



Instituto Politécnico de Leiria

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

IPv6@ESTG-Leiria

Testes de Mobilidade de Rede (NEMO) em IPv6

Vítor André Cordeiro dos Santos

Leiria

Fevereiro de 2007



Instituto Politécnico de Leiria

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

IPv6@ESTG-Leiria

Testes de Mobilidade de Rede (NEMO) em IPv6

Relatório final da disciplina de Projecto II, do curso de Licenciatura em

Engenharia Informática e Comunicações, ano lectivo 2006/2007.

Realizado entre Outubro de 2006 e Fevereiro de 2007.

Autor:

Vítor André Cordeiro dos Santos, aluno n.º 10451

Orientador: Prof. Mário Antunes

Co-orientador: Prof. Nuno Veiga

Leiria

Fevereiro de 2007

Para os meus pais.

Pelo seu esforço, principalmente nestes últimos anos,

Para que eu pudesse chegar onde cheguei,

E pelo orgulho que sei que têm em mim. Obrigado.

Agradecimentos

Ao Professor Mário Antunes, orientador do projecto, pela preciosa orientação, incentivo, motivação, visão, sentido prático e apoio nos momentos mais complicados.

Ao Professor Nuno Veiga, co-orientador do projecto, pelos reparos, sugestões, espírito crítico, boa disposição e sentido de humor.

Aos colegas Nélia Grácio e Nelson Sebastião, pela cooperação durante a realização do projecto.

Ao colega Nuno Cardoso, encarregado de trabalhos do Departamento de Engenharia Informática, pela facilidade na disponibilização do equipamento necessário à realização do projecto.

A Romain Kuntz [kuntz@sfc.wide.ad.jp], do grupo de trabalho Nautilus6, pela prontidão com que se prestou no esclarecimento de dúvidas através das *mailing lists* e pela valiosíssima ajuda na resolução dos vários problemas que se encontraram.

A Patrick Grossetete [pgrosset@cisco.com] e Richard Shao [rshao@cisco.com], ambos responsáveis de topo da Cisco Systems, pelos esclarecimentos prestados acerca do Cisco IOS e pelo interesse manifestado acerca deste projecto.

Aos colegas de Projecto II de EIC, pela camaradagem e convivência durante um semestre de trabalho intensivo.

A todos os que contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste projecto.

Last, but not least, à minha namorada, Marlene Rodrigues, pelo apoio, incentivo, motivação, força e dedicação incondicionais, e por me aturar nos períodos mais críticos.

Vítor A. C. Santos
Fevereiro de 2007

Resumo

A Mobilidade de Rede em IPv6, através do protocolo NEMO definido pelo IETF, é uma extensão à Mobilidade IPv6 actual que permite a redes inteiras de dispositivos, que se movem como um todo, alterarem o seu ponto de ligação à Internet, sem que haja quebra das sessões, das camadas de transporte e superiores, em curso. Esta alteração é transparente para todos os nós da rede móvel, sendo completamente assegurada por um *router* móvel, responsável pela rede, e por um *home agent*, com o qual o *router* móvel se regista quando se move.

Neste projecto estudou-se e testou-se a Mobilidade de Rede em IPv6 e o protocolo NEMO. Inicialmente, efectuou-se um estudo teórico da tecnologia, com vista à compreensão dos conceitos associados, e analisou-se o estado da arte neste domínio, nomeadamente os desenvolvimentos do grupo de trabalho NEMO do IETF, responsável pela especificação do protocolo com o mesmo nome. Após terem sido adquiridos os conhecimentos necessários à realização do trabalho, definiu-se uma arquitectura de testes na qual se realizaram testes conclusivos acerca do funcionamento e utilização desta tecnologia, mais concretamente do protocolo NEMO e da sua implementação NEPL para Linux.

O estudo e os testes efectuados, apesar de ainda revelarem uma certa imaturidade do protocolo e das suas implementações, não se aconselhando para já a sua utilização em cenários de produção, permitiram concluir que esta é uma tecnologia com bastante potencialidade e que tem tudo para servir de base à mobilidade efectiva das redes do futuro.

Este projecto foi um dos primeiros a estudar e testar a Mobilidade de Rede em IPv6 e o protocolo NEMO em Portugal, tendo como principal objectivo contribuir para uma maior compreensão e domínio desta tecnologia.

Palavras-chave: IPv6; *Mobile IPv6*; MIPv6; *Network Mobility*; NEMO; *Mobile Network*; *Mobile Router*; Mobilidade de Rede; Rede Móvel; *Router Móvel*.

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xix
Lista de Siglas e Acrónimos.....	xxi
1. Introdução.....	1
2. Enquadramento.....	3
2.1. Motivações e Aplicações.....	3
2.2. Objectivos.....	5
2.3. Planeamento.....	6
2.4. Projecto IPv6@ESTG-Leiria.....	6
3. Mobilidade de Rede em IPv6 – NEMO.....	9
3.1. Introdução.....	10
3.2. Arquitectura e Terminologia.....	11
3.3. Tipos e Formatos de Mensagens.....	13
3.3.1. Binding Update.....	14
3.3.2. Binding Acknowledgement.....	14
3.3.3. Mobile Network Prefix Option.....	15
3.3.4. Dynamic Home Agent Address Discovery Request.....	15

3.3.5.	Dynamic Home Agent Address Discovery Reply	16
3.3.6.	Home Agent Information Option.....	16
3.4.	Funcionamento.....	17
3.4.1.	Visão Geral	17
3.4.2.	Modos de Operação	20
3.4.3.	Router Móvel	20
3.4.4.	Home Agent	21
3.5.	Utilização de Protocolos de Encaminhamento.....	22
3.6.	Considerações de Segurança.....	23
3.7.	Nested Mobility.....	24
3.8.	Limitações.....	25
3.8.1.	Encaminhamento Sub-ótimo e Optimização de Rotas.....	25
3.8.2.	Multihoming	27
3.8.3.	Delegação de Prefixos por DHCPv6.....	27
3.9.	NEMO vs. MANET	28
4.	Estado da Arte	31
4.1.	Normalização	31
4.1.1.	Grupos de Trabalho do IETF	31
4.1.2.	Request for Comments e Internet-Drafts	33
4.2.	Implementações NEMO.....	34
4.2.1.	SHISA	35
4.2.2.	NEPL.....	36
4.2.3.	ATLANTIS	36
4.3.	Suporte dos Sistemas Operativos.....	37
4.3.1.	Linux	37
4.3.2.	BSD.....	37

4.3.3.	Cisco IOS	38
4.3.4.	Microsoft Windows.....	38
4.3.5.	Mac OS X e Darwin.....	39
4.4.	Entidades de Referência	39
4.4.1.	IETF	39
4.4.2.	WIDE Project e Nautilus6.....	40
4.4.3.	KAME Project.....	40
4.4.4.	TAHI Project.....	41
4.4.5.	GO-Core Project.....	41
4.5.	Outros Projectos e Trabalhos	42
5.	Arquitectura de Testes	43
5.1.	Cenários de Testes.....	43
5.1.1.	Cenário Geral	43
5.1.2.	Endereçamento	45
5.1.3.	Cenário 1 – Wired	46
5.1.4.	Cenário 2 – Wireless	47
5.2.	Definição de Testes	49
5.3.	Requisitos.....	50
5.3.1.	Hardware	50
5.3.2.	Software	51
5.4.	Utilização de Máquinas Virtuais	52
5.5.	Possibilidade de Utilização de Simuladores.....	53
6.	Configuração de Cenários, Testes e Resultados	57
6.1.	Instalação das Implementações NEMO	57
6.1.1.	NEPL.....	57
6.1.2.	SHISA	60

