0e::77:1111  
 User Datagram Protocol, Src Port: 3191 (3191), Dst Port: 1234 (1234)  
 Data (1316 bytes)

Figura 120 – Mensagem *Register* enviado do *router* Gordon para o *router* FBSD\_4 (RP)

A informação *multicast* relativa ao *router* FBSD\_3 é apresentada de seguida:

```

Multicast Routing Table
Source      Group      RP-addr    Flags
-----
IN6ADDR_ANY ff0e::77:1111 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895 WC RP CACHE
Joined oifs: ..j..
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: ..o..
Incoming   : .I...
Upstream nbr: fe80::204:76ff:fed9:9927

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 155
RP-address(Upstream)/Group prefix      Prio Hold Age
2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895(fe80::204:76ff:fed9:9927%x11)
ff00::/8                                0      150 145
2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c(fe80::204:76ff:fed9:9d4d%vx0)
ff00::/8                                0      150 145
  
```

Posteriormente, provocou-se uma falha no *router* FBSD\_4 (RP eleito), desactivando para esse efeito o protocolo de encaminhamento *multicast* e verificou-se que os receptores deixaram de receber os pacotes de dados enviados pelo emissor. O *router* Pluton continuou a enviar

mensagens *Bootstrap* contendo a informação do *router* FBSD\_4 até expirar o seu tempo de vida (150 segundos no parâmetro *Age*). Uma vez expirado esse tempo de vida, como o Pluton passou apenas a receber mensagens *Candidate-RP-Advertisement* enviadas pelo *router* FBSD\_1, mantém na sua tabela *RP-Set* o *router* FBSD\_1, enviando mensagens *Bootstrap* apenas com o endereço do *router* FBSD\_1. Nesta fase, o *router* Gordon encapsula os pacotes de dados em mensagens *Register* (Figura 121) e envia-as com destino ao *router* FBSD\_1 (RP) que, por sua vez, descapsula os pacotes de dados e encaminha-os pela árvore de distribuição central composta pelos *routers* FBSD\_1 (origem da árvore e DR do receptor América), FBSD\_3 e Pluton (DR do receptor Carocha) até chegarem aos receptores.

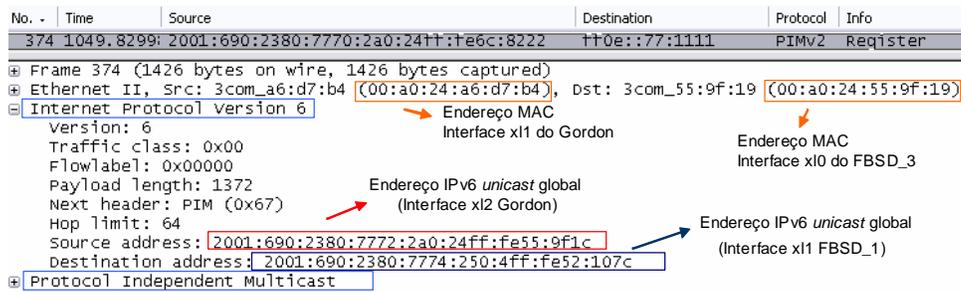


Figura 121 – Mensagem *Register* enviada do *router* Gordon para o *router* FBSD\_1 (RP)

A informação *multicast* para o *router* FBSD\_3 é apresentada de seguida:

```

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:1111  2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c  WC RP CACHE
Joined oifs: .jj.....
Pruned oifs: .....
Leaves oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: .oo.....
Incoming : ..I.....
Upstream nbr: fe80::204:76ff:fed9:9d4d

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 110
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c(fe80::204:76ff:fed9:9d4d%vx0)
ff00::/8                                   0      150  100
    
```

4. Um dos objectivos desta experiência é também verificar de que forma é que se pode condicionar o processo de eleição do RP usando prioridades. Para esse efeito, desactivou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_4 e configurou-se para ser candidato a RP com prioridade ‘1’ (alterando a seguinte instrução no ficheiro de configuração *cand\_rp priority 1*), assumindo desta forma menor prioridade em relação à prioridade do *router* FBSD\_1 (por omissão com a prioridade ‘0’). De seguida, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* no *router* FBSD\_4 e verificou-se que volta novamente enviar mensagens *Candidate-RP-Advertisement* com destino ao *router* Pluton (BSR). A partir desta fase, as mensagens *Bootstrap*

(Figura 122) passaram a ter novamente informação relativa aos dois RP's (FBSD\_1 e FBSD\_4).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
8129	1326.7574	fe80::290:27ff:fea7:b0b	:::d	PIMv2	Bootstrap

```

⊕ Frame 8129 (148 bytes on wire, 148 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: Intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery
⊕ Internet Protocol version 6
⊕ Protocol Independent Multicast
  Version: 2
  Type: Bootstrap (4)
  Checksum: 0x62c2 [correct]
  ⊕ PIM parameters
    Fragment tag: 0x4061
    Hash mask len: 126
    BSR priority: 0
    BSR: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b
    ⊕ Group 0: ff00::/8
      RP count: 2
      FRP count: 2
      RP 0: 2001:690:2380:7774:250:4ff:fe52:107c
      Holdtime: 150
      Priority: 0
      RP 1: 2001:690:2380:7777:202:44ff:fe7e:a895
      Holdtime: 150
      Priority: 1
  
```

Endereço IPv6 unicast global do BSR (Interface xl1 do FBSD\_3)

Gama multicast

Número de RP's

Endereço IPv6 unicast global do RP (Interface xl1 do FBSD\_1)

Prioridade

Figura 122 – Mensagem *Bootstrap* com dois RP's de diferente prioridade

Nesta fase verificou-se que todos os *routers* voltam a ter novamente conhecimento que a rede tem dois RP para a gama FF00::/8, continuando a ser o eleito o *router* FBSD\_1 uma vez que tem maior prioridade. Por este motivo, verificou-se que não houve interrupção no encaminhamento dos pacotes de dados.

### Conclusões:

No protocolo PIM SM o ponto fundamental é o RP, responsável por servir uma determinada gama de endereços *multicast*. A informação relativa ao RP, deve ser conhecida por todos os *routers* que executam o protocolo PIM SM, permitindo desta forma que se possam criar as árvores de distribuição central usadas no encaminhamento inicial dos pacotes de dados. A falha do RP e a forma como a rede se adapta de uma forma rápida a essa situação, é uma questão importante quando se considera o protocolo PIM SM, pretendendo-se minimizar ao máximo o impacto criado nas sessões *multicast* existentes.

O mecanismo *Bootstrap*, permite resolver estas questões. Por um lado, através de mensagens *Bootstrap* encaminhadas pela rede, todos os *routers multicast* que processem mensagens *Bootstrap* conhecem de forma automática qual a gama de endereços *multicast* servida por um dado RP. Por outro lado, este mecanismo permite que se possam configurar numa rede vários candidatos a BSR e vários candidatos a RP para a mesma gama *multicast*. Apesar da adaptação rápida do mecanismo *Bootstrap* a uma situação de falha do BSR ou do RP, as comunicações *multicast* são interrompidas momentaneamente até que seja eleito o novo BSR ou o novo RP.

Em cenários onde existam mais do que um candidato a BSR, ou mais do que um candidato a RP, o processo de eleição é baseado na configuração de prioridades, ou em caso de igual prioridade, é baseado no maior endereço IP *unicast* dos candidatos. Num dado instante de tempo, existe apenas um BSR (o eleito) que garante o funcionamento do mecanismo *Bootstrap* e, existe também apenas um RP que serve uma determinada gama, ficando os restantes candidatos preparados para os substituir em caso de falha.

#### 4.6.4. Cenário PIMv6 SSM

De forma a analisar o comportamento dos protocolos MLDv2 e PIMv6 SSM, em particular (i) os filtros das mensagens MLDv2 (na situação em que os receptores especificam os emissores desejados), (ii) a construção de árvores de distribuição por emissor, (iii) o corte de membros das árvores de distribuição por emissor e (iv) o comportamento do protocolo perante pedidos de adesão a sessões *multicast* ASM, configurou-se em laboratório a rede da Figura 123, composta por dois emissores, dois receptores e por seis *routers multicast*. Como protocolo de encaminhamento *unicast* foi usado o protocolo RIPng.

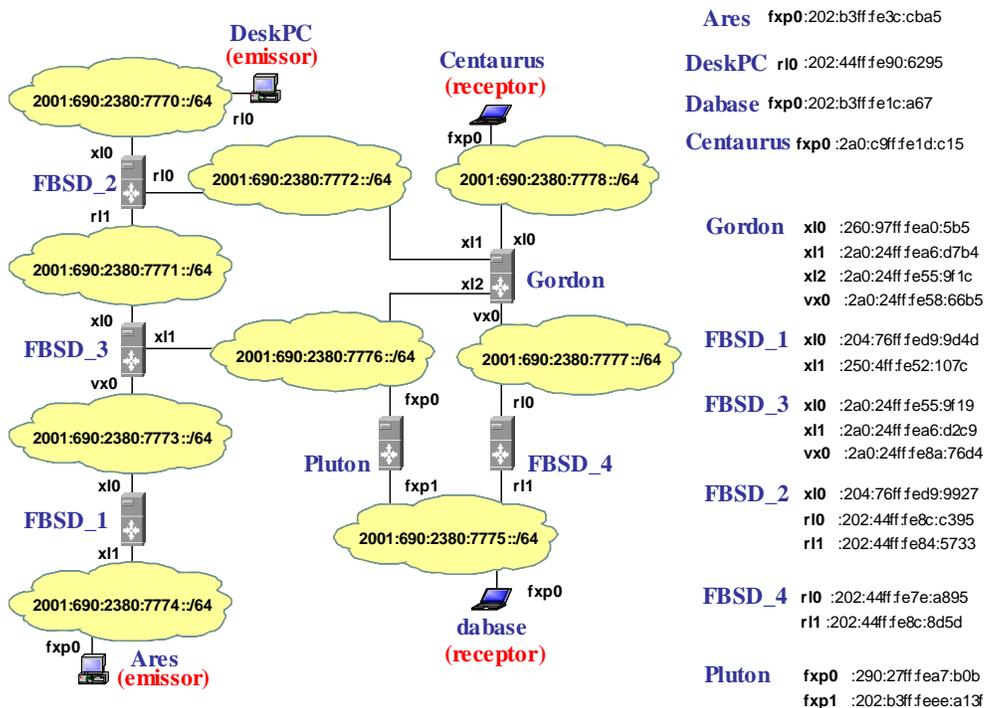


Figura 123 – Cenário PIMv6 SSM

Configurações:

As opções de configuração do protocolo PIMv6 SSM encontram-se no ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf` (à semelhança do que acontece com o protocolo PIMv6 SM). As configurações efectuadas para cada um dos *routers*, encontram-se apresentadas de seguida.

<p><b>Gordon:</b>  <code>phyint x10 mld_version any;</code>  <code>phyint x11 mld_version any;</code>  <code>phyint x12 mld_version any;</code>  <code>phyint vx0 mld_version any</code></p>	<p><b>FBSD_2:</b>  <code>phyint r10 mld_version any;</code>  <code>phyint r11 mld_version any;</code>  <code>phyint x10 mld_version any;</code></p>
<p><b>FBSD_3:</b>  <code>phyint x10 mld_version any;</code>  <code>phyint x11 mld_version any;</code>  <code>phyint vx0 mld_version any;</code></p>	<p><b>Pluton:</b>  <code>phyint fxp0 mld_version any;</code>  <code>phyint fxp1 mld_version any;</code></p>
<p><b>FBSD_1:</b>  <code>phyint x10 mld_version any;</code>  <code>phyint x11 mld_version any;</code></p>	<p><b>FBSD_4:</b>  <code>phyint r10 mld_version any;</code>  <code>phyint r11 mld_version any;</code></p>

Em todos os *routers* configuraram-se as interfaces para suportarem qualquer versão do protocolo MLD (MLD ou MLDv2).

Procedimento Experimental:

1. Depois de activar o encaminhamento *unicast*, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers* executando para esse efeito o comando:

```
/usr/local/v6/sbin/pim6sd -c /usr/local/v6/etc/pim6sd.conf
```

Inicialmente, cada *router multicast* envia uma mensagem *Hello*. À semelhança do que acontece para o protocolo PIMv6 SM, através das mensagens *Hello* conhecem-se os vizinhos PIM e é eleito o DR de uma rede local servida por mais do que um *router*. Quando é activado o protocolo de encaminhamento *multicast* num *router* de uma rede local, onde existem já outros *routers* activos, cada um dos *routers* activos ao verificar a existência de mensagens *Hello* enviadas por um novo *router*, envia imediatamente uma mensagem *Hello*, optimizando assim o processo de descoberta dos vizinhos PIM, à semelhança do que acontece com o protocolo PIMv6 SM. Posteriormente cada um dos *routers* envia periodicamente (de 30 em 30 segundos) mensagens *Hello*.

Através do comando ***pim6stat*** pode-se analisar a informação *multicast* do *router* Pluton, sendo a informação dos restantes *routers* semelhante à apresentada.

Multicast Interface Table			
Mif	PhyIF	Local-Address/Prefixlen	Scope Flags
0	fxp0	2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b/64	0 PIM_QRY
		fe80::290:27ff:fea7:b0b/64	1
		Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 2:00	
		possible MLD version = 1 2	
1	fxp1	2001:690:2380:7775:202:b3ff:feee:a13f/64	0 DR PIM
		fe80::202:b3ff:feee:a13f/64	2
		Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:45	
		possible MLD version = 1 2	

PIM Neighbor List			
Mif	PhyIF	Address	Timer
0	fxp0	fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9	90
		2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fea6:d2c9	
		fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c	90
		2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe55:9f1c	
1	fxp1	fe80::202:44ff:fe8c:8d5d	95
		2001:690:2380:7775:202:44ff:fe8c:8d5d	

A tabela *Multicast Interface Table* apresenta a lista de interfaces dos *routers*. Neste caso, o *router* Pluton é o DR da rede 2001:690:2380:7775::/64, já que a sua interface *fxp1* tem o endereço IPv6 *unicast link-local* maior do que o endereço da interface *r11* do *router* FBSD\_4. A tabela *PIM Neighbor List* apresenta a lista de vizinhos PIM composta pelos *routers* FBSD\_3 e Gordon, na rede 2001:690:2380:7776::/64 e pelo *router* FBSD\_4 na rede 2001:690:2380:7775::/64.

- De seguida, configurou-se a aplicação *mcastsend* nos emissores DeskPC e Ares para enviarem tráfego com destino ao grupo FF3e::77:1111 (endereço da gama SSM). Como nesta fase ainda nenhum dos receptores manifestou interesse em participar em qualquer sessão *multicast*, verificou-se que não foi criada nenhuma árvore de distribuição por emissor.
- O passo seguinte consistiu em configurar a aplicação *mcastread* no receptor Dabase para aderir à sessão *multicast* do emissor Ares para o grupo FF3e::77:1111. Através da mensagem MLDv2 *Report* (Figura 124), com o modo de filtragem a *Allow New Sources*, o grupo *multicast* e o endereço do emissor, o receptor sinalizou a rede da sua intenção em aderir a essa sessão *multicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1393	670.825531	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
+ Frame 1393 (106 bytes on wire, 106 bytes captured)					
+ Ethernet II, Src: 193.136.93.190 (00:02:b3:1c:0a:67), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:16					
+ Internet Protocol Version 6					
+ Hop-by-hop Option Header					
+ Internet Control Message Protocol v6					
Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2) → Tipo de Mensagem MLD					
Code: 0 (Should always be zero)					
Checksum: 0x5d46 [correct]					
+ Allow new sources: ff3e::77:1111 → Grupo multicast					
Mode: Allow new sources → Modo de Filtragem					
Aux data len: 0					
Multicast Address: ff3e::77:1111 → Endereço IPv6 unicast global do Ares (emissor)					
Source Address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5					

Figura 124 – Mensagem MLDv2 *Report* com emissor desejado

Depois de criar na sua tabela *Multicast Routing Table* o novo estado (S,G), composto pelo endereço IPv6 *unicast global* do emissor Ares e pelo grupo *multicast*, o *router* Pluton envia

periodicamente (de 60 em 60 segundos) mensagens *Join* pela sua interface RPF (interface *fxp0*) para o emissor, contendo o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *x11* do *router* FBSD\_3 (vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor Ares).

```

No. | Time | Source | Destination | Protocol | Info
---|---|---|---|---|---
693 | 693.978137 | fe80::290:27ff:fea7:b0b | ff02::d | PIMv2 | Join/Prune
896 | 754.113298 | fe80::290:27ff:fea7:b0b | ff02::d | PIMv2 | Join/Prune
+ Frame 693 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)
+ Ethernet II, Src: Intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_
+ Internet Protocol Version 6
+ Protocol Independent Multicast
  Version: 2
  Type: Join/Prune (3)
  Checksum: 0x54e9 [correct]
+ PIM parameters
  Upstream-neighbor: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9
  Groups: 1
  Holdtime: 210
+ Group 0: ff3e::77:1111/128
  Join: 1
  IP address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5/128
  Prune: 0
  
```

Figura 125 – Mensagem *Join* enviada pelo *router* Pluton

Nesta fase, a informação *multicast* relativa ao *router* Pluton é a apresentada de seguida.

```

Reported MLD Group
Mif PhyIF Group(Timer, MLD-ver(Filter-Mode, Compat-Timer))/Source(TimerID)
1 fxp1 ff3e::77:1111 (#0 (v2 IN #0))
  2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 (#125)

Multicast Routing Table
Source Group RP-addr Flags
----- (S,G) -----
2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 ff3e::77:1111 NULL CACHE SG
Joined oifs: ....
Pruned oifs: ....
Asserted oifs: ...
Outgoing oifs: .o..
Incoming : I...
Upstream nbr: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9
  
```

Tal como foi visto nas experiências práticas do capítulo 3, a tabela *Reported MLD Group* apresenta informação associada às interfaces (do *router*) que servem as redes locais onde existam receptores interessados em participar em sessões *multicast*. Neste caso, a entrada relativa à interface *fxp1* apresenta o grupo *multicast* e o endereço do emissor Ares, já que essa interface serve a rede 2001:690:2380:7775::/64 onde se encontra o receptor Dabase que manifestou interesse em participar nessa sessão *multicast*. Na tabela *Multicast Routing Table*, verifica-se que foi criado o estado (S,G). O significado da informação apresentada é o mesmo do explicado nas experiências práticas do protocolo PIMv6 SM. Note-se que, como não existe o conceito de RP no protocolo PIM SSM, a entrada *RP-addr* encontra-se com o valor NULL.

A árvore de distribuição do emissor Ares fica completa quando os *routers* FBSD\_3 e FBSD\_1 criam também o estado (S,G) nas suas tabelas *Multicast Routing Table* e, a partir desta fase, verificou-se que os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares foram encaminhados até ao

receptor Dabase através dessa árvore *multicast*, composta pelos *routers* FBSD\_1 (origem da árvore), FBSD\_3 e Pluton.

4. Ao configurar-se a aplicação *mcastread* no receptor Centaurus para aderir à sessão *multicast* do emissor DeskPC para o grupo FF3e::77:1111, o receptor envia mensagens MLDv2 *Report*, com o modo de filtragem a *Allow New Sources*, o grupo *multicast* e o endereço do emissor DeskPC, sinalizando desta forma a rede local acerca da sessão *multicast* pretendida. À semelhança do ilustrado no ponto anterior, verificou-se a construção da árvore de distribuição do emissor DeskPC usada para encaminhar os pacotes de dados (enviados pelo emissor) até ao receptor Centaurus, composta pelos *routers* FBSD\_2 (origem da árvore) e Gordon. A tabela *Multicast Routing Table* do *router* FBSD\_2, apresentada de seguida, contém uma entrada para o estado (S,G) relativa ao emissor Ares e ao grupo FF3e::77:1111.

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
----- (S,G) -----			
2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295	ff3e::77:1111	NULL	CACHE SG
Joined oifs:	j....		
Pruned oifs:	.....		
Asserted oifs:	.....		
Outgoing oifs:	o....		
Incoming :	..I..		
Upstream nbr:	NONE		

Nesta fase, verifica-se que estão criadas duas árvores de distribuição por emissor para o mesmo grupo *multicast*, razão pela qual o receptor Dabase recebe apenas os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares, enquanto que o receptor Centaurus recebe apenas os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC.

5. De seguida, executou-se a aplicação *mcastread* para aderir também à sessão *multicast* do emissor Ares para o grupo FF3e::77:1111 e verificou-se que a mensagem MLDv2 *Report* (Figura 126) passou a conter os endereços dos dois emissores associados ao mesmo grupo *multicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
374	1057.764430	fe80::2a0:c911:fe1d:c15	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
Frame 374 (122 bytes on wire, 122 bytes captured)					
Ethernet II, Src: Intel-Hf_1d:0c:15 (00:a0:c9:1d:0c:15), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:16					
Internet Protocol Version 6					
Hop-by-hop Option Header					
Internet Control Message Protocol v6					
Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2) → Tipo de Mensagem MLD					
code: 0 (Should always be zero)					
Checksum: 0xdb3e [correct]					
Allow new sources: ff3e::77:1111 → Grupo multicast					
Mode: Allow new sources → Modo de Filtragem					
Aux data len: 0					
Multicast Address: ff3e::77:1111 → Endereço IPv6 unicast global do DeskPC (emissor)					
Source Address: 2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295 → Endereço IPv6 unicast global do Ares (emissor)					
Source Address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5					

Figura 126 – Adesão do receptor Centaurus às duas sessões *multicast*

A tabela *MLD Report* do *router* Gordon apresenta os dois endereços dos emissores desejados na rede local servida pela interface *x10* e, na tabela *Multicast Routing Table*, foi acrescentado o novo estado relativo ao emissor Ares, tal como apresentado de seguida:

```

Reported MLD Group
Mif PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
x10 ff3e::77:1111 (#0 (v2 IN #0))
    2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 (#215)
    2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295 (#214)

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295 ff3e::77:1111  NULL            CACHE SG
Joined oifs: .....
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: o.....
Incoming      : .I....
Upstream nbr: fe80::202:44ff:fe8c:c395

-----
2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 ff3e::77:1111  NULL            CACHE SG
Joined oifs: .....
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: o.....
Incoming      : ..I...
Upstream nbr: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9

```

A árvore de distribuição do emissor Ares passou a incluir mais um membro (*router* Gordon) e, nesta fase, os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares passaram a ser recebidos pelos dois receptores (Centaurus e Dabase) enquanto que os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC foram apenas recebidos pelo receptor Centaurus.