6.2.	Cenário 1 – Wired	63
6.2.1.	Descrição.....	63
6.2.2.	Configuração.....	64
6.2.3.	Problemas Encontrados.....	66
6.2.4.	Instalação da Nightly Snapshot 20060725 da NEPL.....	70
6.2.5.	Testes e Resultados	72
6.3.	Cenário 2 – Wireless.....	88
6.3.1.	Descrição.....	88
6.3.2.	Configuração.....	90
6.3.3.	Testes e Resultados	91
6.3.3.1.	Streaming/UDP	92
6.3.3.2.	SSH/TCP.....	96
7.	Conclusão	101
	Referências.....	105
	Anexo A. Características dos Equipamentos Utilizados	115
A.1.	Equipamentos do Cenário 1 – Wired	115
A.2.	Equipamentos do Cenário 2 – Wireless	116
	Anexo B. Configurações dos Cenários de Teste	117
B.1.	Configurações do Cenário 1 – Wired.....	117
B.1.1.	AR – Script de Configuração e Inicialização.....	117
B.1.2.	AR – Ficheiro de Configuração do radvd	118
B.1.3.	HA – Script de Configuração e Inicialização.....	118
B.1.4.	HA – Ficheiro de Configuração do nemod	119
B.1.5.	HA – Ficheiro de Configuração do radvd.....	120
B.1.6.	MR – Script de Configuração e Inicialização	120
B.1.7.	MR – Ficheiro de Configuração do nemod.....	121

B.1.8.	MR – Ficheiro de Configuração do radvd.....	122
B.1.9.	MNN – Script de Configuração e Inicialização	122
B.1.10.	CN – Script de Configuração e Inicialização	123
B.2.	Configurações do Cenário 2 – Wireless	125
B.2.1.	AR – Script de Configuração e Inicialização	125
B.2.2.	HA – Script de Configuração e Inicialização	125
B.2.3.	MR – Script de Configuração e Inicialização	126
B.2.4.	MR – Ficheiro de Configuração do nemod.....	127
Anexo C.	Patch para o código da NEPL (por Romain Kuntz).....	129
Anexo D.	Nota acerca de Marcas Registadas	131

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Comparação entre o uso de MIPv6 e NEMO num ambiente móvel.	10
Figura 3.2 – Funcionamento básico do protocolo de gestão de mobilidade de rede NEMO.....	11
Figura 3.3 – Arquitectura NEMO.	12
Figura 3.4 – Formato da mensagem Binding Update com a nova flag R.	14
Figura 3.5 – Formato da mensagem Binding Acknowledgement com a nova flag R.	14
Figura 3.6 – Formato da nova opção de mobilidade Mobile Network Prefix Option.	15
Figura 3.7 – Formato da mensagem DHAAD Request com a nova flag R.	16
Figura 3.8 – Formato da mensagem DHAAD Reply com a nova flag R.....	16
Figura 3.9 – Formato da opção Home Agent Information Option com a nova flag R.	17
Figura 3.10 – Funcionamento do protocolo NEMO (sequência de acontecimentos).	18
Figura 3.11 – Funcionamento do protocolo NEMO (sequência de acontecimentos, cont.).	19
Figura 3.12 – Situação de um nível de nested mobility.	24
Figura 3.13 – Encaminhamento de tráfego devido a um nível de nested mobility.	26
Figura 3.14 – NEMO constituída por MANETs.....	28
Figura 3.15 – MANET constituída por NEMOs.....	29
Figura 4.1 – Relação entre diversos grupos de trabalho do IETF (adaptado de [22]).	32
Figura 4.2 – Evolução dos diversos Internet-Drafts produzidos pelo NEMO WG do IETF.	34
Figura 5.1 – Cenário geral da arquitectura de testes.	44
Figura 5.2 – Esquema de endereçamento da arquitectura de testes definida.	45
Figura 5.3 – Cenário 1 – Wired.....	46

Figura 5.4 – Cenário 2 – Wireless.	48
Figura 5.5 – Ilustração do raio de acção dos APs das duas redes e da zona de transição suave.	48
Figura 5.6 – Cenário em que os APs de acesso são substituídos por interfaces wireless.	49
Figura 5.7 – Solução encontrada para a utilização de máquinas virtuais.	52
Figura 6.1 – Extracto do output do erro ocorrido durante a compilação do ficheiro if_nemo.c..	62
Figura 6.2 – Ilustração detalhada do Cenário 1 – Wired.	63
Figura 6.3 – Debug do nemod no HA indicando o envio do Binding Acknowledgement.	66
Figura 6.4 – Regras de encaminhamento do MR.	67
Figura 6.5 – Tabela de encaminhamento número 252 do MR, com este na rede visitada.	68
Figura 6.6 – Rota por omissão correctamente inserida na tabela de encaminhamento do MR.	69
Figura 6.7 – Debug do nemod do MR após a sua inicialização na rede origem.	73
Figura 6.8 – Verificação da existência da interface túnel no MR após a sua inicialização.	73
Figura 6.9 – Configuração da interface eth0 do MR após a sua inicialização na rede origem.	74
Figura 6.10 – Rota por omissão configurada no MR após a sua inicialização na rede origem.	74
Figura 6.11 – Rota para a rede 2001:1:1::/64 (rede móvel) no HA com o MR na rede origem.	74
Figura 6.12 – Início do ping6 entre o MNN e o CN com o MR na rede origem.	75
Figura 6.13 – Movimentação da rede móvel.	75
Figura 6.14 – Continuação do ping6 entre o MNN e o CN com o MR na rede visitada.	75
Figura 6.15 – Debug do nemod do MR após a movimentação para a rede visitada.	77
Figura 6.16 – Debug do nemod do HA após a movimentação do MR para a rede visitada.	78
Figura 6.17 – Binding Cache do HA apresentando a informação do registo do MR.	78
Figura 6.18 – BUL do MR indicando a espera de um Binding Acknowledgement do HA.	78
Figura 6.19 – Debug do nemod do MR indicando o reenvio do Binding Update para o HA.	79
Figura 6.20 – Captura do Binding Update enviado pelo MR para se registar no HA.	79
Figura 6.21 – Configuração do cenário de testes após o movimento da rede móvel.	81
Figura 6.22 – Configuração da interface eth0 do MR na rede visitada.	82

Figura 6.23 – Configuração da interface túnel (ip6tn11) do MR na rede visitada.	82
Figura 6.24 – Rota por omissão configurada no MR na rede visitada.	82
Figura 6.25 – Rota para a rede 2001:1:1::/64 (rede móvel) no HA com o MR na rede visitada.	82
Figura 6.26 – Captura de um Echo Request de um ping6 do MNN para o CN à saída do MR.	83
Figura 6.27 – Continuação do ping6 entre o MNN e o CN após o “regresso a casa” do MR.	84
Figura 6.28 – Debug do nemod do MR após a sua movimentação para a rede origem.	85
Figura 6.29 – Debug do nemod do HA após a movimentação do MR para a rede origem.	86
Figura 6.30 – Captura do Binding Update enviado pelo MR para o HA para se desvincular.	86
Figura 6.31 – Captura do Binding Acknowledgement enviado pelo HA para o MR.	87
Figura 6.32 – Gráfico de fluxo das mensagens NEMO trocadas entre o MR e o HA.	88
Figura 6.33 – Ilustração detalhada do Cenário 2 – Wireless.	89
Figura 6.34 – Ilustração do túnel estabelecido entre o HA e o AR através da rede da ESTG.	90
Figura 6.35 – VLC media player no servidor de streaming (CN) a enviar o stream vídeo.	93
Figura 6.36 – VLC media player no cliente de streaming (MNN) a receber o stream de vídeo.	93
Figura 6.37 – Encaminhamento do stream de vídeo com a rede móvel na rede origem.	93
Figura 6.38 – Captura, à entrada da interface de saída do MR, de um pacote do stream.	94
Figura 6.39 – Encaminhamento do stream de vídeo com a rede móvel na rede visitada.	95
Figura 6.40 – Captura de um pacote do stream encapsulado no túnel.	96
Figura 6.41 – Gráfico tempo/sequência da sessão SSH entre o MNN e o AR.	98
Figura 6.42 – Pacotes capturados aquando do handover da rede móvel para a rede visitada.	99
Figura 6.43 – Pacotes capturados aquando do handover da rede móvel para a rede origem.	99

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Resumo do esquema de endereçamento da arquitectura de testes.	46
Tabela 5.2 – Combinações possíveis das duas implementações do NEMO entre o MR e o HA.	50
Tabela 5.3 – Resumo dos requisitos de hardware dos diversos cenários.	51
Tabela 5.4 – Resumo dos requisitos de software dos diversos cenários.	51
Tabela 5.5 – Resumo dos requisitos de hardware dos cenários recorrendo à virtualização.	53
Tabela A.1 – Características dos equipamentos utilizados no Cenário 1 – Wired.	115
Tabela A.2 – Características dos equipamentos utilizados no Cenário 2 – Wireless.	116

Lista de Siglas e Acrónimos

AP	Access Point
AR	Access Router
BAck	Binding Acknowledgement
BC	Binding Cache
BSD	Berkeley Software Distribution
BU	Binding Update
BUL	Binding Update List
CN	Correspondent Node
CoA	Care-of Address
CVIS	Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (Project)
DHAAD	Dynamic Home Agent Address Discovery
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DHCPv6	Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6
DHCPv6PD	DHCPv6 Prefix Delegation
DoS	Denial of Service
eMOTION	Network in Motion (Project)
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria
ESTG-Leiria	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria
HA	Home Agent
HN	Home Network
HoA	Home Address
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
I-D	Internet-Draft
IETF	Internet Engineering Task Force
InternetCAR	Internet Connected Automobile Researches (Project)

IOS	Internetwork Operating System
IP	Internet Protocol
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
IPsec	Internet Protocol Security
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
LFN	Local Fixed Node
Linux	Linus Torvalds' UNIX
LMN	Local Mobile Node
MAC	Media Access Control
Mac OS X	Macintosh Operating System X
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MANET	Mobile Ad-hoc Networks (IETF WG)
MH	Mobility Header
MIP	Mobile Internet Protocol
MIP4	Mobility for IPv4 (IETF WG)
MIP6	Mobility for IPv6 (IETF WG)
MIPL	Mobile IPv6 for Linux
MIPSHOP	Mobility for IP: Performance, Signaling and Handoff Optimization (IETF WG)
MIPv4	Mobile IPv4
MIPv6	Mobile IPv6
MN	Mobile Node
MNN	Mobile Network Node
MNP	Mobile Network Prefix
MONAMI6	Mobile Nodes and Multiple Interfaces in IPv6 (IETF WG)
MONET	Mobile Networks (IETF WG)
MR	Mobile Router
MULTI6	Site Multihoming in IPv6 (IETF WG)
NEMO	Mobile Network
NEMO	Network Mobility
NEMO	Network Mobility (IETF WG)
NEPL	NEMO Platform for Linux
NS-2	Network Simulator 2

OSPFv3	Open Shortest Path First for IPv6
OverDRiVE	Spectrum Efficient Uni- and Multicast Services over Dynamic Multi-Radio Networks in Vehicular Environments (Project)
PAN	Personal Area Network
PDA	Personal Digital Assistant
RA	Router Advertisement
RFC	Request for Comments
RIPng	Routing Information Protocol Next Generation
RO	Route Optimization
RTP	Real-time Transport Protocol
SHIM6	Site Multihoming by IPv6 Intermediation (IETF WG)
SSH	Secure Shell
SSID	Service Set Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VLAN	Virtual Local Area Network
VLC	VideoLAN Client
VMN	Visiting Mobile Node
VN	Visited Network
WAN	Wide Area Network
WG	Working Group
WIDE	Widely Integrated Distributed Environment (Project)
Wi-Fi	Wireless Fidelity (IEEE 802.11)

1. Introdução

Hoje em dia, com o sucesso das redes de comunicações sem fios e com o uso crescente de dispositivos IP em ambientes móveis (e.g., PDAs, telemóveis, etc.) num ambiente de computação ubíqua, os utilizadores exigem estar ligados à Internet em qualquer altura e em qualquer lugar, sem que haja quebras de serviço. O IP (*Internet Protocol*) parece ser a base tecnológica das redes do futuro, fixas ou móveis, fornecendo todo o tipo de serviços através de diferentes tecnologias de acesso. Contudo, o IP não foi desenhado com vista à mobilidade dos utilizadores e terminais, não sendo esta mobilidade suportada de forma nativa no IPv4 nem no IPv6.

No entanto, o fornecimento de conectividade ininterrupta à Internet a dispositivos móveis IP vem sendo estudado há já algum tempo no IETF (*Internet Engineering Task Force*). Nesse sentido, de maneira a permitir a mobilidade de terminais em redes IPv4 e IPv6, foram desenvolvidos protocolos como o *Mobile IPv4* (MIPv4) [26] e o *Mobile IPv6* (MIPv6) [28], respectivamente. Todavia, cada vez mais se começa a ver cenários de mobilidade que envolvem o movimento, não só de terminais, mas de redes IP, terminais e *routers*, que se movem como um todo. Exemplos disso são as redes de área pessoal (PANs), redes de sensores desenvolvidas em veículos e redes de acesso em transportes públicos. Os protocolos existentes não suportam este tipo de mobilidade.

Com vista à resolução deste problema, o IETF criou um novo grupo de trabalho, o NEMO (*NEtwork MObility*), com o objectivo de estender os protocolos de mobilidade existentes, ou desenvolver novos, de forma a fornecer mecanismos que permitam a gestão da mobilidade de uma rede como um todo, possibilitando a essa rede alterar o seu ponto de ligação à infraestrutura IP sem quebra das comunicações em curso.

Na sequência do projecto “*Testes de Mobilidade IPv6*” [4], onde se realizaram alguns testes com MIPv6 e se efectuou um bom estudo da tecnologia, pretende-se neste projecto estudar e testar os

desenvolvimentos do grupo de trabalho NEMO do IETF, mais concretamente analisar e demonstrar o funcionamento do Protocolo de Suporte Básico de Mobilidade de Rede (NEMO). Para tal, pretendem-se implementar cenários de teste de mobilidade de rede em IPv6, usando algumas das plataformas e aplicações que implementam a ainda recente especificação NEMO [30], mais exactamente as disponíveis para as variantes BSD e Linux.