6. Ao terminar a execução da aplicação *macstread* no receptor Dabase, este enviou duas mensagens *MLDv2 Report* (Figura 127) com o modo de filtragem a *Block Old Sources* e o endereço do emissor Ares, sinalizando desta forma a rede da sua intenção em abandonar a sessão *multicast* do emissor Ares.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
3760	1258.596837	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
3761	1258.596945	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2

```

# Frame 3760 (106 bytes on wire, 106 bytes captured)
# Ethernet II, Src: 193.136.93.190 (00:02:b3:1c:0a:67), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:16 (33:33:00)
# Internet Protocol Version 6
# Hop-by-hop Option Header
# Internet Control Message Protocol v6
  Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2) → Tipo de Mensagem MLD
  Code: 0 (Should always be zero)
  Checksum: 0x5c46 [correct]
  Block old sources: ff3e::77:1111 → Grupo multicast
  Mode: Block old sources → Modo de Filtragem
  Aux data len: 0
  Multicast Address: ff3e::77:1111 → Endereço IPv6 unicast global do Ares (emissor)
  Source Address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5

```

Figura 127 – Abandono do receptor Dabase à sessão *multicast* do emissor Ares

O *router* FBSD\_4 (QR da rede 2001:690:2380:7775::/64), enviou de seguida uma mensagem *MLDv2 Multicast-Source-Address-Specific Query* (Figura 128), contendo o endereço do emissor

Ares e o grupo *multicast*, para verificar se continuam a existir (nessa rede) receptores interessados nessa sessão *multicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
3760	1258.596837	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
3761	1258.596945	fe80::202:b3ff:fe1c:a67	ff02::16	ICMPv6	Multicast Listener Report Message v2
3762	1258.597850	fe80::202:4411:fe8c:8d5d	ff3e::77:1111	ICMPv6	Multicast Listener Query

```

⊕ Frame 3762 (106 bytes on wire, 106 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: SurecomT_8c:8d:5d (00:02:44:8c:8d:5d), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:77:11:11 (33:33)
⊕ Internet Protocol version 6
⊕ Hop-by-hop Option Header
⊕ Internet Control Message Protocol v6
  Type: 130 (Multicast listener query) → Tipo de Mensagem MLD
  Code: 0
  Checksum: 0x1fa6 [correct]
  Maximum response delay[ms]: 10000
  Multicast Address: ff3e::77:1111 → Grupo multicast
  S Flag: OFF
  Robustness: 2
  QQI: 125
  Source Address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5
  Endereço IPv6 unicast global do Ares (emissor)
  
```

Figura 128 – Mensagem MLDv2 *Multicast-Source-Address Specific Query* (router FBSD\_4)

Como não existem mais receptores interessados, o *router* Pluton (DR da rede 2001:690:2380:7775::/64) apagou da sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (S,G) relativo ao emissor Ares e ao grupo FF3e::77:1111 e enviou uma mensagem *Prune* (Figura 129), contendo o endereço do emissor Ares, o grupo *multicast* e o endereço IPv6 *unicast link-local* da interface *x11* do *router* FBSD\_3 (vizinho PIM no caminho de custo mínimo para o emissor), abandonando desta forma a árvore de distribuição do emissor Ares.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1897	1283.799788	fe80::290:2711:fea7:b0b	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

```

⊕ Frame 1897 (124 bytes on wire, 124 bytes captured)
⊕ Ethernet II, Src: Intel_a7:0b:0b (00:90:27:a7:0b:0b), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_
⊕ Internet Protocol version 6
⊕ Protocol Independent Multicast
  version: 2
  Type: Join/Prune (3) → Tipo de Mensagem PIM
  Checksum: 0x54e9 [correct]
  PIM parameters
  upstream-neighbor: fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9 → Endereço IPv6 unicast link-local (Interface x11 FBSD_3)
  Groups: 1
  Holdtime: 210
  Group 0: ff3e::77:1111/128 → Grupo multicast
  Join: 0
  Prune: 1
  IP address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5/128 (S)
  Endereço IPv6 unicast global do Emissor Ares
  
```

Figura 129 – Mensagem *Prune* enviada pelo *router* Pluton na direcção do emissor Ares

7. De seguida, configurou-se a aplicação *mcastsend* no emissor Ares para enviar tráfego com destino ao grupo FF0e::77:2222 (endereço da gama ASM) e configurou-se a aplicação *mcastread* no receptor Database para aderir à sessão *multicast* do emissor Ares para o grupo FF0e::77:2222.

A informação *multicast* relativa ao Pluton é a apresentada de seguida:

<b>Reported MLD Group</b>			
Mif	PhyIF	Group(Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)	
fxp1	ff0e::77:2222 (#0 (v2 IN #0))	2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 (#308)	
<b>Multicast Routing Table</b>			
Source	Group	RP-addr	Flags

Analisando a informação verificou-se que, apesar da tabela *Reported MLD Group* apresentar uma entrada com o grupo *multicast* (dentro da gama ASM) e o endereço do emissor Ares, não foi criado (na tabela *Multicast Routing Table*) o estado (S,G) relativo a esse emissor e a esse grupo, pelo que os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares para essa sessão *multicast* não foram encaminhados para qualquer troço da rede.

8. Finalmente, o receptor Centaurus abandonou (terminando a execução da aplicação *macstread*) a sessão *multicast* do emissor Ares. Como ainda tinha interesse em continuar a pertencer à sessão *multicast* do emissor DeskPC, verificou-se que a mensagem MLDv2 *Report* (Figura 130) enviada pelo receptor contém duas entradas relativas às sessões *multicast* do emissor DeskPC (de interesse) e do emissor Ares (abandono).

```

No. | Time | Source | Destination | Protocol | Info
---|---|---|---|---|---
551 | 2440.734301 | fe80::2a0:c911:fe1d:c15 | ff02::16 | ICMPv6 | Multicast Listener Report Message v2
  * Frame 551 (142 bytes on wire (142 bytes captured) on interface 0)
  * Ethernet II, Src: Intel-Hf_1d:0c:15 (00:a0:c9:1d:0c:15), Dst: IPv6-Neighbor-Discovery_00:00:00:16
  * Internet Protocol Version 6
  * Hop-by-hop Option Header
  * Internet Control Message Protocol v6
    Type: 143 (Multicast Listener Report Message v2)
    Code: 0 (Should always be zero)
    Checksum: 0xc462 [correct]
  * Allow new sources: ff3e::77:1111
    Mode: Allow new sources
    Aux data len: 0
    Multicast Address: ff3e::77:1111
    Source Address: 2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295
  * Block old sources: ff3e::77:1111
    Mode: Block old sources
    Aux data len: 0
    Multicast Address: ff3e::77:1111
    Source Address: 2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5
  
```

Figura 130 – Abandono do receptor Centaurus à sessão *multicast* do emissor Ares

Como nesta fase não existem mais receptores interessados na sessão *multicast* do emissor Ares para o grupo FF3e::77:1111, foram cortados os membros da árvore de distribuição desse emissor através de mensagens *Prune* enviadas pelos *routers* Gordon e FBSD\_3.

### Conclusões:

Em cenários em que numa rede local se encontram mais do que um *router multicast* activo, o processo de descoberta dos vizinhos PIM e da eleição do DR da rede é idêntico ao descrito para os protocolos anteriores.

O encaminhamento dos pacotes de dados enviados por um dado emissor para um determinado grupo, só é feito a partir do momento em que receptores manifestam interesse em aderir a sessão *multicast*, ou seja, o encaminhamento dos pacotes de dados é realizado apenas quando a árvore de distribuição por emissor se encontra criada.

Em cenários onde existam *routers multicast* configurados apenas para executar o protocolo PIMv6 SSM (basta que não haja nenhum RP configurado), só são suportadas as sessões *multicast* identificadas pelos endereços IP *multicast* dentro da gama SSM e pelos emissores desejados por parte dos receptores. Na situação em que um receptor manifeste interesse em aderir a uma sessão *multicast* identificada por um grupo *multicast* que não pertença à gama SSM e, mesmo que o receptor especifique a lista de emissores desejados, essas sessões *multicast* não são suportadas.

No protocolo PIMv6 SSM deixa de existir o conceito de RP e existe apenas o conceito de árvores de distribuição por emissor, tornando o funcionamento deste protocolo bastante mais simples do que o funcionamento do protocolo PIMv6 SM. Os mecanismos de adesão à árvore de distribuição por emissor e abandono dessa árvore são iguais aos do protocolo PIMv6 SM.

#### 4.6.5. Cenário PIMv6 SM e PIMv6 SSM

De forma a analisar a coexistência dos protocolos PIMv6 SM e PIMv6 SSM, permitindo assim comunicações *multicast* simultâneas para os modelos ASM e SSM, configurou-se em laboratório a rede da Figura 131. Como protocolo de encaminhamento *unicast* foi usado o protocolo RIPng.

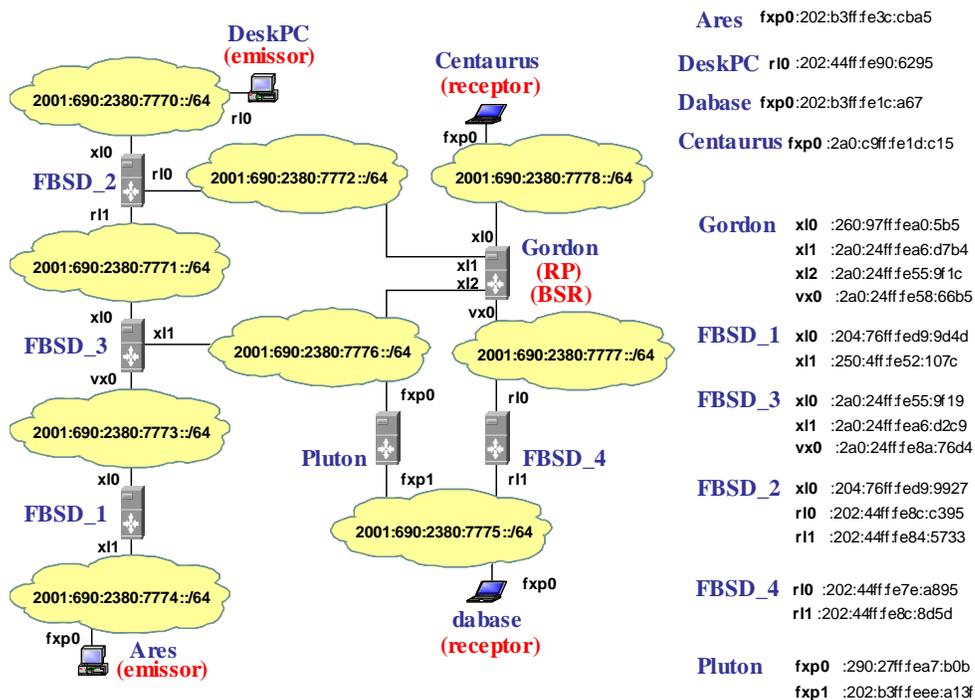


Figura 131 – Cenário PIMv6 SM e PIMv6 SSM

Configurações:

As configurações efectuadas para cada um dos *routers* (no ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf`), encontram-se apresentadas de seguida.

<b>Gordon:</b> <pre>phyint x10 mld_version any; phyint x11 mld_version any; phyint x12 mld_version any; phyint vx0 mld_version any; cand_rp; cand_bootstrap_router;</pre>	<b>FBSD_2:</b> <pre>phyint r10 mld_version any; phyint r11 mld_version any; phyint x10 mld_version any;</pre>
<b>FBSD_3:</b> <pre>phyint x10 mld_version any; phyint x11 mld_version any; phyint vx0 mld_version any;</pre>	<b>Pluton:</b> <pre>phyint fxp0 mld_version any; phyint fxp1 mld_version any;</pre>
<b>FBSD_1:</b> <pre>phyint x10 mld_version any; phyint x11 mld_version any;</pre>	<b>FBSD_4:</b> <pre>phyint r10 mld_version any; phyint r11 mld_version any;</pre>

Em todos os *routers* configuraram-se as interfaces para suportarem as duas versões do protocolo MLD. O *router* Gordon foi configurado como BSR e RP da rede (garantindo assim as sessões *multicast* ASM) e, como não foi especificada nenhuma interface para candidato a RP e BSR, é então assumida a interface que tem o maior endereço IPv6 *unicast global* (neste caso a interface `x/0`). Uma vez que não foi configurada nenhuma gama de endereços *multicast* a ser servida pelo RP, é assumida a gama `FF00::/8` para as sessões *multicast* ASM.

Procedimento Experimental:

1. Depois de activar o encaminhamento *unicast*, activou-se o protocolo de encaminhamento *multicast* em todos os *routers* executando para esse efeito o comando:

```
/usr/local/v6/sbin/pim6sd -c /usr/local/v6/etc/pim6sd.conf
```

Inicialmente, verificaram-se mensagens *Hello* trocadas periodicamente entre todos os *routers multicast* e de seguida verificaram-se mensagens *Bootstrap* enviadas pelo *router* Gordon e encaminhadas pelos restantes *routers*, permitindo desta forma que todos os *routers* conheçam qual o RP a usar para as sessões *multicast* ASM. Nesta fase, a informação *multicast* de todos os *routers* é semelhante à apresentada de seguida para o *router* Pluton.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen      Scope  Flags
0    fxp0  2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b/64  0      PIM_QRY
      fe80::290:27ff:fea7:b0b/64          1
      Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 2:00
      possible MLD version = 1 2
1    fxp1  2001:690:2380:7775:202:b3ff:feee:a13f/64  0      DR_PIM
      fe80::202:b3ff:feee:a13f/64          2
      Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:45
      possible MLD version = 1 2
2    lo0  fe80::1/64                                5      DISABLED
      ::1/128                              0
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1
3    regist  fe80::290:27ff:fea7:b0b/64              1      REGISTER
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF Address                               Timer
0    fxp0  fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9                 90
      2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fea6:d2c9
      fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c             90
      2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe55:9f1c
1    fxp1  fe80::202:44ff:fe8c:8d5d                 95
      2001:690:2380:7775:202:44ff:fe8c:8d5d

Multicast Routing Table
Source      Group      RP-addr      Flags
-----
Number of Groups: 0
Number of Cache MIRRORS: 0

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5 Prio: 0 Timeout: 130
RP-address(Upstream)/Group prefix      Prio Hold Age
2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5(fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c%fxp0)
ff00::/8                                0 150 120
    
```

2. De seguida, configurou-se a aplicação *mcastread* no emissor Ares para enviar tráfego com destino ao grupo *multicast* FF0e::77:2222 e a aplicação *mcastread* no receptor Dabase, para aderir à sessão *multicast* ASM identificada pelo grupo FF0e::77:2222. Depois de criada a árvore de distribuição central entre o *router* Gordon (origem da árvore) e o *router* Pluton (DR da rede 2001:690:2380:7775::/64), verificou-se que o receptor Dabase passa a receber os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares. Nesta fase, a tabela *Multicast Routing Table* do *router* Gordon apresenta o estado (\*,G) relativo ao grupo FF0e::77:2222.

```

Multicast Routing Table
Source      Group      RP-addr      Flags
-----
IN6ADDR_ANY  ff0e::77:2222  2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5 WC RP
Joined oifs: ..j...
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: ..o...
Incoming : .....I
Upstream nbr: NONE
    
```

3. Posteriormente, configurou-se a aplicação *mcastsend* no emissor DeskPC para enviar tráfego com destino ao grupo FF3e::77:1111 e configurou-se a aplicação *mcastread* no receptor Centaurus, para aderir à sessão *multicast* SSM identificada pelo emissor DeskPC e pelo grupo FF3e::77:1111. Depois de criada a árvore de distribuição do emissor DeskPC entre os *routers* FBSD\_2 (origem da árvore) e o Gordon (DR da rede 2001:690:2380:7778::/64), o receptor Centaurus passa a receber através dessa árvore *multicast* os pacotes de dados enviados pelo

emissor DeskPC. A tabela *Multicast Routing Table* do *router* Gordon passou a incluir o novo estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF3e::77:1111, tal como apresentado de seguida:

Multicast Routing Table			
Source	Group	RP-addr	Flags
-----(*,G)-----			
IN6ADDR_ANY	ff0e::77:2222	2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5	WC RP
Joined	oifs: ..j...		
Pruned	oifs: .....		
Asserted	oifs: .....		
Outgoing	oifs: ..o...		
Incoming	: .....		
Upstream nbr:	NONE		
----- (S,G) -----			
	2001:690:2380:7770:202:44ff:fe90:6295	ff3e::77:1111	NULL CACHE SG
Joined	oifs: .....		
Pruned	oifs: .....		
Asserted	oifs: .....		
Outgoing	oifs: o.....		
Incoming	: .I.....		
Upstream nbr:	fe80::202:44ff:fe8c:c395		

Nesta fase, verificou-se que os pacotes de dados enviados pelo emissor Ares são recebidos pelo receptor Dabase e que os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC são recebidos pelo receptor Centaurus, coexistendo no mesmo cenário a sessão *multicast* ASM e a sessão *multicast* SSM.

4. Ao configurar a aplicação *mcastsend* do emissor DeskPC para enviar tráfego com destino ao grupo FF0e::77:2222, o receptor Dabase passa a receber através da árvore de distribuição central (composta pelos *routers* Gordon e Pluton) os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC para além dos pacotes de dados enviados para esse grupo pelo emissor Ares, já que na sessão *multicast* ASM o receptor recebe os pacotes de dados enviados por qualquer emissor para esse grupo.

5. Ao terminar a execução da aplicação *mcastread* no receptor Centaurus, verificou-se o abandono por parte deste da sessão *multicast* SSM e, nesta fase, deixou de existir a árvore de distribuição do emissor DeskPC para o grupo FF3e::77:1111. O passo seguinte consistiu em configurar a aplicação *mcastread* no receptor Centaurus para aderir à sessão *multicast* do grupo FF3e::77:1111 (gama SSM), mas sem especificar qualquer emissor do qual pretende receber os pacotes de dados. Analisando a informação *multicast* do *router* Gordon (apresentada de seguida), verificou-se que apesar de existir na tabela *Reported MLD Group* uma entrada para o grupo FF3e::77:1111 de qualquer emissor e, apesar de existir um RP configurado na rede, não foi incluído na tabela *Multicast Routing Table* nenhum estado (\*,G) relativo a esse grupo

(FF3e::77:1111), existindo apenas o estado (\*,G) relativo à sessão *multicast* ASM (grupo FF0e::77:2222).

```

Reported MLD Group
Mif PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
x10 ff3e::77:1111 (#10 (v2 EX #0))
    (any source) (-)

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:2222  2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5 WC RP
Joined oifs:  ..j...
Pruned oifs:  .....
Asserted oifs:  .....
Outgoing oifs:  ..o...
Incoming      :  .....I
Upstream nbr:  NONE
    
```

Desta forma, verificou-se que o DR de uma rede não processa pedidos do receptor que manifesta interesse em aderir a grupos *multicast* dentro da gama SSM sem especificar os emissores desejados, motivo pelo qual o receptor Centaurus não recebe os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC com destino ao grupo FF3e::77:1111.

6. Finalmente, configurou-se a aplicação *mcastread* do receptor Dabase para aderir à sessão *multicast* do emissor Ares para o grupo FF3e::77:1111. Depois de criada a árvore de distribuição do emissor Ares, composta pelos *routers* FBSD\_1 (origem da árvore), FBSD\_3 e Pluton, verificou-se que o receptor Dabase passa também a receber os pacotes de dados, destinados ao grupo FF3e::77:1111, enviados pelo emissor Ares. Nesta fase, o receptor dabase recebe simultaneamente os pacotes de dados da sessão *multicast* ASM e da sessão *multicast* SSM. A informação *multicast* relativa ao *router* Pluton é a apresentada de seguida:

```

Reported MLD Group
Mif PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
1   fxp1 ff3e::77:1111 (#0 (v2 IN #0))
    2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 (#378)
fxp1 ff0e::77:2222 (#379 (v2 EX #0))
    (any source) (-)

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:2222  2001:690:2380:7778:260:97ff:fea0:5b5 WC RP
Joined oifs:  ....
Pruned oifs:  ....
Asserted oifs:  ....
Outgoing oifs:  ..o..
Incoming      :  I...
Upstream nbr:  fe80::2a0:24ff:fe55:9f1c

----- (S,G) -----
2001:690:2380:7774:202:b3ff:fe3c:cba5 ff3e::77:1111  NULL          CACHE SG
Joined oifs:  ....
Pruned oifs:  ....
Asserted oifs:  ....
Outgoing oifs:  ..o..
Incoming      :  I...
Upstream nbr:  fe80::2a0:24ff:fea6:d2c9
    