No Capítulo 2 deste relatório, e após este Capítulo 1 introdutório, enquadra-se o trabalho desenvolvido, apresentando-se as suas motivações e objectivos. No Capítulo 3 apresenta-se uma descrição técnica da Mobilidade de Rede em IPv6, mais concretamente do protocolo NEMO, destacando-se algumas das suas características, mecanismos e operações. No Capítulo 4 é apresentado o estado da arte no domínio da Mobilidade de Rede, nomeadamente os últimos avanços do grupo de trabalho NEMO do IETF, as implementações existentes, o nível de suporte dos principais sistemas operativos e as entidades de referência no desenvolvimento da tecnologia. No Capítulo 5 descreve-se a arquitectura de testes a implementar, incluindo os cenários a desenvolver e os testes a efectuar. No Capítulo 6 descrevem-se os cenários de teste implementados e apresentam-se os testes efectuados e respectivos resultados obtidos. No Capítulo 7, que conclui este relatório, são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2. Enquadramento

A mobilidade IP, nomeadamente a mobilidade de rede, possui elevadas exigências a vários níveis, como por exemplo, em termos de endereços, pelo que, em larga escala, só se torna possível com IPv6. Desta forma o IPv6 tem uma importância de destaque no desenvolvimento destas tecnologias.

Tendo em conta a relativa novidade dos conceitos associados à mobilidade IP, este trabalho, desenvolvido no âmbito da disciplina de Projecto II, do 5.º ano do curso de Licenciatura em Engenharia Informática e Comunicações da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, e do projecto *IPv6@ESTG-Leiria* (ver Secção 2.4), no 1.º semestre do ano lectivo 2006/2007, pretende dar mais uma ajuda na compreensão e domínio do tema, apresentando uma estudo teórico dos conceitos e uma descrição prática de cenários de teste implementados e respectivos resultados obtidos.

Para uma melhor compreensão deste trabalho, sugere-se que o leitor esteja familiarizado com o IPv6 e, mais concretamente, com a mobilidade em IPv6, como especificado pelo protocolo *Mobile IPv6* [28].

2.1. Motivações e Aplicações

Num futuro próximo, aviões, transportes públicos, automóveis e outros veículos, e mesmo pessoas transportarão redes inteiras de dispositivos IPv6 com a capacidade de se ligarem à Internet. Contudo, à medida que se movem, estas redes têm de alterar o seu ponto de ligação à Internet, devido à disponibilidade de conectividade física. A mobilidade de rede, em particular através do protocolo NEMO, permitirá aos dispositivos destas redes manterem as suas ligações a outros dispositivos da Internet inalteradas, no sentido em que os seus prefixos e endereços IPv6

se mantêm também inalterados. [7] Algumas das aplicações da mobilidade de rede são apresentadas de seguida.

Aviões:

Até recentemente, os dispositivos sem fios eram proibidos nos voos comerciais, devido ao risco de interferência com os sistemas eléctricos dos aviões. Contudo, em Junho de 2005, a *Federal Aviation Administration* (FAA) dos Estados Unidos deu autorização à United Airlines para equipar algumas das sua aeronaves com a tecnologia Wi-Fi (802.11), para que os seus clientes pudessem ter acesso à Internet através dos seus computadores portáteis enquanto viajavam. [97] Esta nova regulação abrirá as portas aos serviços de Internet nos voos comerciais e convidará o protocolo NEMO a ser a solução para fornecer conectividade contínua à Internet às redes compostas pelos múltiplos passageiros.

Outros transportes públicos:

Para além do caso dos aviões, uma aplicação de interesse da mobilidade de rede é a sua utilização em redes de acesso desenvolvidas em transportes públicos, nomeadamente em comboios e autocarros. Estas redes permitirão aos seus passageiros ligarem os seus dispositivos, e mesmo as suas PANs, à Internet enquanto se deslocam. A utilização do NEMO é a forma de tornar possível, de forma transparente para os utilizadores dos transportes públicos, a ligação de todos estes dispositivos e redes à Internet através de um único ponto, o *router* móvel do autocarro ou do comboio.

Automóveis e outros veículos:

Não é difícil imaginar redes de dispositivos, ou mesmo sistemas de navegação, sensores, multimédia ou condução, baseados na Internet em automóveis e outros veículos. O NEMO tem o potencial de fornecer um ponto de acesso único e partilhado à Internet a todos estes sistemas, sendo essencial, no caso de sistemas críticos de condução, para manter conectividade e disponibilidade contínuas. [20]

Personal Area Networks (PANs):

Começa a ser comum as pessoas trazerem consigo múltiplos dispositivos com possibilidade de acesso à Internet, como telefones móveis, PDAs, computadores portáteis e mesmo leitores de música. Estas configurações são geralmente designadas de Redes de Área Pessoal (PANs). Em

vez de todos os dispositivos acederem à Internet por si só, podem fazê-lo através da PAN. Utilizando o NEMO, um dispositivo, como um telemóvel, pode actuar como *router* móvel, fornecendo acesso contínuo a todos os outros.

A principal motivação para este projecto centra-se na necessidade de se conhecer a tecnologia de mobilidade de rede, permitindo num futuro próximo desenvolverem-se redes móveis que possam ter aplicabilidade na resolução de problemas concretos, como são exemplo alguns dos projectos e trabalhos apresentados na Secção 4.5.

2.2. Objectivos

Os objectivos propostos para este trabalho incluem:

1. Enquadrar o tema no trabalho já desenvolvido;
2. Estudar os conceitos de mobilidade necessários à elaboração do trabalho, nomeadamente através da análise do estado da arte e dos avanços registados pelo grupo de trabalho NEMO do IETF;
3. Definir e implementar cenários e redes de testes em IPv6, se possível contemplando ambientes heterogéneos, para configurar e testar a mobilidade de rede em IPv6 utilizando as implementações NEMO existentes;
4. Verificar o funcionamento de diversos mecanismos do NEMO, nomeadamente: registo do *router* móvel, manutenção de sessões, encaminhamento, etc.;
5. Recolher e documentar os resultados obtidos nos testes efectuados;
6. Apresentar conclusões sobre a utilização do NEMO em ambientes heterogéneos e aferir sobre a sua utilização em redes de maiores dimensões;
7. Elaborar um relatório técnico sobre todo o trabalho desenvolvido e as conclusões dos resultados obtidos.

Não faz parte dos objectivos deste trabalho:

1. Estudar e implementar soluções de encaminhamento IP no âmbito das redes *ad-hoc* móveis (MANETs);
2. Estudar e implementar soluções de *multihoming*;

3. Estudar os desenvolvimentos do grupo de trabalho MIPv6, relacionados especificamente com a Mobilidade IPv6;
4. Estudar os diversos tipos e modelos de redes origem;
5. Estudar e implementar soluções de optimização de rotas.

2.3. Planeamento

Este projecto é composto pelas seguintes fases:

1. Inicial

- Fase dedicada à investigação, aprendizagem de conceitos e análise do estado da arte.

2. Definição de Cenários e Pré-requisitos

- Fase para a definição dos cenários de testes e dos requisitos para a realização destes.

3. Implementação

- Uma fase essencialmente prática, e de testes.

4. Documentação e Conclusões

- Fase destinada à documentação do que foi sendo implementado e testado e à obtenção de conclusões acerca da tecnologia estudada.

5. Final

- Fase de conclusão do projecto, constituído pela entrega do relatório final, artigo, poster e a realização da apresentação.

2.4. Projecto IPv6@ESTG-Leiria

O projecto *IPv6@ESTG-Leiria* [57], em curso na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria desde Março de 2004, assenta no estudo do IPv6 e das tecnologias de suporte existentes. Desde o primeiro projecto [3] que se defendem três objectivos principais para todos os projectos que se desenvolvam:

- Experimentar – Devido às diferenças existentes face ao IPv4, é “urgente” experimentar e testar o protocolo IPv6 em várias plataformas e serviços, comparando sempre com o IPv4;

- Divulgar – O domínio da tecnologia torna a divulgação mais eficaz junto da comunidade interessada, implicando uma adopção progressiva do protocolo IPv6;
- Integrar – A experimentação e divulgação da tecnologia permitem uma integração de vários projectos assentes no IPv6, nomeadamente projectos de final de curso, dando uma visão mais abrangente da aplicabilidade e utilidade do IPv6 como tecnologia de suporte de vários serviços.