```

Na tabela *Reported MLD Group* encontram-se duas entradas relativas às sessões *multicast* ASM e SSM. Pelo mesmo motivo, a tabela *Multicast Routing Table* contém o estado (\*,G) relativo à sessão *multicast* ASM do grupo FF0e::77:2222 e o estado (S,G) relativo ao emissor Ares e ao grupo FF3e::77:1111.

### Conclusões

O DR de uma rede, não processa pedidos do receptor que manifesta interesse em aderir a uma sessão *multicast* identificada por um dado grupo dentro da gama SSM sem especificar os emissores desejados, garantindo desta forma que os pedidos de adesão a sessões *multicast* sem especificar os emissores desejados, são apenas processados para grupos *multicast* fora da gama SSM.

O suporte simultâneo de sessões *multicast* ASM e SSM, é possível em cenários onde os *routers multicast* suportem os protocolos PIMv6 SM e PIMv6 SSM. Estes cenários são de particular interesse, quando se pretende garantir na mesma infra-estrutura a coexistência de serviços de vídeo e áudio conferências (modelo ASM), em que tipicamente as estações assumem o papel de emissor/receptor e serviços de transmissão de vídeo ou rádio (modelo SSM), onde existe um emissor e vários receptores.



## Capítulo 5 – *Multicast* em redes mistas IPv4/IPv6 e em redes inter-domínio

Durante a transição do protocolo IPv4 para o protocolo IPv6, torna-se necessário introduzir nas redes o mais cedo possível, os novos serviços que são considerados fundamentais para a Internet do futuro. A transição do protocolo IPv4 para o protocolo IPv6 é feita tanto ao nível das comunicações *unicast*, como ao nível da comunicações *multicast* e não se irá realizar de um dia para o outro. Terá o seu início nas redes locais e estender-se-á gradualmente ao núcleo da Internet.

O futuro do protocolo IPv6 estará fortemente dependente da habilidade de o integrar nas redes IPv4 existentes, sem que existam situações significativas que provoquem a inoperabilidade dos serviços existentes. Se por um lado os utilizadores irão beneficiar das novas potencialidades introduzidas pelo IPv6, por outro, é importante que tenham a percepção que os serviços suportados pelo novo protocolo não são piores que os serviços suportados pelo seu antecessor.

Numa fase inicial, este capítulo descreve mecanismos de transição propostos pelo *Internet Engineering Task Force* (IETF) que podem ser usados nas comunicações *multicast* envolvendo redes IPv4 e redes IPv6. De seguida, apresenta experiências práticas que ilustram o funcionamento dos mecanismos de transição descritos.

As questões relacionadas com o encaminhamento *multicast* intra-domínio, não oferecem tantas dúvidas quando comparadas com as questões relacionadas com o encaminhamento *multicast* inter-domínio. Na parte final deste capítulo, são endereçadas soluções teóricas que permitem resolver algumas questões relacionadas com o encaminhamento *multicast* inter-domínio nos modelos ASM e SSM, considerando redes IPv4 e redes IPv6.

## 5.1. *Multicast* em redes mistas IPv4/IPv6

O IETF criou o grupo de trabalho *Next Generation Transition* (NGTrans) cuja missão principal foi estudar as melhores formas de integrar e de efectuar a transição entre os dois protocolos para as comunicações *unicast*. Foram especificadas várias técnicas [RFC 2893] que se destinam a ser usadas em sistemas terminais e/ou *routers*, as quais são denominadas de mecanismos de transição. Este grupo de trabalho foi substituído, no início de 2003, pelo grupo IPv6 *operations* (V6ops), que segue a mesma linha de trabalho do seu antecessor. Neste grupo, são endereçadas as questões relacionadas com o encaminhamento *unicast*. O IETF também criou um grupo de trabalho MBONE *Deployment* (*mbone*), cuja missão principal é resolver as questões relacionadas com as comunicações *multicast*.

Os mecanismos de transição propostos pelo IETF podem ser classificados em três tipos: (i) pilha dupla (*Dual Stack*); (ii) Mecanismos de túnel (*Tunneling Mechanisms*) e mecanismos de tradução (*Translation Mechanisms*). A definição destes mecanismos teve como motivação principal o suporte às comunicações *unicast*. No entanto, alguns deles podem ser usados para suporte de comunicações *multicast* em cenários mistos IPv4/IPv6.

Nas secções seguintes são descritos os diferentes mecanismos que permitem o suporte de comunicações *multicast* em cenários mistos.

### 5.1.1. Redes de pilha dupla

O mecanismo de transição pilha dupla (*Dual IP Stack*) [RFC 2893], tal como o nome indica, implica a presença das duas pilhas protocolares na mesma interface de rede, funcionando em paralelo e cabendo à aplicação a decisão de qual das duas usar. Desta forma, os dispositivos de rede têm a capacidade de receber e de enviar pacotes em qualquer uma das versões do protocolo IP. Um dispositivo que suporte pilha dupla pode comunicar com nós que só suportem uma das versões do protocolo IP.

As aplicações que usam IPv4 continuam a operar como antes. No entanto, para haver comunicação entre aplicações IPv4 e aplicações IPv6, é necessário que pelo menos uma delas suporte as duas versões do protocolo IP.

Este mecanismo pode ser implementado tanto em nós terminais, como em nós intermédios. O mecanismo de transição pilha dupla apresenta as seguintes desvantagens: (i) a escassez dos endereços IPv4 é uma das principais motivações para o aparecimento do IPv6, pelo que não faz sentido o uso de mecanismos de transição que exijam a atribuição de endereços IPv4 e (ii) com a presença de dois protocolos de rede, existirão no mínimo dois protocolos de encaminhamento *unicast* e dois protocolos de encaminhamento *multicast*, com o aumento de complexidade que daí advém. Este tipo de solução não estimula a transição para redes IPv6 nativas e não resolve problemas de interoperabilidade entre as aplicações que suportam versões diferentes do protocolo IP.

O campo de aplicação deste mecanismo, passa essencialmente pelas redes controladas por uma única organização. A tarefa de actualização (*Upgrade*) é simples e não envolve, na maioria dos casos, despesas com novo *hardware*, já que actualmente a maioria dos sistemas operativos dispõe de suporte para pilha dupla.

Em cenários onde existam redes que suportem mecanismo de transição de pilha dupla, as comunicações *multicast* continuam a processar-se como se tratasse de redes nativas IPv4 ou IPv6. Desta forma, garante-se que existem simultaneamente sessões *multicast* IPv4 e sessões *multicast* IPv6 na mesma infra-estrutura de rede, tanto para o modelo ASM, como para o modelo SSM. No modelo ASM pode ser usado o mesmo *router* que actue como RP para os grupos *multicast* IPv4 e IPv6. Para além dos nós terminais necessitarem de suportar as duas pilhas protocolares, é também necessário que as aplicações suportem as duas versões do protocolo IP.

### 5.1.2. Mecanismos de túnel

Os mecanismos de túnel são tipicamente usados para suportar as comunicações entre nós terminais e/ou nós intermédios (*routers*) do mesmo protocolo que estejam fisicamente interligados apenas por redes da outra versão do protocolo IP. Neste tipo de mecanismos, aos pacotes de uma dada versão do protocolo IP é-lhes adicionado um novo cabeçalho pertencente a outra versão do protocolo IP. À operação de colocação do novo cabeçalho é dado o nome de encapsulamento, sendo a operação inversa denominada por

descapsulamento. A primeira operação é realizada no início do túnel e a segunda é realizada no fim do túnel. Do ponto de vista lógico, um túnel é definido pela associação entre os endereços IP de início e de final de túnel.

No contexto dos cenários de transição IPv4/IPv6, podem existir dois tipos de túneis:

- Túneis IPv6 sobre IPv4 – Estes serão os túneis mais usados durante a fase inicial do período de transição, pois as infra-estruturas de rede usam maioritariamente o protocolo IPv4. Neste tipo de túneis, é adicionado aos pacotes IPv6 um cabeçalho IPv4 com o objectivo de se poderem usar as redes IPv4 para os transmitir. Na Figura 132, está representada a comunicação entre dois terminais IPv6 pertencentes a redes diferentes e cujas redes se encontram ligadas através de uma rede IPv4.
- Túneis IPv4 sobre IPv6 – Neste tipo de túneis, aos pacotes IPv4 é adicionado um cabeçalho IPv6 de forma a poderem ser encaminhados através das infra-estruturas IPv6. Este tipo de túneis será usado numa fase avançada do período de transição, quando o protocolo IPv6 estiver maioritariamente implementado nas redes de trânsito.

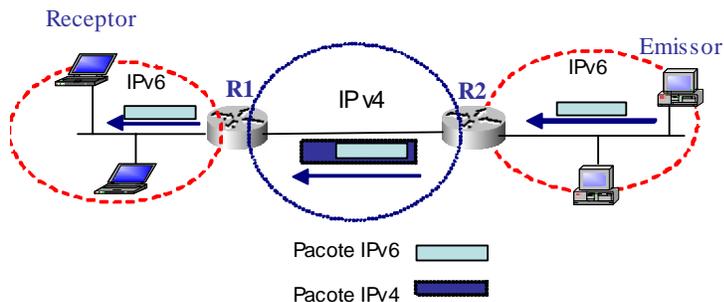


Figura 132 – Encapsulamento IPv6 sobre IPv4.

Ainda no contexto dos cenários de transição, os túneis podem ter origem e destino em nós intermédios (*routers*) ou nós terminais. Os túneis podem também ser classificados de acordo com a forma usada para determinar o endereço de fim de túnel:

- Túneis automáticos – Os sistemas que fazem o encapsulamento determinam automaticamente o endereço de fim de túnel. Neste tipo de túneis, são usados esquemas de endereçamento nos quais é inserida a informação respeitante ao endereço de fim de túnel. O mecanismo 6to4 [RFC 3056], é um exemplo deste tipo de túneis.
- Túneis configurados – Os sistemas que fazem o encapsulamento usam informação que lhes foi previamente configurada para determinar o endereço de fim de túnel.

Na grande maioria dos casos, a comunicação entre dois nós recorre apenas a um túnel. No entanto, em algumas situações é necessário recorrer a mais do que um túnel. Os túneis podem existir de uma forma hierárquica (túnel dentro de um túnel) ou sequencial (concatenação de túneis).

Nas comunicações *multicast* usam-se túneis para o transporte de mensagens de controlo dos protocolos de encaminhamento e para o encaminhamento dos pacotes de dados, em cenários em que *routers multicast* são interligados por redes IPv4 ou por redes IPv6 que não suportem encaminhamento *multicast*.

### 5.1.3. Mecanismos de tradução

Os mecanismo de transição do tipo tradutores são usados na comunicação entre dispositivos que suportem versões do protocolo IP incompatíveis. Actualmente, existe mais do que um mecanismo de tradução para comunicações *unicast*. No entanto para as comunicações *multicast*, conhecem-se apenas dois mecanismos: o “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*” [v4v6MG] e o “*Multicast Translation based on IGMP/MLD Proxying*” [MTP].

O mecanismo “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*” permite sessões *multicast* ASM comuns para redes IPv4 e para redes IPv6. A localização da estação que suporta este mecanismo, definida a partir deste ponto como tradutor, deve ser na rede fronteira entre as redes IPv4 e as redes IPv6, tendo obrigatoriamente que suportar as duas pilhas protocolares (IPv4 e IPv6), tal como ilustrado na Figura 133.

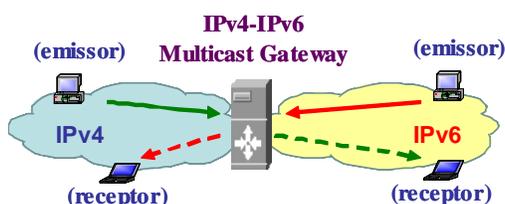


Figura 133 – IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*

Devido à estrutura do endereçamento IPv6, é possível inserir um endereço IPv4 num endereço IPv6. Para distinguir as sessões *multicast* IPv6 que devem passar pelo tradutor, das restantes sessões *multicast* IPv6, é definido pelo administrador do tradutor um prefixo de 96 bits que, juntamente com os 32 bits menos significativos usados para representar o endereço IPv4 *multicast*, formam o endereço IPv6 *multicast* (128 bits). Assim, os endereços IPv6 *multicast* usados para representarem sessões *multicast* IPv4, apresentam o formato

FFxy:<zzzz>a.b.c.d/96, em que os campos *flags* (x), *scope* (y) e <zzzz> são da competência do administrador do tradutor. Os 32 bits menos significativos (a.b.c.d) representam um qualquer endereço IPv4 *multicast*.

Este mecanismo realiza a tradução ao nível do cabeçalho IP, mantendo inalterado o campo dados de cada pacote (a norma é omissa quanto ao algoritmo a usar na tradução dos pacotes). Na tradução dos pacotes IPv4 para pacotes IPv6, o endereço destino dos pacotes de dados (endereço *multicast* IPv4) é inserido no endereço IPv6 *multicast* e o endereço IPv4 origem dos pacotes de dados, é substituído pelo endereço IPv6 *unicast global* do tradutor. Na tradução dos pacotes IPv6 para pacotes IPv4, são retirados do endereço destino (endereço IPv6 *multicast*) dos pacotes de dados, os 32 bits menos significativos que correspondem ao endereço IPv4 *multicast* e o endereço origem (IPv6 *unicast global*) dos pacotes de dados, é substituído pelo endereço IPv4 *unicast* do tradutor.

Este mecanismo de tradução requer que nas redes IPv6 seja configurado o protocolo PIMv6 SM, enquanto que nas redes IPv4 pode ser configurado um qualquer protocolo de encaminhamento *multicast*. Do lado IPv6, o tradutor funciona como RP e emissor, para os grupos *multicast* da gama (de 96 bits) definida pelo administrador e do lado IPv4, funciona como um emissor ou receptor.

O tradutor ao desempenhar a função de RP, por um lado recebe os pacotes de dados (encapsulados em mensagens *Register* ou nativamente) enviados por um emissor IPv6 com destino a um grupo *multicast* dentro da gama definida e envia esses pacotes de dados (assumindo-se como emissor) para o grupo IPv4 *multicast*, tal como explicado anteriormente. Por outro lado, através de mensagens PIM *Join* ou MLD *Report*, ao verificar a existência de receptores interessados em aderir a sessões *multicast* dentro da gama definida, assume-se na rede IPv4 como um receptor interessado em aderir à sessão *multicast* IPv4 correspondente, através do envio de mensagens IGMP *Report*. A partir do momento em que recebe os pacotes de dados dessa sessão *multicast* IPv4, passa a enviá-los (assumindo-se como emissor) para a sessão *multicast* IPv6 correspondente através da árvore *multicast* ou directamente (caso existam receptores nas suas redes locais).

Pelo facto de desempenhar o papel de RP na rede IPv6, o tradutor conhece os emissores e as sessões *multicast* (dentro da gama definida) pretendidas. No entanto, do lado IPv4 não conhece quais os emissores, nem quais as sessões *multicast* IPv4 de interesse. Por esse motivo, os pacotes de dados destinados a uma sessão *multicast* IPv6 (dentro da gama definida) são sempre

enviados para a rede IPv4, mesmo que não existam receptores que tenham manifestado interesse em aderir à correspondente sessão *multicast* IPv4.

Note-se que neste mecanismo, todos os possíveis emissores IPv4 são “vistos” pelos receptores IPv6 como um único emissor com o endereço IPv6 do tradutor e todos os possíveis emissores IPv6, são “vistos” pelos receptores IPv4 como um único emissor com o endereço IPv4 do tradutor, pelo que os receptores (IPv4 e IPv6) não têm forma de distinguir os pacotes de dados enviados por diferentes emissores (IPv6 e IPv4).

Relativamente ao mecanismo MTP, opera apenas ao nível dos protocolos de sinalização IGMP e MLD, exigindo que o administrador configure explicitamente quais as sessões *multicast* a traduzir. Pelo facto de não se conhecer nenhuma implementação prática deste mecanismo, não foi possível validá-lo experimentalmente.

#### 5.1.4. Experiências práticas

Nas experiências práticas realizadas até esta fase da dissertação, considerou-se que todas as redes IPv6 suportavam encaminhamento *multicast* IPv6. No entanto, podem existir cenários em que redes isoladas que suportem comunicações *multicast* IPv6 sejam interligadas por redes intermédias IPv6 que não suportem comunicações *multicast*, ou por redes IPv4. Nestes cenários, torna-se necessário usar túneis IPv6 sobre IPv6 configurados entre os *routers* IPv6 (que executam um qualquer protocolo de encaminhamento *multicast* IPv6) para o primeiro caso e torna-se necessário usar túneis IPv6 sobre IPv4 para garantir a conectividade *unicast* (essencial às comunicações *multicast*) entre as redes IPv6, para o segundo caso.

A participação de emissores e receptores IPv6 em sessões *multicast* IPv4, são garantidas à custa de mecanismos de tradução. Estes cenários também são considerados de grande interesse, porque a coexistência entre os dois protocolos deve ser considerada durante a fase de transição do protocolo IPv4 para o protocolo IPv6.

Esta secção apresenta inicialmente um conjunto de experiências práticas onde se configurou o protocolo PIMv6 SM num cenário com túneis configurados e as conclusões que se retiram, são extensíveis aos protocolos PIMv6 DM e PIMv6 SSM. De seguida, é apresentado um conjunto de experiências onde emissores e receptores IPv6 participam em sessões *multicast* IPv4, recorrendo para esse efeito à implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*”.

Como *routers* IPv6, são usadas estações FreeBSD 4.9 com a pilha *Kame* 26/07/2004 instalada e como *routers* IPv4, são usados *routers* Cisco 3620. Os *routers* IPv6 foram configurados para anunciar redes de 64 bits, possibilitando que os receptores adquiram de forma automática o endereço IPv6 *unicast global* (nas figuras que ilustram os cenários utilizados são apresentados os prefixos das redes e os 64 bits menos significativos dos endereços adquiridos que são construídos com base nos endereços MAC segundo a norma EUI-64).

### 5.1.4.1. PIMv6 SM em cenários de túneis

Para analisar os requisitos a impor nas comunicações *multicast* IPv6 em redes interligadas por redes IPv6 que não suportem protocolos de encaminhamento *multicast* IPv6, ou por redes IPv4, configurou-se em laboratório a rede da Figura 134, composta por quatro *routers* (Gordon, FBSD\_1, FBSD\_2 e Pluton) que suportam o protocolo PIMv6 SM, um *router* que suporta apenas encaminhamento *unicast* IPv6 (FBSD\_3), um *router* que suporta apenas o protocolo IPv4 (Cisco1) e três estações WindowsXP (DeskPC, Carocha e América) que executam a aplicação *Robust Audio Tool*<sup>11</sup> (RAT) [RAT], desempenhando simultaneamente o papel de emissor/receptor.

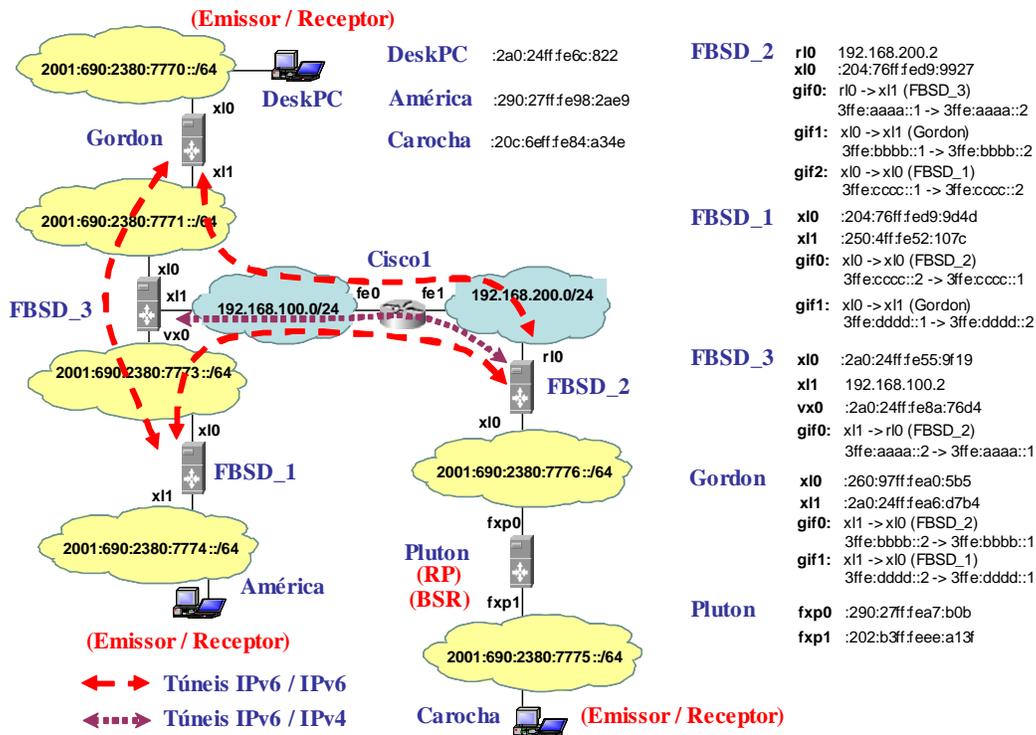


Figura 134 – Cenário PIMv6 SM com túneis configurados

<sup>11</sup> Aplicação usada para enviar/receber áudio

Configurações:

Inicialmente, foi configurado um túnel IPv6 sobre IPv4 entre os *routers* FBSD\_2 e FBSD\_3 para garantir a conectividade *unicast* entre todas as redes IPv6. Um túnel IPv6 sobre IPv4 é composto por dois endereços IPv4 (de início e fim de túnel) e por dois endereços IPv6 virtuais (de início e fim de túnel). Na implementação usada, a configuração dos túneis é realizada por linha de comandos e a interface de túnel é identificada por *gif*. A configuração do túnel IPv6 sobre IPv4 nos *routers* FBSD\_3 e FBSD\_2 é apresentada de seguida:

```
FBSD_3:
ifconfig gif0 inet6 3ffe:aaaa::2 3ffe:aaaa::1 prefixlen 128
gifconfig gif0 inet 192.168.100.2 192.168.200.2
ifconfig gif0 up

FBSD_2:
ifconfig gif0 inet6 3ffe:aaaa::1 3ffe:aaaa::2 prefixlen 128
gifconfig gif0 inet 192.168.200.2 192.168.100.2
ifconfig gif0 up
```

Para o *router* FBSD\_3, a primeira linha da configuração indica que a interface *gif0* tem como endereço virtual IPv6 de início de túnel, o endereço 3ffe:aaaa::2 e como endereço virtual IPv6 de fim de túnel, o endereço 3ffe:aaaa::2. A segunda linha, significa que é usado o endereço IPv4 real da interface *x11* e o endereço IPv4 real da interface *r10* do FBSD\_2. A terceira linha serve para activar o túnel, passando desta forma a existir mais uma interface no *router* FBSD\_3. Para o *router* FBSD\_2, o significado dos comandos é o mesmo dos explicados anteriormente.

Como foi descrito no capítulo 4, os vizinhos PIM conhecem-se através de mensagens *Hello* (com alcance *link-scoped*). A descoberta dos vizinhos PIM, é necessária para a divulgação do BSR e consequentemente do RP a usar (num cenário PIMv6 SM) e também para a construção das árvores *multicast* usadas no encaminhamento *multicast* dos pacotes de dados. No cenário apresentado, os *routers* FBSD\_2, FBSD\_1 e Gordon (que executam o protocolo de encaminhamento *multicast* PIMv6 SM) estão interligados por *routers* que não suportam nenhum protocolo de encaminhamento *multicast*, não processando por isso mensagens *Hello*, pelo que foram configurados túneis IPv6 sobre IPv6 entre: (i) o *router* FBSD\_2 e o *router* Gordon; (ii) o *router* FBSD\_2 e o *router* FBSD\_1; (iii) o *router* Gordon e o *router* FBSD\_1. A configuração dos três túneis IPv6 sobre IPv6 é a apresentada de seguida:

**FBSD\_2 ↔ Gordon****FBSD\_2:**

```
ifconfig gif1 inet6 3ffe:bbbb::1 3ffe:bbbb::2 prefixlen 128
gifconfig gif1 inet6 2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927 2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4
ifconfig gif1 up
```

**Gordon:**

```
ifconfig gif0 inet6 3ffe:bbbb::2 3ffe:bbbb::1 prefixlen 128
gifconfig gif0 inet6 2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4 2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927
ifconfig gif0 up
```

**FBSD\_2 ↔ FBSD\_1****FBSD\_2:**

```
ifconfig gif2 inet6 3ffe:cccc::1 3ffe:cccc::2 prefixlen 128
gifconfig gif2 inet6 2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927 2001:690:2380:7773:204:76ff:fed9:9d4d
ifconfig gif2 up
```

**FBSD\_1:**

```
ifconfig gif0 inet6 3ffe:cccc::2 3ffe:cccc::1 prefixlen 128
gifconfig gif0 inet6 2001:690:2380:7773:204:76ff:fed9:9d4d 2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927
ifconfig gif0 up
```

**Gordon ↔ FBSD\_1****Gordon:**

```
ifconfig gif1 inet6 3ffe:dddd::2 3ffe:dddd::1 prefixlen 128
gifconfig gif1 inet6 2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4 2001:690:2380:7773:204:76ff:fed9:9d4d
ifconfig gif1 up
```

**FBSD\_1:**

```
ifconfig gif1 inet6 3ffe:dddd::1 3ffe:dddd::2 prefixlen 128
gifconfig gif1 inet6 2001:690:2380:7773:204:76ff:fed9:9d4d 2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4
ifconfig gif1 up
```

A cada interface de túnel criada é associado um endereço IPv6 *unicast link-local* dado pelo menor dos endereços IPv6 *unicast link-local* das interfaces físicas que o *router* contém. No caso do *router* Gordon, as duas interfaces de túnel (*gif0* e *gif1*) contêm o mesmo endereço IPv6 *unicast link-local* igual ao endereço IPv6 *link-local* da interface física *x10*.

As configurações *multicast* (ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf`) efectuadas nos *routers*, foram as seguintes:

**Gordon:**

```
phyint x10 mld_version any;
phyint x11 disable;
phyint gif0 mld_version any;
phyint gif1 mld_version any;
switch_data_threshold rate 190000 interval 20;
```

**FBSD\_3:**

```
phyint x10 mld_version any;
phyint x11 mld_version any;
phyint vx0 mld_version any;
```

**FBSD\_1:**

```
phyint x10 disable;
phyint x11 mld_version any;
phyint gif0 mld_version any;
phyint gif1 mld_version any;
switch_data_threshold rate 190000 interval 20;
```

**FBSD\_2:**

```
phyint r10 disable;
phyint x10 mld_version any;
phyint gif0 disable;
phyint gif1 mld_version any;
phyint gif0 mld_version any;
```

**Pluton:**

```
phyint fxp0 mld_version any;
phyint fxp1 mld_version any;
cand_rp;
cand_bootstrap_router;
switch_register_threshold rate 19000 interval 20;
switch_data_threshold rate 190000 interval 20;
```

Em todos os *routers* IPv6, com exceção do *router* FBSD\_3, configuram-se as interfaces para suportarem as duas versões do protocolo MLD. Existem, no entanto, interfaces onde não se pretendeu activar as comunicações *multicast*, como é o caso da interfaces *x11* do *router* Gordon, da interface *x10* do *router* FBSD\_1 e da interface *gij0* (túnel IPv6 sobre IPv4) do *router* FBSD\_2. O *router* Pluton, foi configurado como BSR e RP da rede (garantindo assim as sessões *multicast* ASM) e como não foi especificada nenhuma interface para candidato a RP e BSR, é assumida a interface que tem o maior endereço IPv6 *unicast global* (neste caso a interface *fx0*). Uma vez que não foi configurada nenhuma gama de endereços *multicast* a ser servida pelo RP, é usada a gama *multicast* FF00::/8 para as sessões *multicast* ASM.

### Procedimento Experimental

1. Depois de configurar os túneis (IPv6 sobre IPv4 e IPv6 sobre IPv6), activou-se o protocolo de encaminhamento *unicast RIPng* nos *routers* IPv6 e verificou-se a conectividade *unicast* entre todas as redes IPv6. De seguida, activou-se o encaminhamento *multicast* nos *routers* (Gordon, FBSD\_1, FBSD\_2 e Pluton) e foram trocadas mensagens *Hello*, conhecendo-se desta forma os vizinhos PIM. O *router* Gordon, por exemplo, enviou periodicamente mensagens *Hello* nas suas interfaces de túnel. As mensagens enviadas no túnel *gij0* (configurado com o *router* FBSD\_2) são encapsuladas num pacote IPv6 (Figura 135) com endereço origem, o endereço IPv6 *unicast global* da interface *x11* do *router* Gordon e com endereço destino, o endereço IPv6 *unicast global* da interface *x10* do *router* FBSD\_2. De seguida, o *router* FBSD\_3 encapsula (Figura 136) esse pacote num pacote IPv4 (com endereço origem o endereço IPv4 da interface *x11* do *router* FBSD\_3 e com endereço destino o endereço IPv4 da interface *r10* do *router* FBSD\_2), que é encaminhado pelo *router* Cisco1 até ao *router* FBSD\_2. Ao receber o pacote, o *router* FBSD\_2 descapsula as mensagens *Hello* (contida nos pacotes IPv4 e IPv6) e fica a conhecer desta forma que na sua interface *gij1* (túnel IPv6 sobre IPv6) existe um vizinho PIM (*router* Gordon). As mensagens *Hello* enviadas, pelo *router* FBSD\_2 nas suas interfaces *gij1* e *gij2* e pelo *router* FBSD\_1 na sua interface *gij0*, são encapsuladas e descapsuladas de forma semelhante à explicada.

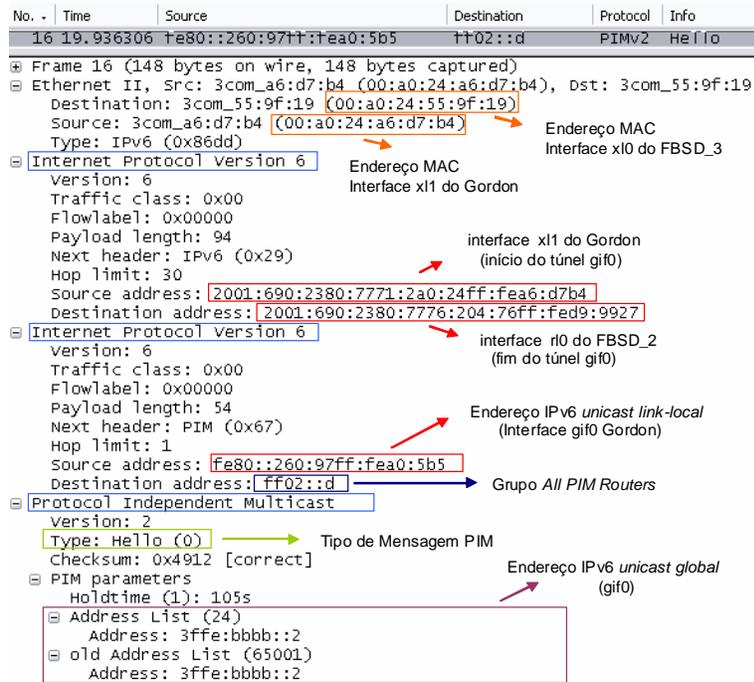


Figura 135 – Mensagem Hello encapsulada num pacote IPv6

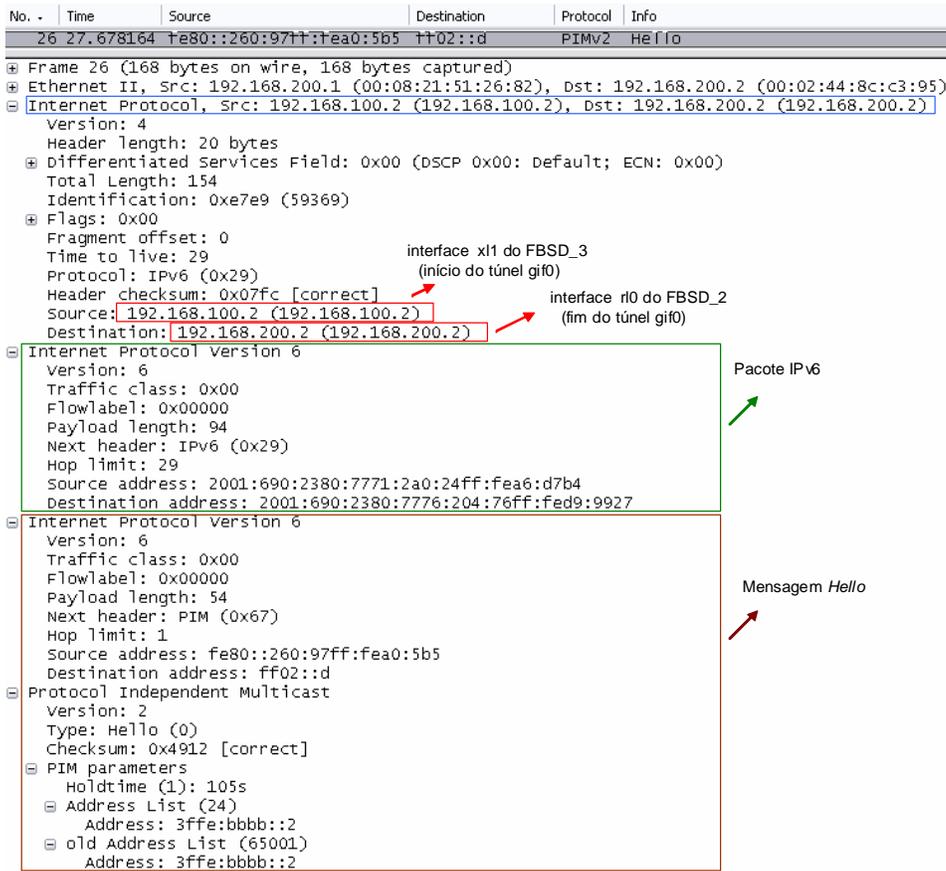


Figura 136 – Mensagem Hello encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4

As mensagens *Hello* enviadas pelo *router* Gordon na sua interface *gif1* e pelo *router* FBSD\_1 na sua interface *gif1*, são encapsuladas num pacote IPv6 e enviadas no túnel IPv6 sobre IPv6 configurado entre os dois *routers*. Relativamente às mensagens *Hello* enviadas, pelo *router* FBSD\_2 na sua interface *x10* e pelo *router* Pluton, não são encapsuladas em nenhum pacote já que ambos os *routers* executam o protocolo de encaminhamento *multicast*.

O encaminhamento das mensagens *Bootstrap* é feito de igual forma ao explicado nas mensagens *Hello*, permitindo que todos os *routers* da rede conheçam qual o BSR e o RP a usar. A Figura 137, apresenta uma mensagem *Bootstrap* enviada pelo *router* Pluton e encaminhada pelo *router* FBSD\_2 na sua interface *gif1*, informando assim desta forma o *router* Gordon de qual o BSR e o RP da rede.

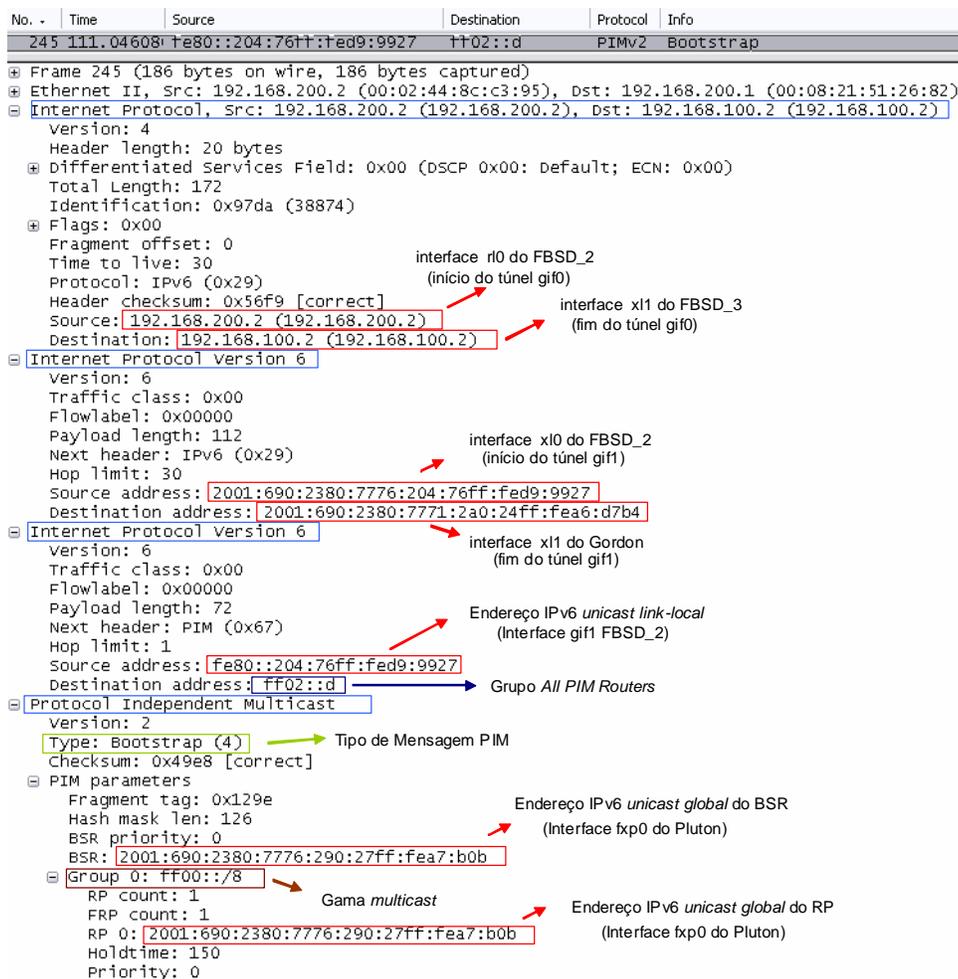


Figura 137 – Mensagem *Bootstrap* encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4

A informação *multicast* (resultante do comando *pim6stat*) do *router* Gordon é apresentada de seguida.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF  Local-Address/Prefixlen  Scope  Flags
0    xl0    2001:690:2380:7770:260:97ff:fea0:5b5/64  0      DR QRY NO-NBR
      fe80::260:97ff:fea0:5b5/64
      Timers: PIM hello = 0:10, MLD query = 1:15
      possible MLD version = 1 2
1    xl1    2001:690:2380:7771:2a0:24ff:fea6:d7b4/64  0      DISABLED
      fe80::2a0:24ff:fea6:d7b4/64
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1
2    gif0   3ffe:bbbb::2/128  0      DR PIM
      fe80::260:97ff:fea0:5b5/64
      Timers: PIM hello = 0:15, MLD query = 0:25
      possible MLD version = 1 2
3    gif1   3ffe:dddd::2/128  0      DR PIM
      fe80::260:97ff:fea0:5b5/64
      Timers: PIM hello = 0:15, MLD query = 0:25
      possible MLD version = 1 2
4    lo0    fe80::1/64  14     DISABLED
      ::1/128
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1
5    regist fe80::260:97ff:fea0:5b5/64  1      REGISTER
      Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
      possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF  Address  Timer
2    gif0   fe80::204:76ff:fed9:9927  90
      3ffe:bbbb:1
3    gif1   fe80::204:76ff:fed9:9d4d  90
      3ffe:dddd:1

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 125
RP-address(Upstream)/Group prefix  Prio Hold Age
2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b(fe80::204:76ff:fed9:9927%gif0)

```

Analisando a informação anterior, verifica-se que as interfaces *gif0* e *gif1* aparecem na tabela *Multicast Interface Table* e têm como vizinhos PIM (tabela *PIM Neighbor List*) os *routers* FBSD\_2 e FBSD\_1, respectivamente. Na tabela *RP-Set*, é indicado o endereço IPv6 *unicast global* do BSR e do RP (*router* Pluton), alcançado pelo *router* Gordon através da sua interface *gif0*. A informação dos restantes *routers* é semelhante à apresentada.

2. De seguida, configurou-se a aplicação RAT na estação DeskPC para a sessão *multicast* do grupo FF0e::77:1111. Esta aplicação funciona como emissor e receptor para o grupo configurado. Analisando inicialmente o comportamento de emissor da aplicação, verifica-se que o *router* Gordon ao receber o primeiro pacote de dados do emissor DeskPC, cria na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (S,G) relativo a esse emissor e ao grupo FF0e::77:1111 e, encapsula cada pacote de dados numa mensagem *Register*. Por sua vez, cada mensagem *Register* é encapsulada num pacote IPv6 e encaminhada pela interface *gif0* (túnel IPv6 sobre IPv6 configurado com o *router* FBSD\_2). O *router* FBSD\_3, encapsula o pacote IPv6 num pacote IPv4 (Figura 138) e encaminha-o pela interface *gif0* (túnel IPv6 sobre IPv4) com destino ao *router* FBSD\_2. Este, por sua vez, (i) descapsula o pacote IPv6, (ii) descapsula a mensagem *Register* e encaminha o pacote de dados para o RP (*router* Pluton).

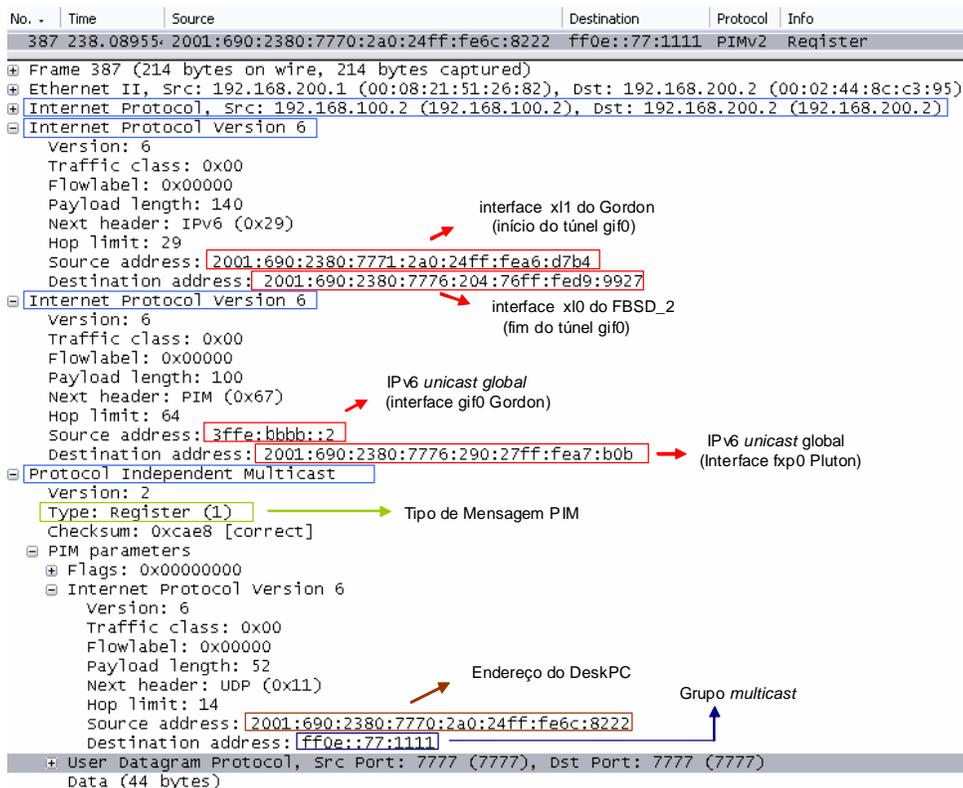


Figura 138 – Mensagem Register encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4

O comportamento de receptor da aplicação RAT, faz com que o *router* Gordon ao ser informado (através de uma mensagem MLD Report) da existência de uma receptor (DeskPC) interessado em aderir à sessão *multicast* do grupo FF0e::77:1111, crie na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (\*,G) relativo a esse grupo e encapsula a mensagem *Join/Prune*, num pacote IPv6 que é encaminhado pela sua interface *gif0* (túnel IPv6 sobre IPv6). A mensagem *Join/Prune* é usada para simultaneamente aderir à árvore de distribuição central e indicar ao RP que não pretende receber os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC, através da árvore de distribuição central. Por sua vez, o *router* FBSD\_3 encapsula o pacote IPv6 num pacote IPv4 (Figura 139) e encaminha-o pela sua interface *gif0* (túnel IPv4 sobre IPv6). O *router* FBSD\_2, (i) descapsula o pacote IPv6, (ii) descapsula a mensagem *Join/Prune*, (iii) cria na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (\*,G), relativo ao grupo FF0e::77:1111 (resultante da mensagem *Join*) e o estado (S,G), relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF0e::77:1111 (resultante da mensagem *Prune*) e (iv) envia uma mensagem *Join/Prune* em direcção ao *router* Pluton (RP). O *router* Pluton ao processar a mensagem *Join/Prune*, cria na sua tabela *Multicast Routing Table* o estado (\*,G) relativo ao grupo FF0e::77:1111, resultante da mensagem *Join*, ficando desta forma criada a árvore de distribuição central composta pelos *routers* Pluton

(origem da árvore), FBSD\_2 e Gordon. Verificou-se, que também foi criado o estado (S,G) relativo ao emissor DeskPC e ao grupo FF0e::77:1111, resultante da mensagem *Prune*.