Este projecto (*IPv6@ESTG-Leiria*) pretende também criar bases de estudo e de trabalho sólidas para projectos futuros, contando já com oito projectos de final de curso (dois de bacharelato e seis de licenciatura), envolvendo cada um o estudo de diferentes matérias relacionadas com o IPv6. Dos 8 projectos envolvidos dois decorreram este semestre: um deles é o que se apresenta neste relatório, “*Testes de Mobilidade de Rede (NEMO) em IPv6*”, o outro constitui uma continuação mais directa do projecto anterior, “*Testes de Mobilidade IPv6*”, e intitula-se “*Mobilidade IPv6 – Estudo das variantes de handover*”.

Espera-se que a lista de projectos envolvidos vá crescendo, assim como o nível de conhecimento e domínio do protocolo IPv6. Mais informação sobre o projecto *IPv6@ESTG-Leiria* pode ser encontrada em <http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/>, via IPv4 ou IPv6.

3. Mobilidade de Rede em IPv6 – NEMO

Actualmente, utilizando a Mobilidade IPv6 (*Mobile IPv6 – MIPv6*) [28], é possível mover dispositivos IPv6 de um ponto para o outro na Internet sem se perderem as ligações das camadas superiores, mantendo-se as ligações em curso e garantindo a conectividade. Contudo, com a proliferação do IP e o desejo de se estar sempre ligado à Internet, cada vez mais se começa a ver cenários de mobilidade que envolvem o movimento de redes inteiras de dispositivos, em vez de apenas um dispositivo. [7]

É possível proporcionar mobilidade a todos os dispositivos destas redes móveis utilizando a normal Mobilidade IPv6. Contudo, o facto de todos os dispositivos da rede serem móveis implica que todos tenham suporte de Mobilidade IPv6, através do protocolo MIPv6, o que gera um *overhead* excessivo, pois todos os dispositivos têm de efectuar as funções de mobilidade definidas. [1] Além de que, nem todos os dispositivos de uma grande rede móvel poderão ser sofisticados o suficiente para correrem aquele protocolo de suporte de mobilidade. [17]

Outra solução para o problema é a Mobilidade de Rede (*Network Mobility – NEMO*). O novo Protocolo de Suporte Básico de Mobilidade de Rede, o *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol* [30], ou só NEMO, desenvolvido e normalizado pelo grupo de trabalho do IETF com o mesmo nome [54], estende o MIPv6 de forma a dar suporte à mobilidade de redes inteiras de dispositivos que se movem como um todo.

A Figura 3.1 mostra uma comparação entre o uso de MIPv6 e NEMO num ambiente móvel. Com MIPv6, todos os dispositivos mantêm ligação à Internet e todos têm de executar o protocolo. Com o NEMO apenas um dispositivo, o *router* móvel, mantém conectividade à Internet. Os restantes dispositivos não necessitam de ter suporte de mobilidade, acedendo à Internet através do *router* móvel.

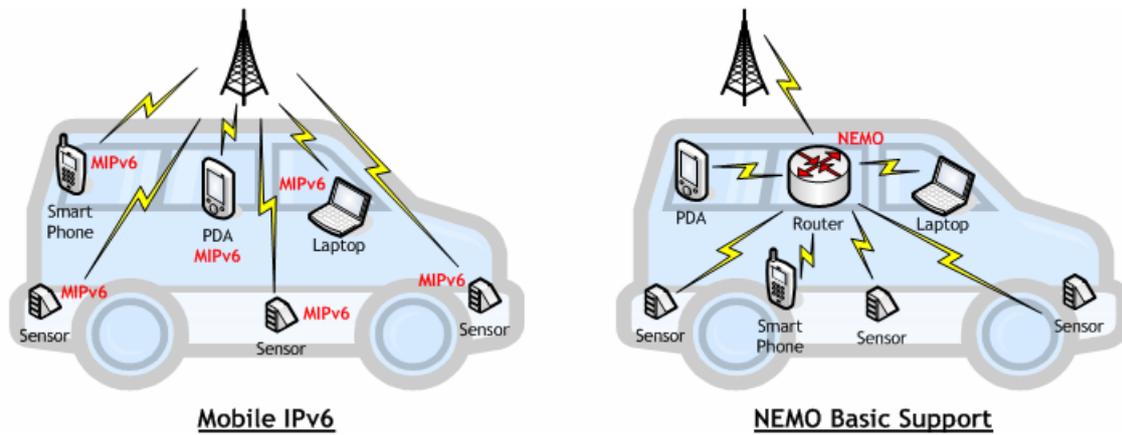


Figura 3.1 – Comparação entre o uso de MIPv6 e NEMO num ambiente móvel.

3.1. Introdução

Com o NEMO, a funcionalidade de mobilidade dos nós IPv6 é transposta para um *router* móvel, que trata da mobilidade de toda a rede. O *router* móvel é capaz de alterar o seu ponto de ligação à Internet de forma transparente para os dispositivos ligados a si, fornecendo-lhes assim conectividade ininterrupta à Internet independentemente da sua localização. [2] Desta forma, os nós da rede móvel beneficiam transparentemente deste suporte e mantêm os seus endereços e ligações à medida que toda a rede se move.

A definição de *router* móvel estende a de nó móvel do MIPv6, adicionando-lhe capacidades de encaminhamento (*routing*) entre o seu ponto de ligação à Internet e a rede que se move consigo. As extensões definidas pelo NEMO são retrocompatíveis com as especificações do MIPv6. A título de exemplo, um *home agent* NEMO pode actuar como um *home agent* MIPv6.

A Figura 3.2 apresenta o funcionamento básico do protocolo de gestão de mobilidade de rede NEMO. A solução apresentada na figura utiliza um túnel bidireccional entre o *router* móvel e o seu *home agent*. Este túnel é criado quando o *router* móvel se move e informa o *home agent* do seu ponto de ligação actual. O protocolo de suporte básico de Mobilidade de Rede não descreve nenhuma solução de optimização de rotas entre os nós da rede móvel e os nós correspondentes, pelo que todo o tráfego entre si passa pelo túnel estabelecido entre o *router* móvel e o *home agent*. Este protocolo também não apresenta soluções de *multihoming*.

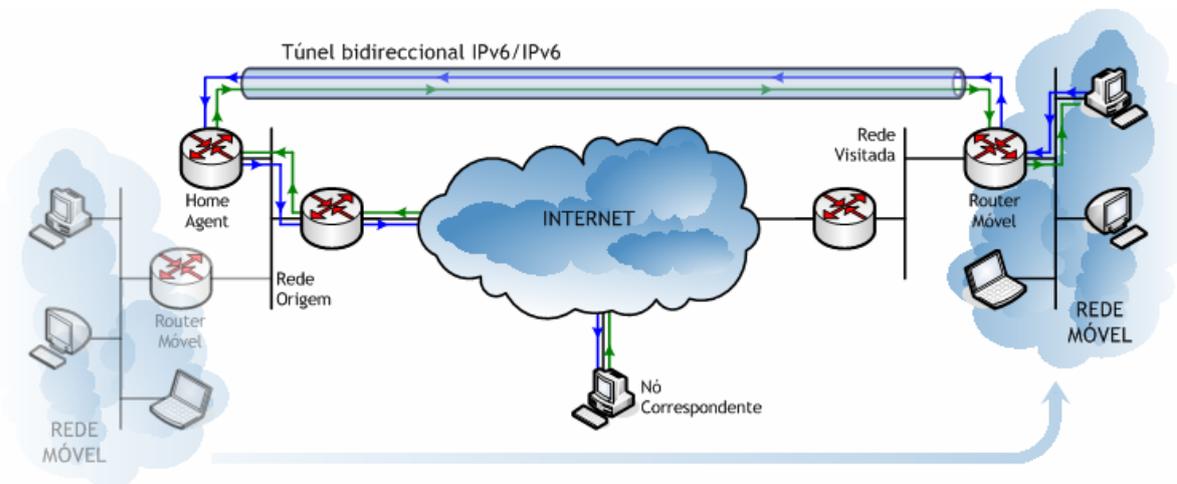


Figura 3.2 – Funcionamento básico do protocolo de gestão de mobilidade de rede NEMO.

No desenvolvimento deste protocolo os objectivos principais do grupo de trabalho foram definir uma solução básica para o problema da mobilidade de rede em redes IPv6, modificando a solução de mobilidade IPv6 existente de forma a se obter uma solução válida e operacional para redes móveis. [15][14] Assim, este protocolo oferece as funcionalidades básicas necessárias para a mobilidade de rede, apesar de não ser muito eficiente, daí ser designado de protocolo de suporte básico. [23] As optimizações necessárias, nomeadamente ao nível da optimização de rotas e *multihoming*, irão sendo procuradas ao longo do tempo, sendo este suporte geralmente designado de suporte estendido.

3.2. Arquitectura e Terminologia

Toda a terminologia associada à Mobilidade de Rede está definida em [27], [28], [30] e [42], destacando-se, no entanto, alguns termos e conceitos mais importantes associados à arquitectura do NEMO.

Uma rede móvel (*Mobile Network – NEMO*) é composta por uma ou mais subredes IP e é vista como um todo. É uma rede (ou subrede) que se pode mover e ligar a diferentes pontos da infraestrutura de encaminhamento. Esta rede liga-se à Internet através de um ou mais *gateways* específicos, os *routers* móveis (*Mobile Routers – MRs*), que gerem o seu movimento. Geralmente, assume-se que a estrutura interna da rede móvel é relativamente estável relativamente ao *router* móvel, ou seja, não existem alterações à topologia, mas não tem que ser assim necessariamente.

Os nós pertencentes à rede móvel, i.e., “protegidos” pelo *router* móvel, são referidos como nós da rede móvel (*Mobile Network Nodes – MNNs*). Estes nós podem ser fixos (*Local Fixed Nodes – LFNs*) ou móveis (*Mobile Nodes – MNs*). Os nós fixos não possuem suporte de mobilidade IPv6 e nem capacidade de alterar seu ponto de ligação enquanto mantêm as sessões em curso. Os nós móveis são nós com suporte de mobilidade IPv6 e com capacidade de se moverem. Estes nós móveis podem ser locais (*Local Mobile Nodes – LMNs*), originários da própria rede móvel, ou visitantes (*Visiting Mobile Nodes – VMNs*), originários de uma outra rede e temporariamente ligados à rede móvel.

Na Figura 3.3 está ilustrada a arquitectura NEMO identificando-se os seus principais componentes.

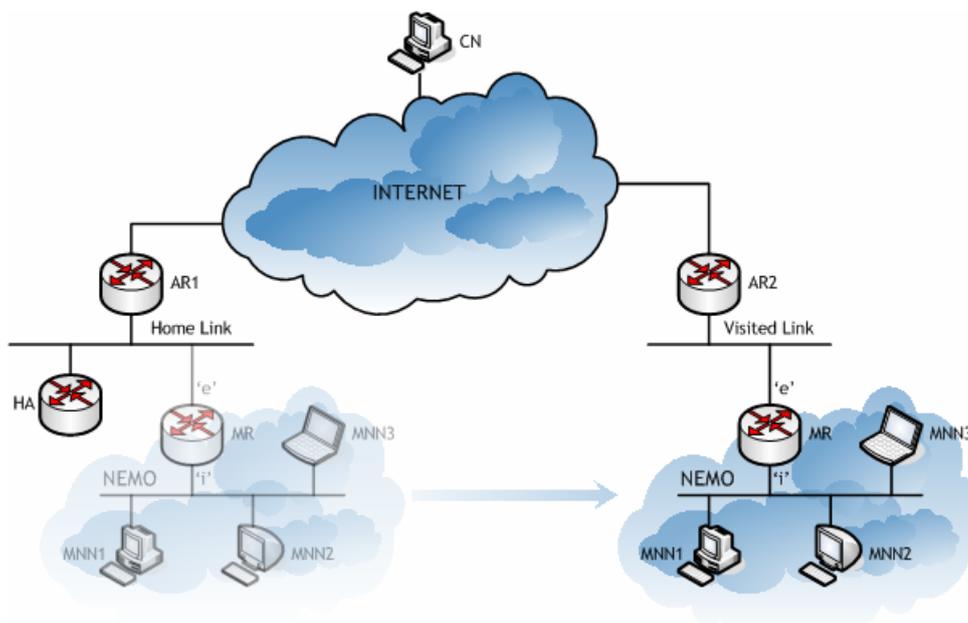


Figura 3.3 – Arquitectura NEMO.

A rede origem (*Home Network*) do *router* móvel, e da respectiva rede móvel, é composta por um *link* origem (*home link*) e pela aplicação do respectivo prefixo anunciado (*Home Prefix*) nesse *link*. À semelhança do que acontece no MIPv6, o endereço permanente do *router* móvel, i.e., o endereço origem (*Home Address – HoA*), é derivado do *home prefix* da rede origem. Quando a rede móvel se move liga-se à Internet através de uma rede visitada (*Visited Network*), ou *link* (*Visited Link*), na qual obtém um endereço derivado do prefixo anunciado nessa rede (*Care-of Address – CoA*); este endereço reflecte a localização actual da rede móvel na topologia de encaminhamento. O *router* móvel também anuncia um ou mais prefixos para a rede móvel a si

ligada (*Mobile Network Prefixes* – MNPs). Os nós da rede móvel obtêm os seus endereços a partir deste(s) prefixo(s) anunciado(s).

Os *routers* através dos quais o *router* móvel tem acesso à Internet, ou seja, através dos quais se liga ao resto da infra-estrutura de encaminhamento, são genericamente designados de *routers* de acesso (*Access Routers* – ARs). Estes são os *routers* que contêm os *links* de origem e visitados.

O *router* móvel tem no mínimo uma interface de entrada (ingresso), identificada na figura como ‘i’, através da qual se liga à rede móvel, e uma interface de saída (egresso), identificada na figura como ‘e’, através da qual se liga à Internet (através da rede origem ou de uma qualquer rede visitada). O encaminhamento de tráfego entre a rede móvel e o resto da Internet é feito pelo *router* móvel entre a(s) interface(s) de entrada e a(s) interface(s) de saída.

Um nó correspondente (*Correspondent Node* – CN) é um qualquer nó da Internet que comunica com um ou mais MNNs (ou mesmo com o MR). Um nó correspondente pode estar localizado numa rede fixa ou numa rede móvel, podendo também ele próprio ser fixo ou móvel.

De notar que o termo NEMO significa mobilidade de rede (“*NETwork MOBility*”), referindo-se neste caso ao conceito, mas também rede móvel (“*a NETwork that is MOBILE*”, i.e., “*a mobile network*”), referindo neste caso ao “objecto” que é a rede móvel.