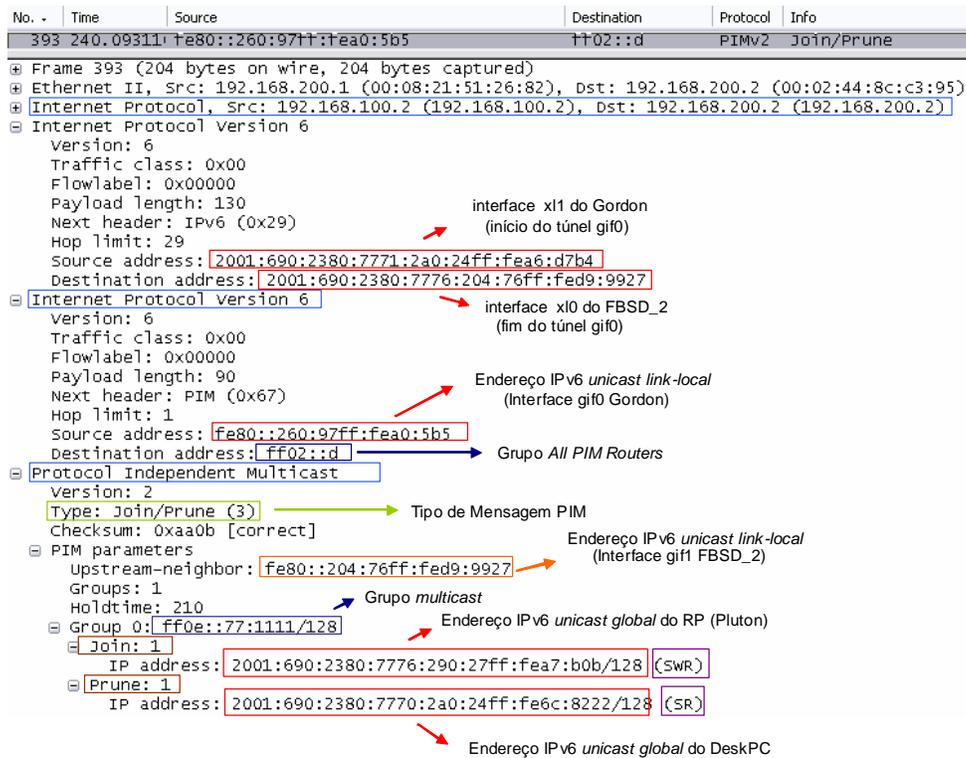


Figura 139 – Mensagem *Join/Prune* encapsulada num pacote IPv6 e num pacote IPv4

Nesta fase a informação *multicast* do *router* FBSD\_2 é a apresentada de seguida, verificando-se na tabela *Multicast Routing Table* o estado (\*,G) com a interface de saída (*gif1*) a *Joined* (que representa a árvore de distribuição central do grupo FF0e::77:1111) e o estado (S,G) com a interface de saída (*gif1*) a *Pruned*, não encaminhando por essa interface os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC destinados ao grupo FF0e::77:1111.

```

Multicast Interface Table
Mif  PhyIF Local-Address/Prefixlen          Scope  Flags
0    r10  fe80::202:44ff:fe8c:c395/64              2      DISABLED
    Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
1    x10  2001:690:2380:7776:204:76ff:fed9:9927/64  0      PIM QRY
    fe80::204:76ff:fed9:9927/64           1
    Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:25
    possible MLD version = 1 2
2    gif0 fe80::204:76ff:fed9:9927/64             10     DISABLED
    3ffe:aaaa::1/128                      0
    Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
    possible MLD version = 1
3    gif1 fe80::204:76ff:fed9:9927/64             11     PIM QRY
    3ffe:bbbb::1/128                      0
    Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:25
    possible MLD version = 1 2
4    gif2 fe80::204:76ff:fed9:9927/64             12     PIM QRY
    3ffe:cccc::1/128                      0
    Timers: PIM hello = 0:20, MLD query = 0:25
    possible MLD version = 1 2
5    lo0  fe80::1/64                              16     DISABLED
    ::1/128                                0
    Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
    possible MLD version = 1
6    regist fe80::204:76ff:fed9:9927/64           1      REGISTER
    Timers: PIM hello = 0:00, MLD query = 0:00
    possible MLD version = 1

PIM Neighbor List
Mif  PhyIF Address                               Timer
1    x10  fe80::290:27ff:fea7:b0b                 95
    2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b
3    gif1 fe80::260:97ff:fea0:5b5                 90
    3ffe:bbbb::2
4    gif2 fe80::204:76ff:fed9:9d4d                90
    3ffe:cccc::2

Multicast Routing Table
Source      Group      RP-addr      Flags
-----
IN6ADDR_ANY ff0e::77:1111 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b WC RP
Joined oifs: ...j...
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: ...o...
Incoming   : .I.....
Upstream nbr: fe80::290:27ff:fea7:b0b

----- (S,G) -----
2001:690:2380:7776:2a0:24ff:fe6c:8222 ff0e::77:1111 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b RP SG
Joined oifs: .....
Pruned oifs: ...p...
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: .....
Incoming   : .I.....
Upstream nbr: fe80::290:27ff:fea7:b0b

----- (*,*,RP) -----
Number of Groups: 1
Number of Cache MIRRORs: 0

----- RP-Set -----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 105
RP-address(Upstream)/Group prefix      Prio Hold Age
2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b(fe80::290:27ff:fea7:b0b%x10)
ff00::/8                                0 150 95

```

3. Ao configurar a aplicação RAT para a sessão *multicast* do grupo FF0e:77:1111 nas estações Carocha e América, verificou-se a troca de mensagens semelhantes à descritas no ponto anterior. De seguida, a estação DeskPC começou a enviar tráfego para o grupo FF0e::77:1111 e verificou-se que, enquanto o ritmo de transmissão do emissor não excedeu o limite configurado no FBSD\_1 (DR do América), os pacotes de dados são encapsulados em mensagens *Register* e encaminhados para o RP, tal como foi descrito anteriormente, que por

sua vez, descapsula e encaminha esses pacotes de dados através da árvore de distribuição central. Para o receptor Carocha, os pacotes de dados são entregues imediatamente, já que o *router* Pluton para além de RP é também o DR da rede 2001:690:2380:7775::/64. Para o receptor América, os pacotes de dados são encaminhados pela interface *fxp0* do *router* Pluton até ao *router* FBSD\_2, que por sua vez, encapsula esses pacotes de dados em pacotes IPv6 e encaminha-os pela interface *gif2* (túnel IPv6 sobre IPv6 configurado com o *router* FBSD\_1) e para além disso, encapsula esses pacotes IPv6 em pacotes IPv4 e encaminha-os pela sua interface *gif0* (Figura 140). O *router* FBSD\_3 ao receber os pacotes IPv4, descapsula os pacotes IPv6 e envia-os para *router* FBSD\_1, competindo a este a função de descapsular os pacotes de dados e encaminhá-los para a rede 2001:690:2380:7774::/64 (receptor América).

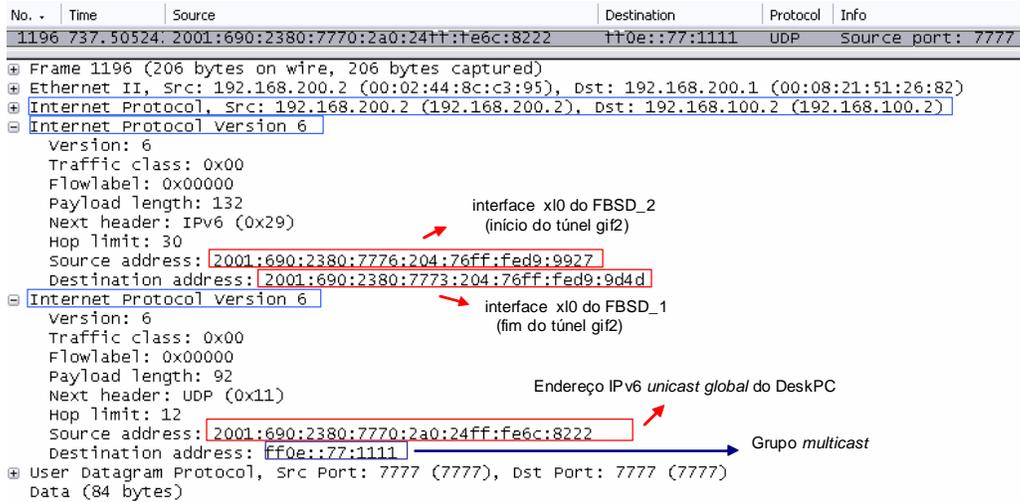


Figura 140 – Pacote de dados encapsulado num pacote IPv6

A partir do momento em que o emissor DeskPC começa a enviar pacotes de dados a um ritmo superior ao limite configurado no *router* FBSD\_1 (19 Kbps), o *router* FBSD\_1 envia uma mensagem *Join* (na sua interface *gif1*) para aderir à árvore de distribuição do emissor DeskPC. O *router* FBSD\_1 ao receber o primeiro pacote de dados através da árvore de distribuição por emissor (usando a interface *gif1*), envia uma mensagem *Prune* (pela interface *gif0*) na direcção do RP informando-o que não pretende receber mais pacotes de dados (enviados pelo emissor DeskPC) através da árvore de distribuição central. Nesta fase, todos os pacotes de dados enviados pelo DeskPC são encaminhados pelo *router* Gordon através da sua interface *gif1* até ao *router* FBSD\_1 que, por sua vez, trata de encaminhar esses pacotes para a rede 2001:690:2380:7774::/64. A informação *multicast* relativa ao *router* Gordon é a apresentada de seguida.

```

Reported MLD Group
Mif  PhyIF Group(Group-Timer,MLD-ver(Filter-Mode,Compat-Timer))/Source(TimerID)
0    x10 ff0e::77:1111 (#253 (v1 EX #254))
      (any source) (-)

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
IN6ADDR_ANY    ff0e::77:1111  2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b WC RP CACHE
Joined oifs: .....
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: o.....
Incoming      : ..I...
Upstream nbr: fe80::204:76ff:fed9:9927

-----
2001:690:2380:7770:2a0:24ff:fe6c:8222 ff0e::77:1111  2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b SPT CACHE
SG
Joined oifs: ..jj.j
Pruned oifs: .....
Asserted oifs: .....
Outgoing oifs: o.oo.o
Incoming      : I.....
Upstream nbr: NONE

-----
Number of Groups: 1
Number of Cache MIRRORs: 3

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b Prio: 0 Timeout: 110
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7776:290:27ff:fea7:b0b(fe80::204:76ff:fed9:9927%gif0)
ff00::/8                                   0    150 100

```

## Conclusões

Para garantir comunicações *multicast* em cenários onde redes IPv6 (que suportam comunicações *multicast*) são interligadas por redes IPv6 servidas por *routers* que não suportam protocolos de encaminhamento *multicast*, torna-se necessário recorrer a uma solução de túneis IPv6 sobre IPv6. Estes túneis são usados para encaminhar mensagens de controlo dos protocolos de encaminhamento *multicast* e para o encaminhamento *multicast* dos pacotes de dados. Em cenários onde redes IPv6 são interligadas por redes IPv4, torna-se necessário recorrer a uma solução de túneis IPv6 sobre IPv4 para garantir a conectividade *unicast* entre as redes IPv6 e também para garantir as comunicações *multicast* IPv6, caso os *routers* na fronteira com a rede IPv4 não suportem protocolos de encaminhamento *multicast* IPv6. Estes cenários são de particular interesse para os ISP's que pretendam fornecer comunicações *multicast* IPv6, não só aos seus clientes, mas também a clientes de outros ISP's.

O uso desta solução provoca um maior *overhead* na rede e penaliza o desempenho dos *routers* onde são configurados os túneis. Assim, esta solução requer implementações de melhor desempenho dos *routers* onde são configurados os túneis, especialmente para ritmos elevados de transmissão de pacotes.

### 5.1.4.2. IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*

Para verificar quais os requisitos de funcionamento da implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*” [UNNINET], que permite sessões *multicast* ASM comuns para redes IPv4 e para redes IPv6, configurou-se em laboratório o cenário ilustrado na Figura 141. Este cenário é composto por três *routers* IPv6 (FBSD\_2, FBSD\_3 e FBSD\_4) que suportam o protocolo PIMv6 SM (um deles configurado como BSR e RP), por dois *routers* IPv4 (cisco 3620) que suportam o protocolo PIM SM (um deles configurado como RP), por três estações WindowsXP (duas IPv6 e uma IPv4) que executam a aplicação *White Board* (WBD)<sup>12</sup> [WBD] desempenhando o papel de emissor/receptor e finalmente, por uma estação Linux que desempenha o papel de tradutor. Como protocolos de encaminhamento *unicast*, foram usados o protocolo RIP nas redes IPv4 e o protocolo RIPng nas redes IPv6.

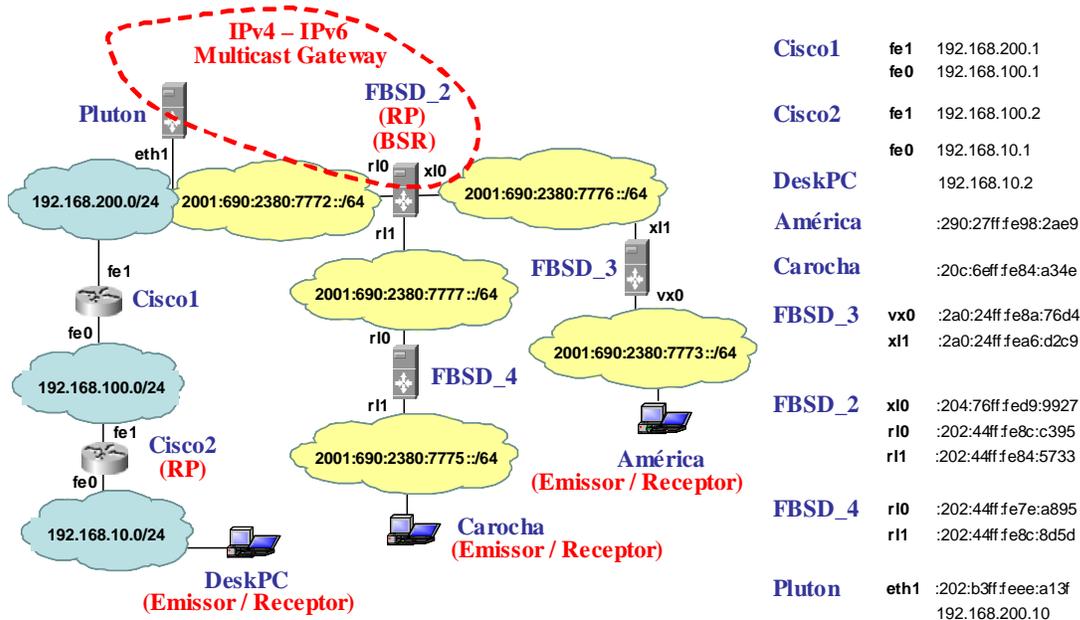


Figura 141 – Tradutor *multicast* PIMv6 SM e PIM SM

#### Configurações:

A implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*” requer que sejam usadas duas estações. Uma das estações, configurada em Linux, é a responsável pela tradução dos pacotes IPv4 para pacotes IPv6 e vice-versa, desempenhando o papel de emissor ou receptor, na rede IPv4 e na rede IPv6. A segunda, é a estação configurada como RP na rede IPv6, que serve a gama de endereços *multicast* IPv6 a traduzir. Desta forma, foram usadas as estações Pluton (Linux) e

<sup>12</sup> Aplicação usada para enviar/receber desenhos

FBSD\_2 (FreeBSD) que conjuntamente formam o “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*”. Os passos de instalação e configuração desta implementação encontram-se descritos no Anexo II.

No cenário apresentado, o tradutor Pluton possui apenas uma interface de rede ligada a uma rede de dupla pilha. Note-se que o resultado prático é o mesmo caso sejam usadas duas interfaces de rede, uma para a rede IPv4 e outra para a rede IPv6. Este segundo cenário, foi testado em laboratório. No entanto optou-se por apresentar apenas o cenário de dupla pilha, de forma a ilustrar mais facilmente a relação temporal entre os pacotes que circulam na rede onde se encontra localizado o tradutor Pluton.

As configurações *multicast* efectuadas nos *routers* IPv6 (ficheiro `/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf`), são apresentadas de seguida:

<p><b>FBSD_2:</b>  <code>phyint r10 mld_version any;</code>  <code>phyint r11 mld_version any;</code>  <code>phyint x10 mld_version any;</code>  <code>cand_rp r10;</code>  <code>cand_bootstrap_router r10;</code>  <code>log_pim_jp_pim_register;</code></p>	<p><b>FBSD_3:</b>  <code>phyint x11 mld_version any;</code>  <code>phyint vx0 mld_version any;</code></p> <p><b>FBSD_4:</b>  <code>phyint r10 mld_version any;</code>  <code>phyint r11 mld_version any;</code></p>
--	---

Em todos os *routers* IPv6, configuraram-se as interfaces para suportarem as duas versões do protocolo MLD. O *router* FBSD\_2 foi configurado como BSR e RP da rede, usando a interface `r10`. Uma vez que não foi configurada nenhuma gama de endereços *multicast* a ser servida pelo RP, todas as sessões *multicast* IPv6 (FF00::/8) do modelo ASM são servidas por este RP.

Ainda no *router* FBSD\_2, configurou-se a opção `log_pim_jp_pim_register` que permite registar no ficheiro `/var/log/pim6sd` os pedidos de adesão/abandono (mensagens *Join/Prune*) e os emissores IPv6 (através de mensagens *Register*) de todas as sessões *multicast* IPv6. Este ficheiro é monitorizado por um programa (*pimjoin.pl*) escrito na linguagem *Practical Extraction and Report Language* (PERL), cuja função é detectar a existência de receptores ou emissores pertencentes a uma sessão *multicast* da gama definida (com prefixo de 96 bits) e transmitir essa informação ao tradutor Pluton. A gama de endereços *multicast* IPv6 usada, a ser traduzida pelo “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*”, é a gama FF0e:a:a:a:a::/96. Assim, configurou-se o programa *pimjoin.pl* com essa informação. Note-se no entanto que poderia ter sido definida uma outra gama com um prefixo de 96 bits.

No ficheiro *mcgn.c* do tradutor Pluton, configurou-se a gama FF0e:a:a:a:a::/96 e compilou-se de seguida esse ficheiro para gerar o ficheiro binário (*mcgn*), usado para activar a aplicação de

tradução dos pacotes relativos à nova gama configurada. Depois de executada a aplicação, é estabelecida uma sessão *Transmission Control Protocol* (TCP) entre o tradutor Pluton e o RP (FBSD\_2), usada para a troca de informação de controlo referente a todos os grupos *multicast* dentro da gama de 96 bits definida.

Relativamente aos *routers* IPv4, efectuaram-se as seguintes configurações, executadas em modo de consola.

**Cisco1:**

```
cisco1#configure terminal
cisco1(config)#ip multicast-routing
cisco1(config)#ip pim rp-address 192.168.100.2
cisco1(config)#interface fastEthernet 0/0
cisco1(config-if)# ip pim sparse-mode
cisco1(config-if)# ip igmp version 3
cisco1(config-if)#no shutdown
cisco1(config-if)#exit
cisco1(config)#interface fastEthernet 0/1
cisco1(config-if)# ip pim sparse-mode
cisco1(config-if)# ip igmp version 3
cisco1(config-if)#no shutdown
cisco1(config-if)#end
cisco1#write
```

**Cisco2:**

```
cisco2#configure terminal
cisco2(config)#ip multicast-routing
cisco2(config)#ip pim rp-address 192.168.100.2
cisco2(config)#interface fastEthernet 1/0
cisco2(config-if)# ip pim sparse-mode
cisco2(config-if)# ip igmp version 3
cisco2(config-if)#no shutdown
cisco2(config-if)#exit
cisco2(config)#interface fastEthernet 0/1
cisco2(config-if)# ip pim sparse-mode
cisco2(config-if)# ip igmp version 3
cisco2(config-if)#no shutdown
cisco2(config-if)#end
cisco2#write
```

Em ambos os *routers* IPv4, configuram-se as interfaces para suportarem a versão IGMPv3, não sendo contudo obrigatório fazê-lo, já que as sessões *multicast* existentes nesta experiência são relativas ao modelo ASM. O *router* Cisco2 foi configurado como RP da rede, usando a interface *fe1* (192.168.100.1). Uma vez que não foi configurada nenhuma gama de endereços *multicast* IPv4 a ser servida pelo RP, qualquer grupo *multicast* IPv4 é servido por este RP (neste caso, a configuração do RP foi feita de forma manual nos dois *routers* IPv4).

Procedimento Experimental:

1. Depois de configurado o encaminhamento *unicast* nas redes IPv4 e nas redes IPv6, activou-se o encaminhamento *multicast* em todos os *routers* IPv4 e IPv6. Nas redes IPv6, verificou-se o envio de mensagens *Hello* e *Bootstrap*, tal como explicado na experiência da secção 4.6.3.1. Nas redes IPv4, ambos os *routers* IPv4 enviam periodicamente (de 30 em 30 segundos) mensagens *Hello* (Figura 142), usadas para a descoberta dos vizinhos PIM e para a eleição do DR. Note-se que nesta implementação é possível configurar a prioridade do DR, pelo que a mensagem *Hello* contém a opção *DR Priority* (por omissão com o valor '1'), para além da opção *Holdtime* (tempo de vida da mensagem). Em caso de igual prioridade, é eleito como DR o *router* com o maior endereço IPv4 *unicast*.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	192.168.100.2	224.0.0.13	PIMv2	Hello
11	29.187927	192.168.100.1	224.0.0.13	PIMv2	Hello
12	30.000547	192.168.100.2	224.0.0.13	PIMv2	Hello
26	59.212363	192.168.100.1	224.0.0.13	PIMv2	Hello

⊕ Frame 12 (60 bytes on wire, 60 bytes captured)  
 ⊖ Ethernet II, Src: Cisco\_3a:0b:92 (00:07:eb:3a:0b:92), Dst: 01:00:5e:00:00:0d :  
     Destination: 01:00:5e:00:00:0d (01:00:5e:00:00:0d)  
     Source: Cisco\_3a:0b:92 (00:07:eb:3a:0b:92)      Endereço MAC *multicast*  
     Type: IP (0x0800)      para o grupo 224.0.0.13

⊖ Internet Protocol, Src: 192.168.100.2 (192.168.100.2), Dst: 224.0.0.13  
     Version: 4  
     Header length: 20 bytes  
     ⊕ Differentiated Services Field: 0xc0 (DSCP 0x30: Class selector 6; ECN: 0x00)  
     Total Length: 46  
     Identification: 0x007a (122)  
     ⊕ Flags: 0x00  
     Fragment offset: 0  
     Time to live: 1  
     Protocol: PIM (0x67)      Endereço IPv4 *unicast*  
     Header checksum: 0xb377 [correct]      (Interface fe1 Cisco2)  
     Source: 192.168.100.2 (192.168.100.2)  
     Destination: 224.0.0.13 (224.0.0.13)      Grupo All PIM Routers

⊖ Protocol Independent Multicast  
     Version: 2  
     Type: Hello (0)      Tipo de Mensagem PIM  
     Checksum: 0xde62 [correct]

⊖ PIM parameters  
     Holdtime (1): 105s      Tempo de vida da mensagem  
     DR Priority (19): 1      Prioridade do DR

Figura 142 – Mensagens Hello (IPv4)

2. De seguida executou-se a aplicação *mcgw* (tradução dos pacotes IPv4 para IPv6 e IPv6 para IPv4) no tradutor Pluton, através do comando:

```
./mcgw 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 1234 eth1
```

Este comando contém o endereço IPv6 *unicast global* do RP (neste caso relativo à interface *r/0* do *router* FBSD\_2), o número do porto destino usado na ligação TCP com o programa *pimjoin.pl* (executado no *router* FBSD\_2) e a interface do tradutor (*eth1*) usada para alcançar o RP. Nesta fase é estabelecida uma ligação TCP *unicast* entre o tradutor Pluton e o *router* FBSD\_2 (a Figura 143 mostra os pacotes de início desta ligação TCP relativos ao *3-way handshake*).

No.	Time -	Source	Destination	Protocol	Info
348	543.0523	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	TCP	1714 > 1234 [SYN] Seq=0
349	543.0528	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	TCP	1234 > 1714 [SYN, ACK]
350	543.0530	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	TCP	1714 > 1234 [ACK] Seq=1

Figura 143 – Ligação TCP entre o tradutor e o *router* FBSD\_2

3. Depois de configurar a aplicação WBD nas estações Carocha e América para a sessão *multicast* IPv6 do grupo FF0e::77:1111, verificou-se a construção da árvore de distribuição central, usada para o encaminhamento dos pacotes de dados destinados a essa sessão. Tal como na experiência anterior (secção 5.1.4.1), esta aplicação desempenha simultaneamente o papel de emissor/receptor, pelo que cada DR das estações América e Carocha, envia periodicamente (30 em 30 segundos) uma mensagem *Join/Prune* com a opção *Join* (\*,G), usada para aderir à árvore de distribuição central e a opção *Prune* (S,G), usada para não receber os pacotes de dados do emissor que servem através da árvore de distribuição central.

A tabela *Multicast Routing Table* relativa ao *router* FBSD\_2 (RP) apresenta a seguinte informação, semelhante à dos restantes *routers*.

```

Multicast Routing Table
Source          Group          RP-addr          Flags
-----
----- (*,G) -----
IN6ADDR_ANY   ff0e::77:1111 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 WC RP
Joined oifs: .jj..
Pruned oifs: ....
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .oo..
Incoming : ....I
Upstream nbr: NONE
----- (S,G) -----
2001:690:2380:7773:290:27ff:fe98:2ae9 ff0e::77:1111 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 RP CACHE SG
Joined oifs: ....
Pruned oifs: .p..
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .o...
Incoming : ....I
Upstream nbr: NONE
----- (S,G) -----
2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e ff0e::77:1111 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 RP CACHE SG
Joined oifs: ....
Pruned oifs: .p...
Asserted oifs: ....
Outgoing oifs: .o...
Incoming : ....I
Upstream nbr: NONE

-----RP-Set-----
Current BSR address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395 Prio: 0 Timeout: 20
RP-address(Upstream)/Group prefix          Prio Hold Age
2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395(myself)
          ff00::/8                          0      150 145

```

Nesta fase, o tradutor Pluton não foi invocado, uma vez que se trata de uma sessão *multicast* IPv6 fora da gama (96 bits) de sessões *multicast* a serem traduzidas e verificou-se a troca de pacotes de dados *multicast* entre as estações América e Carocha.

4. De seguida configurou-se a aplicação WBD na estação DeskPC para a sessão *multicast* IPv4 do grupo 224.10.10.10. As tabelas de encaminhamento *multicast* dos *routers* Cisco1 e Cisco2 (consultadas através do comando *show ip mroute*) são apresentadas de seguida. Nesta implementação a tabela de encaminhamento *multicast* apresenta a informação do RP, a lista de interfaces de entrada, a lista de interfaces de saída e o campo *Flags*, que indica qual o estado da entrada, para cada estado (\*,G) e (S,G).

#### Cisco1

```

IP Multicast Routing Table
Flags: D - Dense, S - Sparse, B - Bidir Group, s - SSM Group, C - Connected,
       L - Local, P - Pruned, R - RP-bit set, F - Register flag,
       T - SPT-bit set, J - Join SPT, M - MSDP created entry,
       X - Proxy Join Timer Running, A - Candidate for MSDP Advertisement,
       U - URD, I - Received Source Specific Host Report
Outgoing interface flags: H - Hardware switched
Timers: Uptime/Expires
Interface state: Interface, Next-Hop or VCD, State/Mode

(*, 224.0.1.40), 00:48:28/00:00:00, RP 192.168.100.2, flags: SJPCL
Incoming interface: FastEthernet0/0, RPF nbr 192.168.100.2
Outgoing interface list: Null

```

**Cisco2**

```

IP Multicast Routing Table
Flags: D - Dense, S - Sparse, B - Bidir Group, s - SSM Group, C - Connected,
       L - Local, P - Pruned, R - RP-bit set, F - Register flag,
       T - SPT-bit set, J - Join SPT, M - MSDP created entry,
       X - Proxy Join Timer Running, A - Candidate for Advertised via MSDP,
       U - URD, I - Received Source Specific Host Report, Z - Multicast Tunnel
       Y - Joined MDT-data group, y - Sending to MDT-data group
Outgoing interface flags: H - Hardware switched
Timers: Uptime/Expires
Interface state: Interface, Next-Hop or VCD, State/Mode

(*, 224.10.10.10), 00:00:29/stopped, RP 192.168.100.2, flags: SJC
  Incoming interface: Null, RPF nbr 0.0.0.0
  Outgoing interface list:
    FastEthernet1/0, Forward/Sparse, 00:00:29/00:02:46

(192.168.10.2, 224.10.10.10), 00:00:28/00:02:56, flags: PT
  Incoming interface: FastEthernet1/0, RPF nbr 0.0.0.0
  Outgoing interface list: Null

(*, 224.0.1.40), 00:11:14/00:02:50, RP 192.168.100.2, flags: SJCL
  Incoming interface: Null, RPF nbr 0.0.0.0
  Outgoing interface list:
    FastEthernet1/1, Forward/Sparse, 00:11:04/00:02:50
    FastEthernet1/0, Forward/Sparse, 00:11:14/00:02:50

```

Analisando a informação anterior, verifica-se que ambos os *routers* apresentam uma entrada (\*,G) para o grupo 224.0.1.40. Este grupo é automaticamente criado pelos *routers* CISCO e serve de suporte a um mecanismo proprietário de descoberta do RP designado por *Cisco RP-discovery*.

Para além desse estado, o *router* Cisco2 (RP) apresenta o estado (\*,224.10.10.10) com a *Flag* J, que representa a árvore de distribuição central e o estado (192.168.10.2 , 224.10.10.10) com a *Flag* P, significando que não encaminha através da árvore de distribuição central os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC. Mais uma vez, este comportamento é provocado pelo facto da aplicação usada desempenhar o papel de emissor e receptor.

5. Na estação Carocha, configurou-se uma segunda aplicação WBD para a sessão *multicast* IPv6 do grupo FF0e:a:a:a:a:224.10.10.10.

Por um lado, ao analisar o comportamento de emissor da aplicação, verifica-se que é enviado um pacote de dados encapsulado numa mensagem *Register* pelo *router* FBSD\_4 (DR da rede 2001:690:2380:7775::/64). Usando o encaminhamento *unicast*, o *router* FBSD\_4 envia essa mensagem com destino ao *router* FBSD\_2 (RP). Como a mensagem *Register* contém um pacote de dados destinado ao grupo FF0e:a:a:a:a:224.10.10.10, o tradutor é informado através da ligação TCP (pacote 369 da Figura 144) de que existem operações relacionadas (neste caso uma mensagem *Register*) com um grupo *multicast* a traduzir. Nesta fase, o tradutor Pluton envia uma mensagem MLD *Report* (pacote 371 da Figura 144), aderindo imediatamente a esse grupo *multicast*. Desta forma, o tradutor Pluton está em condições de receber todos os pacotes de

dados enviados por um qualquer emissor IPv6 para essa sessão *multicast* e posteriormente, enviá-los para a rede IPv4, independentemente de conhecer se existem ou não receptores IPv4 interessados nessa sessão.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
369	583.6142	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	TCP	1234 > 1714 [PSH, ACK] Seq=370
370	583.6144	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	TCP	1714 > 1234 [ACK] Seq=1 Ac
371	583.6170	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff0e:a:a:a:e00a:a0a	ICMPv6	Multicast listener report

Figura 144 – Sequência de pacotes na activação do tradução

Por outro lado, ao analisar o comportamento de receptor da aplicação, verifica-se que a estação Carocha sinaliza a rede através de mensagens *MLD Report*, do seu interesse em aderir à sessão *multicast* do grupo FF0e:a:a:a:a:224.10.10.10. O *router* FBSD\_4, actuando como DR da rede 2001:690:2380:7775::/64 envia periodicamente uma mensagem *Join/Prune* (Figura 145) em direcção ao RP (FBSD\_2). Nesta fase, na tabela *Multicast Routing Table* do *router* FBSD\_2 é incluído o estado (\*,G), construindo-se assim uma nova árvore de distribuição central e, anteriormente tinha sido incluído o estado (S,G) a *Pruned*, provocado pela função de emissor da aplicação.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
669	556.09926	fe80::202:44ff:fe7e:a895	ff02::d	PIMv2	Join/Prune

Frame 669 (144 bytes on wire, 144 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: SurecomT\_7e:a8:95 (00:02:44:7e:a8:95), Dst: IPv6-Neighbor-  
 Internet Protocol version 6  
 Protocol Independent Multicast  
 Version: 2  
 Type: Join/Prune (3) → Tipo de Mensagem PIM  
 Checksum: 0xb6a4 [correct]  
 PIM parameters  
 Upstream-neighbor: fe80::202:44ff:fe84:5733 → Endereço IPv6 unicast link-local (Interface x10 FBSD\_2)  
 Groups: 1  
 Holdtime: 210 → Grupo multicast  
 Group 0: ff0e:a:a:a:a:e00a:a0a/128 → IPv6 unicast global do RP (interface r10 FBSD\_2)  
 Join: 1  
 IP address: 2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395/128 (SWR)  
 Prune: 1  
 IP address: 2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e/128 (SR)

Figura 145 – Mensagem *Join/Prune* enviada pelo *router* FBSD\_4

Note-se que nas mensagens da Figura 144 e da Figura 145, o grupo FF0e:a:a:a:a:224.10.10.10 é representado na sua notação hexadecimal por FF0e:a:a:a:a:e00a:a0a, sendo assim apresentado nas tabelas *Multicast Routing Table* de encaminhamento *multicast* dos *routers* FBSD\_4 e FBSD\_2.

Ao ser detectada uma mensagem *Join* para um grupo *multicast* IPv6 dentro da gama de sessões *multicast* a traduzir, verifica-se que o tradutor Pluton sinaliza a rede 192.168.200.0/24 do seu interesse em aderir à sessão *multicast* IPv4 do grupo 224.10.10.10, usando para esse efeito mensagens *IGMPv2 Report* (Figura 146).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
373	583.631169	192.168.200.10	224.10.10.10	IGMP	V2 Membership Report
375	584.481163	192.168.200.10	224.10.10.10	IGMP	V2 Membership Report

Frame 373 (46 bytes on wire, 46 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: 192.168.200.10 (00:02:b3:ee:a1:3f), Dst: 01:00:5e:0a:0a:0a (01:00:5e:0a:0a:0a)  
 Internet Protocol, Src: 192.168.200.10 (192.168.200.10), Dst: 224.10.10.10 (224.10.10.10)

- Version: 4
- Header length: 24 bytes
- Differentiated Services Field: 0x00 Endereço MAC multicast para o endereço 224.10.10.10
- Total Length: 32
- Identification: 0x0000 (0)
- Flags: 0x04 (Don't Fragment)
- Fragment offset: 0
- Time to live: 1
- Protocol: IGMP (0x02) Endereço IPv4 unicast
- Header checksum: 0x7210 [correct]
- Source: 192.168.200.10 (192.168.200.10)
- Destination: 224.10.10.10 (224.10.10.10) Grupo multicast
- Options: (4 bytes)

Internet Group Management Protocol  
 IGMP Version: 2  
 Type: Membership Report (0x16) Tipo de Mensagem IGMPv2  
 Max Response Time: 0,0 sec (0x00)  
 Header checksum: 0xffea [correct]  
 Multicast Address: 224.10.10.10 (224.10.10.10) Grupo multicast

Figura 146 – Mensagem IGMPv2 Report enviada pelo tradutor Pluton

O *router* Cisco1 inclui na sua tabela de encaminhamento *multicast* o estado (\*,G) relativo ao grupo 224.10.10.10 e envia uma mensagem *Join* (Figura 147) para aderir à árvore de distribuição central. Depois do *router* Cisco2 receber a mensagem *Join*, coloca a interface *fe1* na sua lista de interfaces de saída e fica desta forma criada a árvore de distribuição central referente ao grupo 224.10.10.10, composta pelo *router* Cisco2 (origem da árvore) e pelo *router* Cisco1.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
386	620.38703	192.168.100.1	224.0.0.13	PIMv2	Join/Prune

Frame 386 (68 bytes on wire, 68 bytes captured)  
 Ethernet II, Src: Cisco\_51:26:81 (00:08:21:51:26:81), Dst: 01:00:5e:00:00:0d (01:00:5e:00:00:0d)  
 Destination: 01:00:5e:00:00:0d (01:00:5e:00:00:0d)  
 Source: Cisco\_51:26:81 (00:08:21:51:26:81)  
 Type: IP (0x0800)

Internet Protocol, Src: 192.168.100.1 (192.168.100.1), Dst: 224.0.0.13 (224.0.0.13)

- Version: 4
- Header length: 20 bytes
- Differentiated Services Field: 0xc0 (DSCP 0x30: Class Selector 6; ECN: 0x00)
- Total Length: 54
- Identification: 0x032e (814)
- Flags: 0x00
- Fragment offset: 0
- Time to live: 1
- Protocol: PIM (0x67) Endereço IPv4 unicast (Interface fe0 Cisco2)
- Header checksum: 0xb0bc [correct]
- Source: 192.168.100.1 (192.168.100.1)
- Destination: 224.0.0.13 (224.0.0.13) Grupo All PIM Routers

Protocol Independent Multicast

- Version: 2
- Type: Join/Prune (3) Tipo de Mensagem PIM
- checksum: 0x9e80 [correct]
- PIM parameters
  - Upstream-neighbor: 192.168.100.2 Endereço IPv4 unicast (Interface fe1 Cisco\_2)
  - Groups: 1
  - Holdtime: 210 Grupo multicast
  - Group 0: 224.10.10.10/32 Endereço IPv6 unicast RP (Cisco2)
  - Join: 1
    - IP address: 192.168.100.2/32 (SWR)
    - Prune: 0

Figura 147 – Mensagem Join enviada pelo router Cisco1

Nesta fase, verificou-se que os pacotes de dados enviados pela estação DeskPC com destino ao grupo 224.10.10.10, são encaminhados pelo *router* Cisco2 para a árvore de distribuição central e o *router* Cisco1 encaminha-os para a rede 192.168.200.0/24. O tradutor Pluton actuando como receptor IPv4, recebe os pacotes de dados da sessão *multicast* IPv4 (pacotes 376 e 377 da Figura 148) e actuando como emissor IPv6, envia-os para o grupo FF0e:a:a:a:a:e00a:a0a (pacotes 378 e 379 da Figura 148). O *router* FBSD\_2 ao receber os pacotes de dados enviados pelo tradutor Pluton, encaminha-os pela árvore de distribuição central até ao *router* FBSD\_4 que, por sua vez, faz o encaminhamento dos pacotes de dados para a rede 2001:690:2380:7775::/64, permitindo assim que o receptor Carocha os receba.

No.	Time -	Source	Destination	Protocol
376	585.382577	192.168.10.2	224.10.10.10	UDP
377	585.383109	192.168.10.2	224.10.10.10	UDP
378	585.383207	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	ff0e:a:a:a:a:e00a:a0a	UDP
379	585.383306	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	ff0e:a:a:a:a:e00a:a0a	UDP

Figura 148 – Pacotes IPv4 traduzidos em pacotes IPv6

Os pacotes de dados enviados pelo emissor Carocha com destino ao grupo FF0e:a:a:a:a:e00a:a0a, são encapsulados em mensagens *Register* pelo *router* FBSD\_4 e enviados através do encaminhamento *unicast* para o *router* FBSD\_2 (RP) que, por sua vez, descapsula esses pacotes de dados e encaminha-os para a rede 2001:690:2380:7772::/64. O tradutor Pluton actuando como receptor IPv6, recebe os pacotes de dados da sessão *multicast* IPv6 (pacotes 429 e 435 da Figura 149) e actuando como emissor IPv4, envia-os para o grupo 224.10.10.10 (pacotes 430 e 436 da Figura 149).

No.	Time -	Source	Destination	Protocol
429	627.611237	2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e	ff0e:a:a:a:a:e00a:a0a	UDP
430	627.614446	192.168.200.10	224.10.10.10	UDP
435	637.538574	2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e	ff0e:a:a:a:a:e00a:a0a	UDP
436	637.538926	192.168.200.10	224.10.10.10	UDP

Figura 149 – Pacotes IPv6 traduzidos em pacotes IPv4

O *router* Cisco1 (DR da rede 192.168.200.0/24) encapsula os pacotes em mensagens *Register* (Figura 150) e envia-as com destino ao *router* Cisco2 (RP), que descapsula os pacotes de dados e encaminha-os através da árvore de distribuição central, acabando por ser recebidos no receptor DeskPC. Nesta fase, ao receber a primeira mensagem *Register* (pacote 432 da Figura 151), o *router* Cisco2 envia imediatamente uma mensagem *Join* (pacote 433 da Figura 151) para aderir à árvore de distribuição do emissor Pluton (tradutor) e começa a receber os pacotes de dados enviados pelo Pluton (pacote 434 da Figura 151) através da nova árvore *multicast*. Este é o comportamento por omissão da implementação CISCO usada, já que não foi feita qualquer configuração no RP relacionada com o ritmo de mensagens *Register* recebidas.

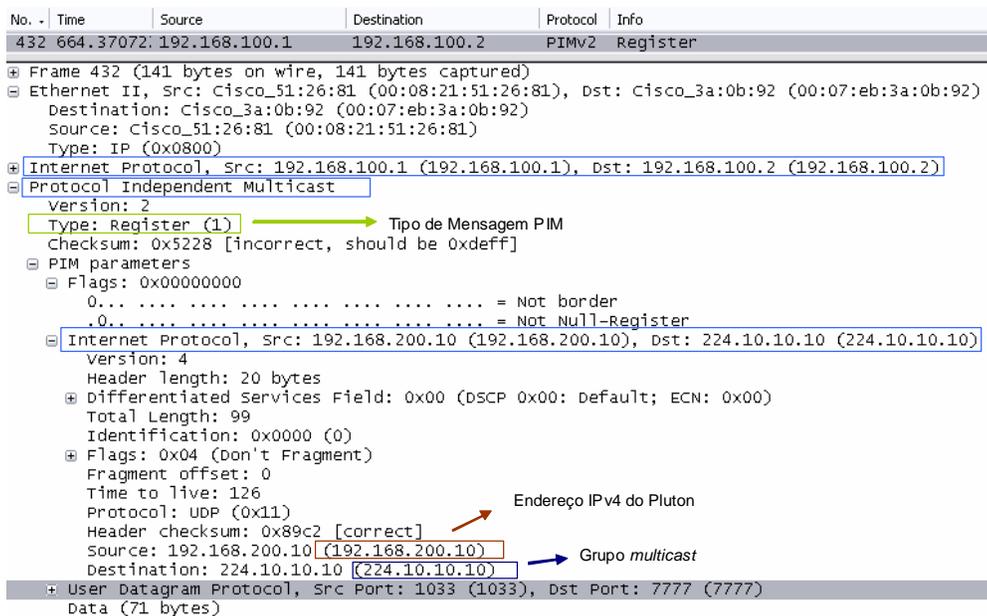


Figura 150 – Mensagem Register enviada pelo router Cisco1

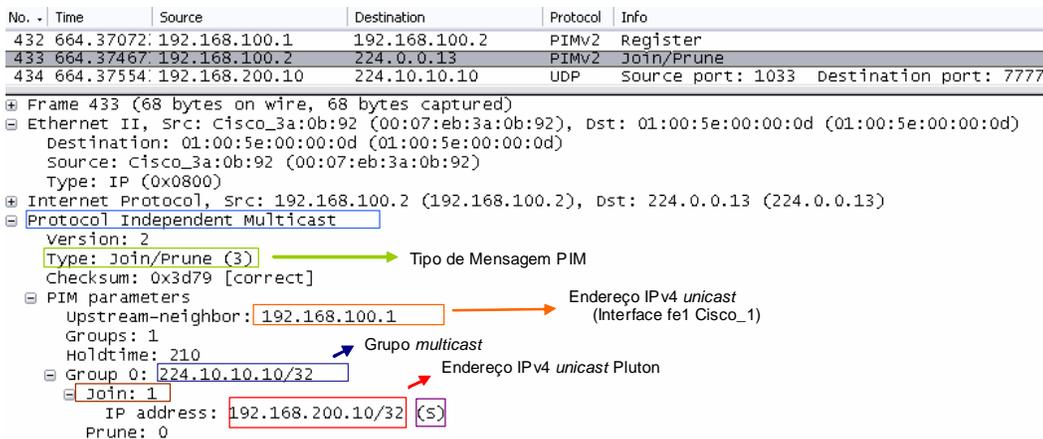


Figura 151 – Adesão do router Cisco2 à árvore de distribuição do emissor Pluton

6. De seguida, na estação América configurou-se uma segunda aplicação WBD para a sessão *multicast* IPv6 do grupo FF0e:a:a:a::224.10.10.10. Depois de criado o novo membro (*router* FBSD\_3) da árvore de distribuição central relativa a esse grupo, verificou-se que (i) os receptores Carocha (IPv6) e DeskPC (IPv4) recebem os pacotes de dados enviados pelo emissor América (IPv6), (ii) os receptores Carocha (IPv6) e América (IPv6) recebem os pacotes de dados enviados pelo emissor DeskPC (IPv4) e (iii) os receptores América (IPv6) e DeskPC (IPv4) recebem os pacotes de dados enviados pelo emissor Carocha (IPv6). A Figura 152 ilustra os pacotes de dados enviados pelos emissores DeskPC, Carocha e América. Para além da tradução do endereço origem e destino, é também traduzido o porto origem UDP.

Para o emissor DeskPC, o pacote original (pacote 685) tem o porto origem 7777 e o pacote traduzido (pacote 686) tem o porto origem 1032. Para os emissores Carocha e América, os pacotes originais (pacotes 687 e 692) têm como porto origem 7777 e os pacotes traduzidos têm como porto origem 1033.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
685	847.504	192.168.10.2	224.10.10.10	UDP	Source port: 7777 Destination port: 7777
686	847.505	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	ff0e:a:a:a:a:e00	UDP	Source port: 1032 Destination port: 7777
687	847.952	2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e	ff0e:a:a:a:a:e00	UDP	Source port: 7777 Destination port: 7777
688	847.952	192.168.200.10	224.10.10.10	UDP	Source port: 1033 Destination port: 7777
692	851.526	2001:690:2380:7775:20c:6eff:fe84:a34e	ff0e:a:a:a:a:e00	UDP	Source port: 7777 Destination port: 7777
693	851.526	192.168.200.10	224.10.10.10	UDP	Source port: 1033 Destination port: 7777

Figura 152 - Pacotes de dados enviados pelos emissores

7. Ao terminar a execução da aplicação WBD referente ao grupo FF0e:a:a:a:a:224.10.10.10, verificou-se que os estados (\*,G) e (S,G) relativos a esse grupo foram removidos da tabela *Multicast Routing Table* do *router* FBSD\_2. Nesta fase o tradutor Pluton envia, por um lado, uma mensagem IGMPv2 *Leave* (pacote 4955 da Figura 153) abandonando a sessão *multicast* IPv4, já que deixaram de existir receptores IPv6 interessados nesse grupo e, por outro lado, envia uma mensagem MLD *Done* (pacote 4956 da Figura 153) abandonando a sessão *multicast* IPv6, já que deixaram de existir emissores IPv6. Finalmente, terminou a ligação TCP (pacotes 4957 e 4958 da Figura 153) estabelecida com o *router* FBSD\_2.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
4955	4214.7100	192.168.200.10	224.0.0.2	IGMP	v2 Leave Group
4956	4214.7103	fe80::202:b3ff:feee:a13f	ff02::2	ICMPv6	Multicast listener done
4957	4214.7104	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	TCP	1714 > 1234 [FIN, ACK] :
4958	4214.7110	2001:690:2380:7772:202:44ff:fe8c:c395	2001:690:2380:7772:202:b3ff:feee:a13f	TCP	1234 > 1714 [ACK] Seq=2

Figura 153 – Mensagens IGMPv2 e MLD de abandono e fim da ligação TCP

## Conclusões

Actualmente o suporte de uma sessão *multicast* comum a redes IPv4 e redes IPv6 só é possível para o modelo ASM, recorrendo para esse feito à implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*”. O funcionamento desta implementação requer que as redes IPv6 suportem o protocolo PIMv6 SM, enquanto que as redes IPv4 podem suportar qualquer protocolo de encaminhamento *multicast*.