3.3. Tipos e Formatos de Mensagens

Para suportar os novos mecanismos e operações do protocolo NEMO, algumas das mensagens definidas pelo MIPv6 viram o seu formato alterado. Como se verá, em todos os casos as alterações passam pela inclusão de uma nova *flag* R, a *Mobile Router Flag*, no espaço reservado das respectivas mensagens.

Para além das alterações ao formato de algumas mensagens, foi também criada uma nova opção de mobilidade para transportar o(s) *Mobile Network Prefix(es)* de uma rede móvel aquando do registo do *router* móvel no *home agent*.

O formato original das diversas mensagens, assim como a descrição dos seus campos, poderá ser visto em [28].

3.3.1. Binding Update

A mensagem *Binding Update* (BU), utilizada por um *router* móvel para registar o seu CoA no seu *home agent*, indicando-lhe a sua nova localização, inclui uma nova *flag* R para indicar ao *home agent* que a mensagem vem de um *router* móvel e não se um mero nó móvel.

A Figura 3.4 apresenta o formato da mensagem *Binding Update* com a nova *flag* R.

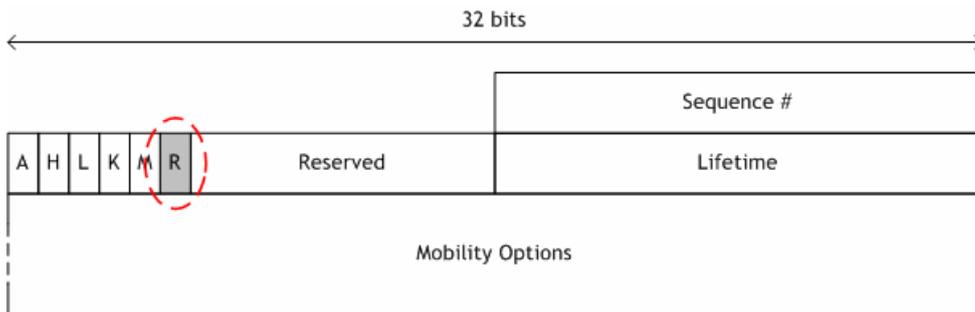


Figura 3.4 – Formato da mensagem *Binding Update* com a nova *flag* R.

3.3.2. Binding Acknowledgement

A mensagem *Binding Acknowledgement* (BAck), utilizada pelo *home agent* de um *router* móvel para confirmar a recepção de um *Binding Update*, inclui uma nova *flag* R para indicar que o *home agent* que processou o *Binding Update* correspondente suporta *routers* móveis. Esta *flag* só será colocada a “1” se o *Binding Update* respectivo também possuir a *flag* R a “1”.

A Figura 3.5 apresenta o formato da mensagem *Binding Acknowledgement* com a nova *flag* R.

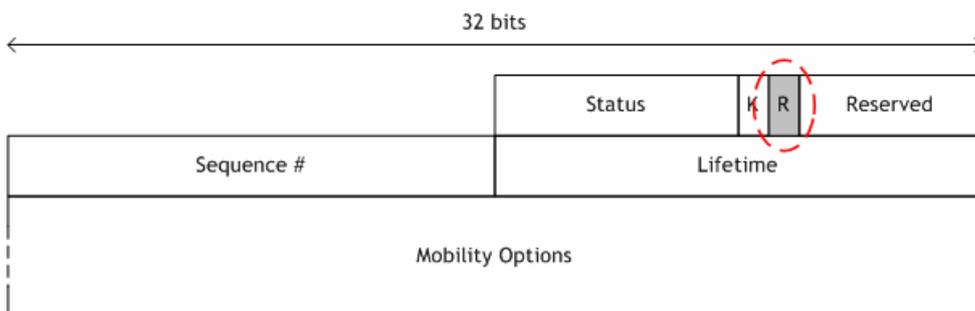


Figura 3.5 – Formato da mensagem *Binding Acknowledgement* com a nova *flag* R.

Para os mecanismos específicos do protocolo NEMO também foram criados quatro novos valores de estado para utilizar com a mensagem *Binding Acknowledgement*. Os novos valores

são: 140 (*Mobile Router Operation not permitted*), 141 (*Invalid Prefix*), 142 (*Not Authorized for Prefix*) e 143 (*Forwarding Setup failed (prefixes missing)*) [30].

3.3.3. Mobile Network Prefix Option

A nova opção de mobilidade *Mobile Network Prefix Option* foi criada para ser incluída nos *Binding Updates*, de forma a indicar ao *home agent* a informação relativa ao prefixo (ou prefixos) da rede móvel. Como a rede móvel pode ter mais que um prefixo, caso o *router* móvel pretenda que o *home agent* encaminhe tráfego para os vários prefixos, podem existir múltiplas *Mobile Network Prefix Options* no mesmo *Binding Update*. O tipo desta opção (campo *Type*) é o 6, o tamanho (campo *Length*) é sempre 18 bytes e o campo *Prefix Length* contém o tamanho do prefixo.

A Figura 3.6 apresenta o formato da nova opção de mobilidade *Mobile Network Prefix Option*.

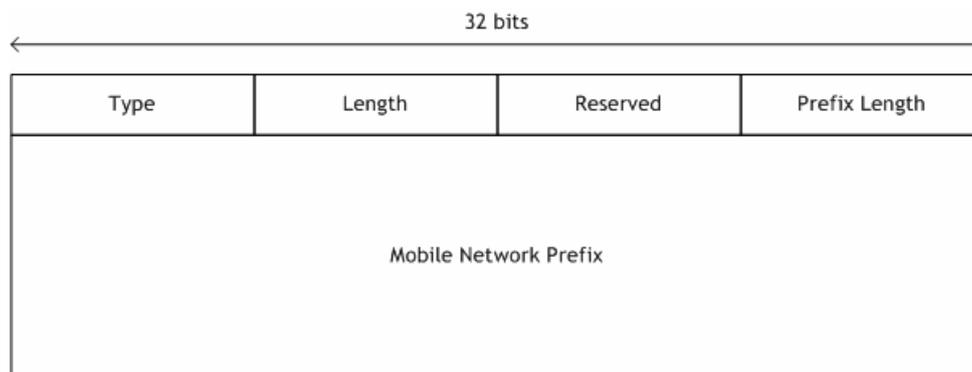


Figura 3.6 – Formato da nova opção de mobilidade *Mobile Network Prefix Option*.

3.3.4. Dynamic Home Agent Address Discovery Request

O mecanismo de *Dynamic Home Agent Address Discovery* (DHAAD) permite a um *router* móvel descobrir dinamicamente o endereço IP dos *home agents* disponíveis no seu *home link*, mesmo quando se encontra num *link* visitado. Para que o *router* móvel só se tente registar em *home agents* que suportem *routers* móveis, o NEMO estendeu aquele mecanismo alterando o formato das suas mensagens.

A mensagem *DHAAD Request*, utilizada pelo *router* móvel para iniciar o mecanismo de DHAAD, inclui uma nova *flag* R que, quando colocada a “1”, indica que o *router* móvel apenas pretende descobrir *home agents* que suportem *routers* móveis.

A Figura 3.7 apresenta o formato da mensagem *DHAAD Request* com a nova *flag R*.

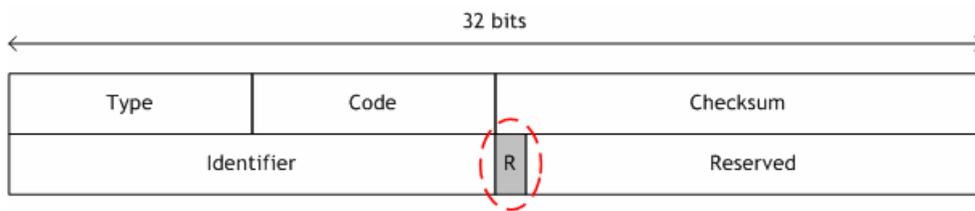


Figura 3.7 – Formato da mensagem *DHAAD Request* com a nova *flag R*.