A ligação *unicast* TCP estabelecida entre o tradutor e o RP (IPv6), usada para controlo das sessões *multicast* a traduzir, permite que o RP responsável por servir essas sessões possa estar localizado num qualquer ponto da rede IPv6. No entanto, quanto mais distante estiver do tradutor (localizado na fronteira entre a rede IPv4 e a rede IPv6), maior será o atraso provocado no início das sessões *multicast*, resultante do processamento dos *routers* intermédios entre o RP e o tradutor (a implementação recomenda que, sempre que possível o RP deve estar localizado na mesma rede do tradutor).

Num cenário em que seja pretendido suportar outras sessões *multicast* IPv6, pode ser usado o mesmo RP para servir todas as sessões IPv6, não sendo obrigatório configurar um RP dedicado exclusivamente a sessões *multicast* IPv6 a traduzir.

Esta implementação tem como limitação o facto de nas redes IPv6 em que o RP seja também o DR, os emissores/receptores localizados nessas redes não conseguem participar em sessões *multicast* IPv4, porque o tradutor é invocado apenas quando existem mensagens *Register* e *Join/Prune* para uma sessão *multicast* dentro da gama a traduzir, pressupondo assim a existência de pelo menos um *router multicast* entre os emissores/receptores e o RP. Assim, uma solução para resolver esta questão passa por colocar um segundo *router multicast* e garantir que seja o DR da rede (em vez do RP). Desta forma, passam a existir mensagens *Register* e *Join/Prune* enviadas pelo DR em direcção ao RP, invocando desta forma o tradutor e permitindo assim que esses emissores/receptores IPv6 possam participar em sessões *multicast* IPv4. No entanto, a solução mais coerente é alterar o mecanismo por forma a que o programa PERL executado no RP, para que passe também a monitorizar mensagens MLD e o tradutor seja accionado também nestas situações.

Outra limitação desta implementação está relacionada com o facto dos pacotes enviados por diferentes emissores IPv6 serem sempre traduzidos em pacotes com o mesmo endereço de emissor IPv4 e com o mesmo número de porto de origem UDP, o que impossibilita que os receptores da rede IPv4 consigam diferenciar os pacotes de dados enviados pelos diferentes emissores IPv6. A mesma situação reflecte-se na tradução dos pacotes IPv4 para pacotes IPv6. Assim, uma solução para resolver esta questão passa por usar um porto de origem UDP diferente por cada emissor, permitindo aos receptores distinguir os pacotes de dados enviados por diferentes emissores. Outra solução, passa por usar um diferente endereço de emissor IPv4 para cada emissor IPv6 e vice-versa, usando por exemplo o mecanismo de tradução de endereços *unicast Network Address Translator – Protocol Translator* (NAT-PT) [RFC 2767]. No entanto, esta solução exige que sejam feitas alterações mais profundas na implementação.

## 5.2. Encaminhamento *multicast* inter-domínio

Até esta fase da dissertação foram analisadas as comunicações *multicast* dos modelos ASM e SSM, considerando cenários de redes pertencentes ao mesmo Sistema Autónomo (encaminhamento *multicast* intra-domínio). No entanto, uma questão não menos importante está relacionada com as comunicações *multicast* em cenários de redes pertencentes a diferentes Sistemas Autónomos (encaminhamento *multicast* inter-domínio). Na tentativa de identificar e resolver as questões relacionadas com encaminhamento *multicast* inter-domínio, foram propostas algumas soluções para os modelos ASM e SSM, em redes IPv4 e redes IPv6. Para o modelo ASM, existem soluções distintas quando se consideram redes IPv4 ou redes IPv6, enquanto que para o modelo SSM, a solução é comum para redes IPv4 e IPv6.

Este tema, continua a ser alvo de trabalho e discussão por parte de diferentes grupos, não existindo actualmente uma norma que defina qual a solução a usar.

### 5.2.1. Modelo ASM

Nas comunicações *multicast* do modelo ASM, o protocolo de encaminhamento *multicast* mais utilizado é o protocolo PIM SM (secção 4.4), tanto em redes IPv4, como em redes IPv6. Neste protocolo, para que os emissores e receptores possam participar na mesma sessão *multicast*, é necessário que usem o mesmo RP (responsável por servir essa sessão). De notar que dentro de um Sistema Autónomo (SA), podem ser configurados vários *routers multicast* como RP, no entanto cada sessão *multicast* é servida apenas por um único RP.

Associado ao protocolo PIM SM está a questão da localização do RP. Em cenários de encaminhamento *multicast* intra-domínio, a localização do RP (para uma dada sessão *multicast*) é uma questão pacífica e da responsabilidade do administrador do SA. No entanto, quando se evolui para cenários de encaminhamento *multicast* inter-domínio podem surgir questões de confiança e gestão na localização do RP, já que um SA não tem necessariamente que confiar em entidades externas para coordenar as comunicações *multicast*.

#### Redes IPv4

Para o encaminhamento *multicast* inter-domínio em redes IPv4, a solução proposta passa pela utilização do protocolo PIM SM e do protocolo *Multicast Source Discovery Protocol* (MSDP) [RFC3618], que se baseia na comunicação entre RP's de diferentes SA's. Assim, cada SA pode

configurar e gerir de forma independente o seu RP para servir sessões *multicast* de alcance global.

Através do protocolo MSDP, são estabelecidas relações de vizinhança entre pares de RP's. Para uma dada sessão *multicast*, quando o RP de um SA conhece um novo emissor para essa sessão, anuncia-o periodicamente aos seus vizinhos MSDP e cada vizinho MSDP, por sua vez, anuncia esse emissor para os restantes vizinhos MSDP. Desta forma, os emissores activos para essa sessão *multicast* são divulgados por toda a rede de vizinhos MSDP.

A Figura 154 apresenta um cenário de encaminhamento inter-domínio em redes IPv4 usando o mecanismo MSDP.

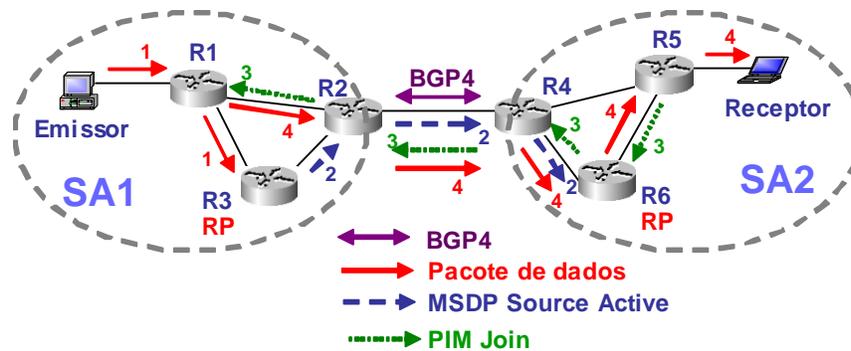


Figura 154 – Solução MSDP

Ao nível do encaminhamento *unicast* entre diferentes SA's é usado o protocolo BGP4 (*Border Gateway Protocol 4*) [RFC 1771] para a troca de informação das redes dos vários SA, construindo-se assim as tabelas de encaminhamento *unicast* essenciais para as comunicações *multicast*.

Cada administrador do SA configura explicitamente no seu RP, o conjunto de RP's de outros SA com os quais estabelece relações de vizinhança MSDP. As relações de vizinhança são estabelecidas através de ligações ponto-a-ponto (TCP) entre pares de RP's. No exemplo apresentado, o RP (*router R3*) do SA1 ao conhecer o Emissor, que começa a enviar dados para uma sessão *multicast* de um determinado grupo (1), envia periodicamente uma mensagem MSDP *Source-Active* (2) contendo o endereço do emissor, o endereço do grupo *multicast* e o endereço da origem da mensagem MSDP, informando desta forma o RP do SA2 do novo emissor para essa sessão *multicast*. O RP (*router R6*) do SA2 ao receber a mensagem MSDP *Source-Active*, se verificar que existe algum receptor interessado nessa sessão *multicast*, adere à árvore de distribuição por emissor (3) através do envio de uma mensagem *Join* (S,G) e a partir desta fase, os dados enviados pelo Emissor começam a ser encaminhados através da árvore de

distribuição por emissor até ao RP (*router* R6), que posteriormente os encaminha até ao receptor interessado (4), através da árvore de distribuição central.

Esta solução permite que cada SA configure o seu próprio RP para servir qualquer gama *multicast* global, obtendo-se desta forma um modelo distribuído em que não existe nenhuma entidade específica responsável por uma dada sessão *multicast*, facilitando o suporte das comunicações *multicast* no modelo ASM. No entanto, esta solução tem problemas de escalabilidade, porque é realizado periodicamente o anúncio de emissores activos (das diferentes sessões *multicast*) para todos os RP's com os quais se estabelecem relações MSDP. Assim, em cenários com múltiplos emissores para múltiplas sessões *multicast*, existe uma carga considerável de mensagens MSDP.

### **Redes IPv6**

Os problemas de escalabilidade do protocolo MSDP, tornaram-no numa solução intermédia pelo IETF e nem sequer foi proposta como solução para o encaminhamento *multicast* inter-domínio em redes IPv6.

Sem usar o protocolo MSDP, a construção da árvores de distribuição central referente a uma determinada sessão *multicast*, requer que todos os *routers multicast* sejam configurados com o mesmo RP que serve essa sessão e os RP's não têm forma de trocar informação relativa aos emissores IPv6 activos. Assim, cada sessão *multicast* global é servida por um único RP e torna-se complicado desenhar um protocolo, que troque informação de todos os RP's e das correspondentes sessões *multicast* existentes na Internet.

O mecanismo *embedded-RP* [RFC 3956] surge como a solução para o encaminhamento *multicast* inter-domínio do modelo ASM em redes IPv6. Trata-se de um mecanismo que explora uma das capacidades do endereçamento IPv6, nomeadamente a capacidade de inserir o endereço IPv6 *unicast global* do RP, no endereço IPv6 *multicast* que identifica a sessão em causa. Este mecanismo deve ser suportado em todos os *routers multicast*. Nas árvores de distribuição por emissor não é necessário suportar este mecanismo, uma vez que os processos de adesão e abandono não envolvem o RP.

Para o mecanismo *embedded-RP* foi definida a gama de endereços IPv6 *multicast* FF07::/12. Quando surge um pacote de dados enviado por um emissor com destino a uma sessão *multicast* de um grupo dentro desta gama, o DR do emissor conhece qual o RP a usar, tal como foi explicado na 2.2.2. Da mesma forma, o DR de um receptor que pretenda aderir a uma

sessão *multicast* dentro da gama definida, conhece o RP a usar para aderir à árvore de distribuição central, pelo que não é necessário nenhum protocolo adicional para esse efeito.

Este mecanismo vem resolver as questões da reserva de endereços e da descoberta do RP. No entanto, exige que cada sessão *multicast* seja servida por um RP único e as comunicações *multicast* IPv6 na Internet passam a ser vistas com um único domínio composto por vários RP's configurados para servir algumas sessões *multicast*. Os pacotes de dados enviados por um emissor de um determinado SA, para uma sessão *multicast* onde existam receptores interessados localizados noutra SA, têm que ser encaminhados através do SA onde está localizado o RP, mesmo que nesse SA não existam receptores interessados em participar nessa sessão. Esta questão exige alguma coordenação entre os diferentes SA's para garantir o melhor suporte para as comunicações *multicast* do modelo ASM.

Para que o mecanismo *embedded-RP* possa ser utilizado em larga escala é necessário controlar o uso do RP, uma vez que se for usado para sessões *multicast* de visibilidade global, elementos externos às sessões *multicast* podem aprender o endereço do RP e criar novas sessões *multicast*, podendo penalizar dessa forma o desempenho do RP.

À parte destas questões, o mecanismo de *embedded-RP* é actualmente o único mecanismo escalável para o encaminhamento *multicast* inter-domínio para o modelo ASM em redes IPv6.

A Figura 155 apresenta um cenário de suporte a comunicações *multicast* do modelo ASM usando o mecanismo *embedded-RP*.

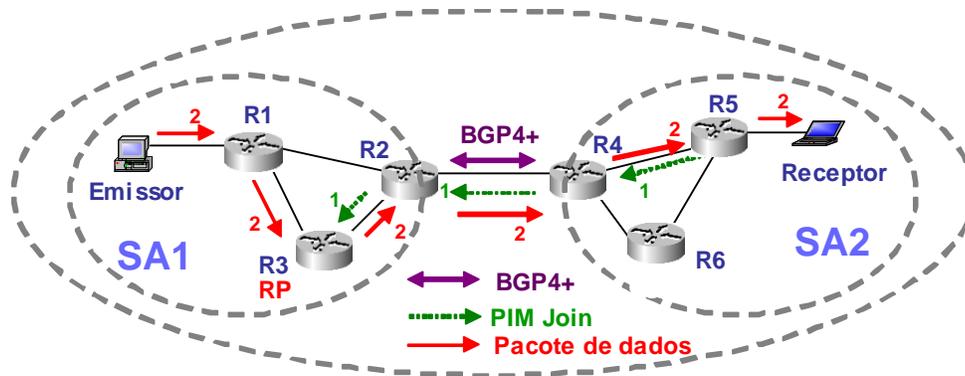


Figura 155 – Solução *Embedded-RP*

Ao nível do encaminhamento *unicast* IPv6 entre diferentes SA's é usado o protocolo BGP4+ (*Border Gateway Protocol 4 Plus*) [RFC 2545] para a troca de informação das redes dos vários SA, construindo-se assim as tabelas de encaminhamento *unicast* essenciais para as comunicações *multicast*.

Considere-se que o *router* R3 localizado no SA1, foi configurado como RP responsável por servir sessões *multicast* de alcance global. Por uma lado, o DR do receptor localizado no SA2, ao conhecer qual o RP da sessão *multicast* pretendida pelo Receptor, (1) envia periodicamente uma mensagem *Join* (\*,G) no caminho de custo mínimo para o *router* R3 (RP), aderindo desta forma à árvore de distribuição central. Por outro lado, o DR do emissor conhece o RP a usar, ao verificar que são enviados pacotes de dados destinados a uma sessão *multicast* (2) de um grupo da gama de endereços reservada para o mecanismo *embedded-RP* e passa a encaminhar esses pacotes de dados encapsulados em mensagens *Register* até ao RP que, por sua vez, usa a árvore de distribuição central para encaminhar os pacotes de dados até aos receptores interessados. A partir desta fase, tanto o RP, como o DR do Receptor, podem aderir à árvore de distribuição por emissor e passarem a receber por essa árvore *multicast* os pacotes de dados destinados à sessão *multicast* pretendida.

### 5.2.2. Modelo SSM

O modelo SSM pela sua arquitectura não requer o uso de um ponto central que estabelece a ligação entre os emissores e os receptores de um determinado grupo *multicast*, abandonando o conceito de árvore de distribuição central e passando a usar apenas árvores de distribuição por emissor, tornando mais simples o seu funcionamento. Os problemas de atribuição de endereços *multicast* também não se colocam uma vez que tanto para redes IPv4, como para redes IPv6, foi reservada uma gama de endereços para ser usada unicamente neste modelo (secção 2.2.2). Neste modelo, os receptores têm que conhecer previamente o endereço do emissor e o endereço do grupo *multicast* do qual pretendem receber tráfego *multicast*.

A Figura 156 apresenta um cenário do encaminhamento inter-domínio usando o modelo SSM.

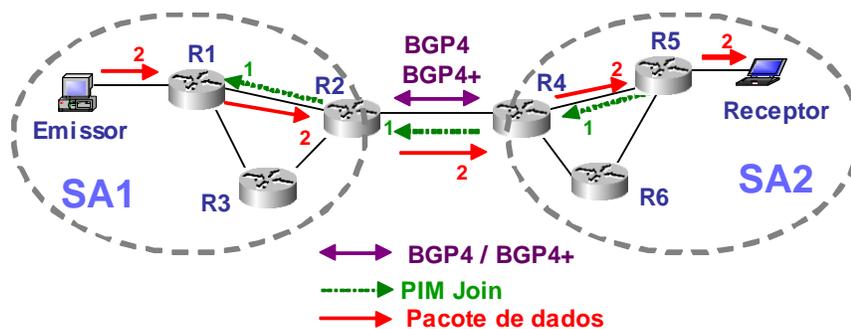


Figura 156 – Solução SSM

O cenário apresentado tem o mesmo significado quando se consideram redes IPv4 ou redes IPv6, existindo apenas a diferença nos protocolos de encaminhamento *unicast* executados nos *routers* fronteira de cada SA: BGP4 (para IPv4) e BGP4+ (para IPv6). O uso do protocolo PIM SSM é uma opção simples e válida para sessões *multicast* entre diferentes SA, uma vez que se configura apenas o protocolo PIM SSM em todos os *routers multicast* que interligam os emissores e os receptores. Quando um receptor pretende aderir a uma determinada sessão *multicast* (S,G), o seu DR (R5) adere à árvore de distribuição por emissor enviando (1) uma mensagem *Join* (S,G) no caminho de custo mínimo para o emissor. Depois de criada a árvore de distribuição por emissor (composta pelos *routers* R1, R2, R3 e R4) o receptor passa a receber os pacotes de dados através da árvore *multicast*.

Apesar da maior simplicidade desta solução quando comparada com as soluções usadas para o modelo ASM (em redes IPv4 e em redes IPv6), ainda não é actualmente muito usada, uma vez que se trata de um modelo recente, existindo algum trabalho a realizar essencialmente ao nível das aplicações que suportam os protocolos IGMPv3 e MLDv2, que permitem aos receptores especificarem o grupo *multicast* e a lista de emissores desejados ou não desejados. Outra das questões relacionadas com o modelo SSM é a falta de um mecanismo de anúncio automático de emissores, especialmente em conferências com múltiplos emissores, permitindo desta forma que os receptores conheçam de uma forma automática quais os emissores de determinadas sessões *multicast*.

### 5.2.3. *Multiprotocol Border Gateway Protocol*

Nas soluções apresentadas anteriormente para o modelo ASM e para o modelo SSM, considerou-se que as ligações entre os SA suportam encaminhamento *unicast* e encaminhamento *multicast*, cenário que nem sempre pode ser uma realidade já que os administradores dos SA podem querer controlar o tráfego *multicast* de forma diferente do tráfego *unicast*, por exemplo por questões económicas. O protocolo *Multiprotocol Border Gateway Protocol* (MBGP) [RFC 2283], permite resolver esta questão.

Os administradores dos SA devem executar simultaneamente nos *routers* fronteira os protocolos BGP4 (para IPv4) ou BGP4+ (para IPv6) e o protocolo MBGP. Usando os protocolos BGP4 e BGP4+, conseguem controlar o tráfego *unicast* nas redes IPv4 e nas redes IPv6, respectivamente e através do protocolo MBGP, conseguem controlar o tráfego *multicast* para redes IPv4 e redes IPv6.

A Figura 157 apresenta um cenário entre dois SA que diferenciam o caminho do tráfego *unicast*, do caminho do tráfego *multicast*. Neste cenário, considera-se que é usado o modelo SSM, no entanto as conclusões que se retiram relativamente ao protocolo MBGP aplicam-se a cenários do modelo ASM.

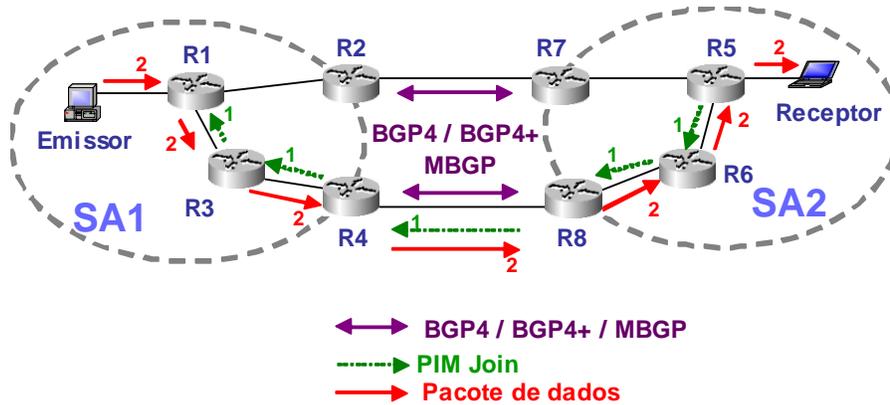


Figura 157 – Solução MBGP

O protocolo MBGP, acrescenta novos atributos ao protocolo BGP4 permitindo que sejam distinguidas as rotas *unicast* das rotas *multicast*, para redes IPv4 e para redes IPv6. Não existe diferença na execução do protocolo MBGP quando são suportadas sessões *multicast* IPv4 (ASM e SSM) ou sessões *multicast* IPv6 (ASM e SSM). No exemplo apresentado, através da manipulação dos atributos do protocolo MBGP, é possível diferenciar o caminho usado para tráfego *unicast* (routers R2 e R7) do caminho usado para tráfego *multicast* (routers R4 e R8).

O encaminhamento *multicast* inter-domínio em redes IPv6, continua a ser objecto de estudo e desenvolvimentos, testado em redes experimentais. Como exemplo, existe a rede de testes M6Bone [M6BONE], onde as sessões *multicast* IPv6 de alcance global estão centralizadas num único RP localizado na Renater [RENATER], usando o mecanismo *embedded-RP*. Em conjunto com o protocolo MBGP é possível resolver o encaminhamento *multicast* entre diferentes SA, sendo considerada toda a Internet com um único domínio *multicast* IPv6.

# Capítulo 6 – Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões resultantes do trabalho efectuado e são apontadas algumas perspectivas de evolução das comunicações *multicast*.

## 6.1. Principais conclusões

O encaminhamento *multicast*, quando comparado com o encaminhamento *unicast*, apresenta algumas vantagens. Por um lado, não existe um encaminhamento contínuo de pacotes de dados em troços de rede onde não existem receptores interessados em determinadas sessões *multicast*, o que conduz a uma diminuição dos problemas de congestionamento e consequentemente aumenta o desempenho global da rede. Por outro lado, a carga de processamento dos emissores e dos *routers* diminui, já que cada emissor emite apenas um fluxo de dados por cada sessão *multicast* e os *routers* têm a capacidade de replicar esse fluxo de dados independentemente do número de receptores interessados em participar nessa sessão *multicast*. Este facto, conduz a uma diminuição de largura de banda ocupada com tráfego *multicast* e ao uso eficiente dos recursos de rede, o que permite que não se imponha um limite no número de participantes interessados em participar em sessões *multicast*.

A presente dissertação teve como principais objectivos, (i) estudar e validar experimentalmente soluções protocolares através das quais é possível suportar comunicações *multicast* em redes IPv6 e em cenários mistos IPv4/IPv6 dentro de um único sistema

autónomo e (ii) avaliar teoricamente soluções que permitem suportar comunicações *multicast* entre diferentes sistemas autónomos.

Numa primeira fase, foi realizado um levantamento de implementações disponíveis que suportam os protocolos de encaminhamento *multicast* da família PIM em redes IPv4 e em redes IPv6 e de algumas aplicações que permitem estabelecer sessões *multicast* (IPv4 e IPv6) do modelo ASM e do modelo SSM. À data da realização das experiências práticas, verificou-se que não existe uma grande variedade de aplicações que suportem os protocolos IGMPv3 (em redes IPv4) e MLDv2 (em redes IPv6) indispensáveis às comunicações *multicast* do modelo SSM, ao contrário do que acontece no modelo ASM. Este facto, justifica-se pelo recente aparecimento do modelo SSM e é um dos principais factores que impede o desenvolvimento de serviços *multicast* usando este modelo.

Em redes IPv6, verificou-se também que não existem muitas implementações que suportem a família de protocolos PIM para encaminhamento *multicast* IPv6. Da pesquisa efectuada foram seleccionadas estações FreeBSD (de uso livre) com a pilha KAME instalada. De entre os protocolos suportados, verificou-se a maior complexidade do protocolo PIM SM quando comparado com o protocolo PIM DM. No entanto, pelas suas características trata-se do protocolo mais usado para servir sessões *multicast* do modelo ASM. O abandono do conceito de RP e manutenção do conceito de árvores de distribuição por emissor, torna simples o funcionamento do protocolo PIM SSM, sendo actualmente o único protocolo de encaminhamento conhecido para suportar sessões *multicast* do modelo SSM.

A compatibilidade dos protocolos de sinalização do modelo SSM com as versões anteriores dos protocolos de sinalização usados no modelo ASM, a definição de uma gama de endereços *multicast* a usar em sessões *multicast* do modelo SSM e o suporte nos *routers multicast* dos protocolos PIM SM e PIM SSM, são factores que permitem sessões *multicast* ASM e SSM simultâneas, possibilitando que na mesma infra-estrutura coexistam serviços de vídeo e áudio conferências (modelo ASM), em que tipicamente as estações assumem o papel de emissor/receptor e serviços de transmissão de vídeo ou rádio (modelo SSM), onde existe um emissor e vários receptores.

Realizou-se também uma pesquisa das implementações disponíveis que permitem sessões *multicast* em cenários mistos IPv4 e IPv6. Para sessões *multicast* IPv6 (tanto para o modelo ASM como para o modelo SSM) entre redes IPv6 interligadas por redes IPv4, pode ser usada uma solução de túneis configurados entre as redes IPv6. Para sessões *multicast* (do modelo

ASM) comuns a redes IPv4 e a redes IPv6, pode ser utilizada uma solução que envolva um tradutor de pacotes IPv4 em pacotes IPv6 e vice-versa, como por exemplo a implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway Multicast*”, apesar de algumas limitações desta implementação.

O encaminhamento *multicast* entre diferentes sistemas autónomos é também uma das questões importantes nas comunicações *multicast*. Para suportar sessões *multicast* do modelo ASM em cenários IPv4, pode ser usada uma solução que recorra aos protocolos PIM SM e MSDP e em cenários IPv6, pode ser usada uma solução que recorra ao protocolo PIMv6 SM usando o mecanismo *embedded-RP*. Para suportar sessões *multicast* do modelo SSM em cenários IPv4 e em cenários IPv6, pode ser usada uma solução baseada no protocolo PIM SSM.

## 6.2. Perspectivas de evolução

Os tópicos relacionados com o encaminhamento *multicast* IPv6 entre diferentes sistemas autónomos tem sido alvo de intensa discussão no IETF. Assim, a avaliação das soluções usadas nos cenários propostos, ou concepção de novas soluções, tendo em conta os mecanismos usados para garantir as comunicações *multicast* IPv6 entre diferentes sistemas autónomos é um tópico de trabalho futuro de extrema relevância.

O desenvolvimento de novas soluções que garantam sessões *multicast* comuns a redes IPv4 e a redes IPv6, é considerado também um trabalho importante a desenvolver, permitindo que sejam usados outros protocolos para além do protocolo PIMv6 SM (em redes IPv6), possibilitando assim uma maior diversidade dos protocolos a usar em sessões *multicast* ASM e sessões *multicast* SSM.

A segurança das comunicações *multicast*, em particular com a forma de evitar ataques aos RP que servem determinadas sessões *multicast* do modelo ASM é também considerado um tópico de trabalho futuro.

Finalmente, o desenvolvimento de um maior número de aplicações que suportem protocolos de sinalização IGMPv3 e MLDv2 e o desenvolvimento de mecanismos de anúncios automáticos dos emissores de sessões *multicast* do modelo SSM, são considerados factores essenciais para a implementação de serviços *multicast* usando o modelo SSM.



# Anexo I – Instalação e configuração da pilha *Kame*

Este anexo apresenta os principais passos de instalação e configuração da pilha *Kame* que suporta as comunicações *multicast* IPv6.

1. Descomprimir o ficheiro para uma directoria de trabalho. No âmbito da dissertação utilizou-se a directoria `/IPv6`

```
# mkdir /IPv6
# cd /usr/local/
# tar zxvf kame-20040419-freebsd49-snap.tgz
```

2. Na directoria `/IPv6/kame` executar os seguintes comandos

```
# cd /IPv6/kame
# make TARGET=freebsd4 prepare
# cp /kernel /kernel.previous
# cd /usr
# mkdir include.clean
# cd include.clean
# (cd ../include; tar Bpcf - . ) | tar Bpxf -
```

3. Compilação da pilha *kame*

```
# cd /IPv6/kame/freebsd4
# cd sys/i386/conf
# cp GENERIC.KAME CONFIGFILE
```

- 3.1 Alteração do ficheiro de configuração `CONFIGFILE` e para suportar *multicast* SSM

```
# ee CONFIGFILE
```

```
-----  
# Source-Specific Multicast (SSM)  
#options          IGMPV3          # IPv4  
#options          MLDV2           # IPv6  
-----  
  
# /usr/sbin/config CONFIGFILE  
# cd ../../compile/CONFIGFILE  
# make clean  
# make depend  
# make  
# make install
```

#### 4. Instalação dos novos *includes*

##### 4.1 Como utilizador normal

```
$ cd /IPv6/kame/freebsd4  
$ make includes
```

##### 4.2 Como utilizador *root*

```
# make install-includes
```

#### 5. Instalação da pilha *kame*

##### 5.1 Como utilizador normal

```
$ make
```

##### 5.2 Como utilizador *root*

```
# make install
```

#### 6. Reinicializar o PC

```
# fastboot
```

**Nota1:** A maior parte dos ficheiros da distribuição FreeBSD encontram-se localizados na directoria */etc*. Se for necessário um ficheiro de configuração especial para os *daemons* da pilha *Kame* (como por exemplo é o *pim6dd* e o *pim6sd*), os ficheiros de configuração devem ser colocados na directoria */usr/local/v6/etc*.

**Nota2:** Os comandos modificados pela pilha *Kame* são colocados nas directorias */usr/local/v6/sbin* e */usr/local/v6/bin*.

## Anexo II – Passos de configuração do “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*”

Esta implementação requer o uso de dois PC’s: (i) PC FreeBSD, configurado para funcionar como RP e que executa um programa PERL (configurado com o prefixo `::/96` do endereço *multicast* IPv6 que vai é traduzido pelo *gateway*) que monitoriza o ficheiro `/var/log/pim6sd` de forma a detectar se existe alguma mensagem *Join/Prune* para esse prefixo. (ii) PC Linux, responsável por receber os pacotes IPv4 e traduzi-los para IPv6 e vice-versa.

Neste anexo são descritos os passos de compilação e configuração da implementação “IPv4-IPv6 *Multicast Gateway*” usada nas experiências práticas desta dissertação.

### FreeBSD

1. Criar a directoria para onde se vai extrair o ficheiro

```
# mkdir -p /usr/local/multicastIP/uninett/
```

2. Descomprimir o ficheiro para a directoria `/usr/local/multicastIP/uninett/`

```
# tar zxvf mcgw-0.1.tar.gz
```

3. Copiar o programa `pimjoin.pl` para a directoria `/usr/local/sbin`

```
# cp /usr/local/multicastIP/uninett/mcgw-0.1/pimjoin.pl /usr/local/sbin
```

Editar o programa *pimjoin.pl* e alterar as linhas 22 e 26 pelo prefixo *multicast ::/96*. Note-se que sempre que se quiser alterar o prefixo, tem que se alterar estas linhas.

Por exemplo, se o prefixo for o **ff0e:a:a:a:a::/96** então a linha 22 passa a ser

```
if (/Group to process : (ff0e:a:a:a:a.+)$/) {
```

e a linha 26 passa a ser:

```
} else if (/No routing entry for source .* and\|or group  
(ff0e:a.a.a.a.+)$/) {
```

4. Activar a opção de *log* para as mensagens de *Join/Prune* no ficheiro de configuração do PIM6-SM (*/usr/local/v6/etc/pim6sd.conf*). Para isso deve ser incluída a seguinte linha:

```
log pim_jp pim_register;
```

5. Lançar o daemon do PIM6-SM

```
# /usr/local/v6/sbin/pim6sd -c /usr/local/v6/etc/pim6sd.conf
```

6. Incluir a seguinte linha no ficheiro */etc/services*

```
pimjoin 1234/tcp
```

7. Incluir a seguinte linha no ficheiro */etc/inetd.conf*

```
pimjoin stream tcp6 nowait root /usr/local/sbin/pimjoin.pl pimjoin.pl
```

8. Reiniciar o serviço *inetd*

```
#killall -9 inetd  
#/usr/sbin/inetd
```

9. Verificar que o serviço *pimjoin* está a correr

```
#telnet localhost 1234  
Trying ::1...  
Connected to localhost.  
Escape character is '^]'.  
ff0e:a:a:a:a:e014:141e  
ff0e:a:a:a:a:e014:a14
```

## Linux

1. Criar a directoria para onde se vai extrair o ficheiro

```
#mkdir -p /usr/local/multicastIPV6/uninett
```

2. Descomprimir o ficheiro para a directoria `/usr/local/multicastIPv6/uninett`

```
#tar zxvf mcgw-0.1.tar.gz
```

3. Alterar as linhas do ficheiro `mcgw.c` para o prefixo que se pretende utilizar. Note-se que sempre que se quiser alterar o prefixo, tem que se alterar estas linhas.

```
inet_pton(AF_INET6, "ff0e:a:a:a:a::", &mreq6.ipv6mr_multiaddr);  
inet_pton(AF_INET6, "ff0e:a:a:a:a::", &sa6.sin6_addr);
```

4. Compilar o ficheiro `mcgw.c`

```
#cd /usr/local/multicastIPv6/uninett/mcgw-0.1  
# cc -o mcgw mcgw.c
```

5. Executar o ficheiro compilado

```
#cd /usr/local/multicastIPv6/uninett/mcgw-0.1  
#./mcgw endereço_IPv6_do_RP 1234 eth0
```



## Referências

- [RFC 791] Information Sciences Institute University, “Internet Protocol”, IETF RFC 791, Setembro 1981.
- [RFC 1112] S. Deering, “Host Extensions for IP Multicasting”, IETF RFC 1112, Agosto 1989.
- [RFC 1305] David L. Mills, “Network Time Protocol (Version 3), IETF RFC 1305, Março 1992”.
- [RFC 1771] Y. Rekhter, T. Li, “A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)”, IETF RFC 1771, Março 2005.
- [RFC 1190] C. Topolcic, “Experimental Internet Stream Protocol, Version 2 (ST-II)”, IETF RFC 1190, Outubro 1990.
- [RFC 2080] G. Malkin, R. Minnear, “RIPng for IPv6”, IETF RFC 2080, Janeiro 1997.
- [RFC 2131] R. Droms, “Dynamic Host Configuration Protocol”, IETF RFC 2131, Março 1997.
- [RFC 2236] W. Fenner, “Internet Group Management Protocol, Version 2”, IETF RFC 2236, Novembro 1997.
- [RFC 2283] T. Bates, R. Chandra, D. Katz, Y. Rekhter, “Multiprotocol Extensions for BGP-4”, IETF RFC 2283, Fevereiro 1998.
- [RFC 2327] M. Handley, V. Jacobson, “SDP: Session Description Protocol”, IETF RFC 2327, Abril 1998.
- [RFC 2362] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M.

- Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharma, L. Wei, “Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM SM): Protocol Specification”, IETF RFC 2362, Junho 1998.
- [RFC 2460] S. Deering, R. Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6)”, IETF RFC 2460, Dezembro 1998.
- [RFC 2463] A. Conta, S. Deering, “Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification”, IETF RFC 2463, Dezembro 1998.
- [RFC 2464] M. Crawford, “Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks”, IETF RFC 2464, Dezembro 1998.
- [RFC 2545] P. Marques, F. Dupont, “Use of BGP-4 Multiprotocol Extensions for IPv6 Inter-Domain Routing”, IETF RFC 2545, Março 1999
- [RFC 2710] S. Deering, W. Fenner and B. Haberman, “Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6”, IETF RFC 2710, Outubro 1999.
- [RFC 2711] C. Partridge, A. Jackson, “IPv6 Router Alert Option”, IETF RFC 2711, Outubro 1999.
- [RFC 2740] R. Coltun, D. Ferguson, J. Moy, “OSPF for IPv6”, IETF RFC 2740, Dezembro 1999.
- [RFC 2766] G. Tsirtsis, P. Srisuresh, “Network Address Translation - Protocol Translation (NAT-PT) ”, IETF RFC 2766, Fevereiro 2000.
- [RFC 2893] R. Gilligan, E. Nordmark, “Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers”, IETF RFC 2893, Agosto 2002.
- [RFC 2974] M. Handley, C. Perkins, E. Whelan, “Session Announcement Protocol”, IETF RFC 2974, Outubro 2000.
- [RFC 3056] B. Carpenter, Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds, “Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds”, IETF RFC 3056, Fevereiro 2001.
- [RFC 3138] D. Meyer, “Extended Assignments in 233/8”, IETF RFC 3138, Junho 2000.
- [RFC 3171] Z. Albanna, K. Almeroth, D. Meyer, M. Schipper, “IANA Guidelines for IPv4 Multicast Address Assignments”, IETF RFC 3171, Agosto 2001.
- [RFC 3180] D. Meyer, P. Lothberg, Sprint, “GLOP Addressing in 233/8”, IETF RFC 3180, Setembro 2001.
- [RFC 3306] B. Haberman, D. Thaler, “Unicast-Prefix-based IPv6 Multicast

- 
- Addresses, IETF RFC 3306, Agosto 2002.
- [RFC 3307] B. Haberman, “Allocation Guidelines for IPv6 Multicast Addresses”, IETF RFC 3307, Agosto 2002.
- [RFC 3376] B. Cain, S. Deering, I. Kouvelas, B. Fenner, A. Thyagarajan, “Internet Group Management Protocol, Version 3”, IETF RFC 3376, Outubro 2002.
- [RFC 3513] R. Hinden, S. Deering, “Internet Protocol Version 6 (IPv6) Addressing Architecture”, IETF RFC 3513, Abril 2003.
- [RFC 3569] S. Bhattacharyya, Ed., “An Overview of Source-Specific Multicast (SSM)”, IETF RFC 3569, Julho 2003.
- [RFC 3618] B. Fenner, D. Meyer, “Multicast Source Discovery Protocol (MSDP)”, IETF RFC 3618, Outubro 2003.
- [RFC 3810] R. Vida, L. Costa, “Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6”, IETF RFC 3810, Junho 2004.
- [RFC 3956] P. Savola, B. Haberman, “Embedding the Rendezvous Point (RP) Address in an IPv6 Multicast Address”, IETF 3956, Novembro 2004.
- [BOOTSTRAP] Nidhi Bhaskar, Alexander Gall, Stig Venaas, “Bootstrap Router (BSR) Mechanism for PIM”, IETF draft-ietf-pim-sm-bsr-04.txt, Julho 2004.
- [IANA] <http://www.iana.org/assignments/multicast-addresses>, Fevereiro 2004.
- [IANA6] <http://www.iana.org/assignments/ipv6-multicast-addresses>, Maio 2004.
- [M6BONE] <http://www.m6bone.net>
- [MTP] K. Tsuchiya, H. Higuchi, S. Sawada, S. Nozaki, “An IPv6/IPv4 Multicast Translator based on IGMP/MLD Proxying (mtp)”, IETF draft-ietf-ngtrans-mtp-03.txt, Outubro 2002.
- [Oliveira 2004] Luís Oliveira, “Mobilidade IP em cenários de transição IPv4-IPv6”, Julho 2004.
- [PIMDM] Steven Deering, Deborah Estrin, Dino Farinacci, Van Jacobson, Almed Helmy, David Meyer, Liming Wei, “Protocol Independent Multicast version 2 Dense Mode Specification”, IETF draft-ietf-idmr-pim-dm-06.txt, Agosto 1997.
- [PIMSM] Bill Fenner, Mark Handley, Hugh Holbrook, Isidor Kouvelas, “Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM SM):

- Protocol Specification (Revised)”, IETF draft-ietf-pim-sm-v2-new-10.txt, Julho 2004.
- [PIMSSM] Bill Fenner, Mark Handley, Hugh Holbrook, Isidor Kouvelas, “Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM SM): Protocol Specification (Revised)”, IETF draft-ietf-pim-sm-v2-new-10.txt, Julho 2004.
- [PIMBIDIR] M. Handley, I. Kouvelas, T. Speakman, L. Vicisano, "Bi-directional Protocol Independent Multicast", IETF draft-ietf-pim-bidir-05.txt, Junho 2003.
- [RAT] <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/rat/>
- [RENATER] <http://www.renater.fr/>
- [SDR] <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/sdr/>
- [SNOOPING] M. Christensen, K. Kimball, F. Solensky, “Considerations for IGMP and MLD Snooping Switches”, IETF draft-ietf-magma-snoop-11.txt, Maio 2004.
- [SSM] H. Holbrook, B. Cain, “Source-Specific Multicast for IP”, IETF draft-ietf-ssm-arch-06.txt, Setembro 2004.
- [UNINETT] <http://www.uninett.no/testnett/multicast/mcgw/>
- [v4v6MG] S. Venaas, “An IPv4 – IPv6 multicast gateway”, IETF draft-venaas-mboned-v4v6mcastgw-00.txt, Fevereiro 2003.
- [VIDEOLAN] <http://www.videolan.org/>
- [WBD] <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/wbd/>
- [ZEBRA] <http://www.zebra.org/>

# Acrónimos

<b>ASM</b>	<i>Any Source Multicast</i>
<b>BGP4</b>	<i>Border Gateway Protocol 4</i>
<b>BGP4+</b>	<i>Border Gateway Protocol 4Plus</i>
<b>BSR</b>	<i>Bootstrap Router</i>
<b>DHCP</b>	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
<b>DR</b>	<i>Designated Router</i>
<b>EGP</b>	<i>Exterior Gateway Protocol</i>
<b>IANA</b>	<i>Internet Assigned Numbers Authority</i>
<b>ICMPv6</b>	<i>Internet Control Message Protocol version 6</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IETF</b>	<i>Internet Engineering Task Force</i>
<b>IGMP</b>	<i>Internet Group Management Protocol</i>
<b>IGMPv2</b>	<i>Internet Group Management Protocol version 2</i>
<b>IGMPv3</b>	<i>Internet Group Management Protocol version 3</i>
<b>IGP</b>	<i>Interior Gateway Protocol</i>
<b>IPv4</b>	<i>Internet Protocol version 4</i>
<b>IPv6</b>	<i>Internet Protocol version 6</i>
<b>ISP</b>	<i>Internet Service Provider</i>

<b>IT</b>	<i>Instituto de Telecomunicações</i>
<b>MLD</b>	<i>Multicast Listener Discovery</i>
<b>MLDv2</b>	<i>Multicast Listener Discovery version 2</i>
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>MBGP</b>	<i>Multiprotocol Border Gateway Protocol</i>
<b>MRC</b>	<i>Maximum Response Code</i>
<b>MRD</b>	<i>Maximum Response Delay</i>
<b>MRIB</b>	<i>Multicast Routing Information Base</i>
<b>MRT</b>	<i>Maximum Response Time</i>
<b>MSDP</b>	<i>Multicast Source Discovery Protocol</i>
<b>MTU</b>	<i>Maximum Transmission Unit</i>
<b>NAT-PT</b>	<i>Network Address Translator – Protocol Translator</i>
<b>NGTrans</b>	<i>Next Generation Transition</i>
<b>NQR</b>	<i>Non Querier Router</i>
<b>NTP</b>	<i>Network Time Protocol</i>
<b>OSI</b>	<i>Open Systems Interconnection</i>
<b>OSPFv3</b>	<i>Open Shortest Path First version 3</i>
<b>PERL</b>	<i>Practical Extraction and Report Language</i>
<b>PIM</b>	<i>Protocol Independent Multicast</i>
<b>PIM Bidir</b>	<i>PIM Bidirectional</i>
<b>PIM DM</b>	<i>PIM Dense Mode</i>
<b>PIM SM</b>	<i>PIM Sparse Mode</i>
<b>PIM SSM</b>	<i>PIM Source Specific Multicast</i>
<b>QQI</b>	<i>Querier's Query Interval</i>
<b>QQIC</b>	<i>Querier's Query Interval Code</i>
<b>QR</b>	<i>Querier Router</i>
<b>QRV</b>	<i>Querier's Robustness Variable</i>
<b>RAT</b>	<i>Robust Audio Tool</i>
<b>RFC</b>	<i>Request For Comments</i>

<b>RIP</b>	<i>Routing Information Protocol</i>
<b>RIPng</b>	<i>Routing Information Protocol next generation</i>
<b>RP</b>	<i>Rendezvous Point</i>
<b>RPF</b>	<i>Reverse Path Forwarding</i>
<b>SA</b>	<i>Sistema Autónomo</i>
<b>SAP</b>	<i>Session Announcement Protocol</i>
<b>SDP</b>	<i>Session Description Protocol</i>
<b>SDR</b>	<i>Session Directory tool</i>
<b>SSM</b>	<i>Source Specific Multicast</i>
<b>ST</b>	<i>Stream Protocol</i>
<b>TCP</b>	<i>Transmission Control Protocol</i>
<b>TTL</b>	<i>Time To Live</i>
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol</i>
<b>V6ops</b>	<i>IPv6 operations</i>