O mecanismo de DHAAD está descrito em [28].

3.3.5. Dynamic Home Agent Address Discovery Reply

A mensagem *DHAAD Reply*, utilizada por um *home agent* para responder a um *DHAAD Request* de um *router* móvel com uma lista dos *home agents* disponíveis no *home link*, inclui uma nova *flag R* para indicar que os *home agents* listados suportam *routers* móveis, sendo nesse caso colocada a “1”. Se nenhum dos *home agents* disponíveis suportar *routers* móveis, o *home agent* poderá responder ao *router* móvel com essa lista, mas nesse com a *flag R* colocada a “0”.

A Figura 3.8 apresenta o formato da mensagem *DHAAD Reply* com a nova *flag R*.

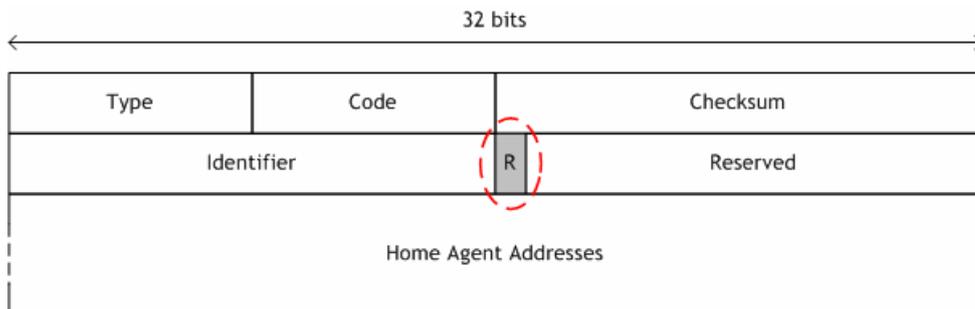


Figura 3.8 – Formato da mensagem *DHAAD Reply* com a nova *flag R*.

3.3.6. Home Agent Information Option

A *Home Agent Information Option* é uma opção enviada pelos *home agents* nos seus *Routers Advertisements* para informar que são *routers* que funcionam como *home agents*. Esta opção inclui também uma nova *flag R* para informar que o *home agent* que enviou o *Router Advertisement* que a contém suporta *routers* móveis, sendo neste caso colocada a “1”.

A Figura 3.9 apresenta o formato da opção *Home Agent Information Option* com a nova *flag R*.

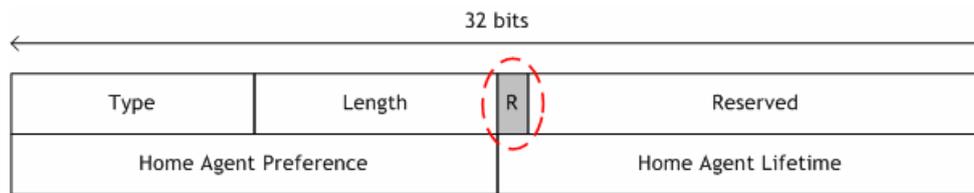


Figura 3.9 – Formato da opção *Home Agent Information Option* com a nova *flag R*.

3.4. Funcionamento

O NEMO é uma extensão do MIPv6, pelo que o seu funcionamento deriva directamente do funcionamento do MIPv6. A gestão da mobilidade de rede por este protocolo é feita através da inclusão de novos mecanismos e operações no funcionamento do protocolo, tais como a gestão de prefixos de redes móveis pelos *home agents* e o encaminhamento de tráfego de e para essas redes por parte dos *routers* móveis e *home agents*.

Nesta secção é dada uma visão geral do funcionamento do protocolo, apresentam-se os dois modos de funcionamento existentes e destacam-se algumas das principais características do funcionamento dos *routers* móveis e *home agents* com o NEMO, conforme descrito no RFC 3963 [30].

3.4.1. Visão Geral

Nas figuras seguintes, Figura 3.10 e Figura 3.11, pode observar-se o funcionamento do protocolo NEMO, nomeadamente a sequência de acontecimentos desde o movimento da rede móvel até à comunicação entre um nó da rede móvel e um nó correspondente.

Um *router* móvel possui um único *home address* através do qual é atingível quando está registado no seu *home agent*. O *home address* é configurado a partir de um prefixo anunciado no *link* origem da rede móvel (ver Figura 3.10 → 0). Contudo, caso exista mais de um prefixo anunciado no *home link*, o *router* móvel pode possuir mais de um *home address*. Como já se viu, o *router* móvel também anuncia um ou mais prefixos para a rede móvel, a partir dos quais os nós da rede móvel configuram os seus endereços.

Quando o *router* móvel se move para fora do *link* origem, e se liga a um novo *router* de acesso (ver Figura 3.10 → 1), adquire um *care-of address* a partir do prefixo do *link* visitado (ver Figura

3.10 → 2). Assim que o *router* móvel adquire o *care-of address*, envia um *Binding Update* para o seu *home agent* anunciando a sua nova localização e o *care-of address* associado (ver Figura 3.10 → 3). Este mecanismo é descrito pelo *Mobile IPv6* [28]. Quando o *home agent* recebe o *Binding Update* do *router* móvel cria uma entrada na sua *cache* de registos associando o *home address* do *router* móvel ao *care-of address* da sua localização actual (ver Figura 3.10 → 4).

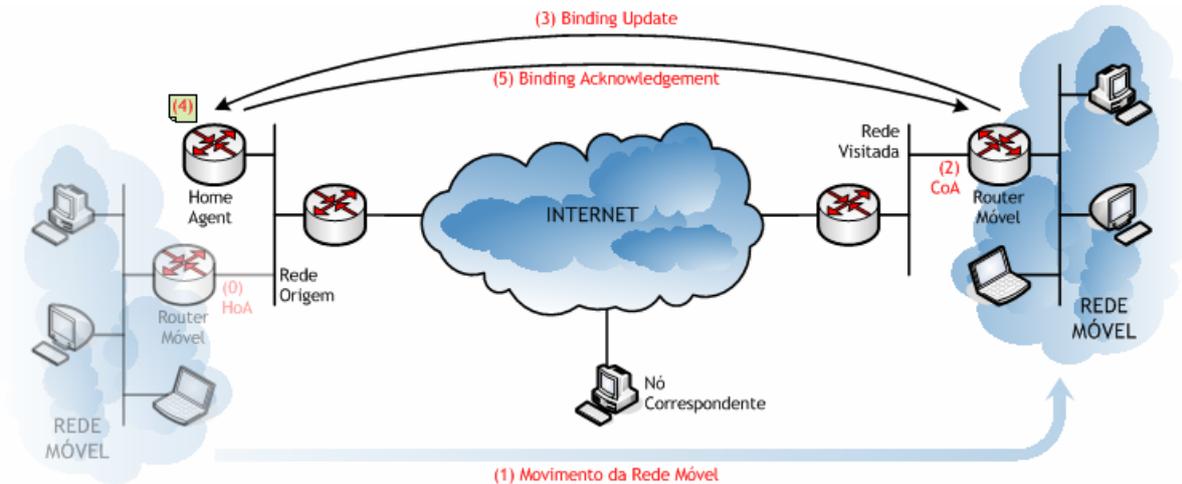


Figura 3.10 – Funcionamento do protocolo NEMO (sequência de acontecimentos).

O *router* móvel pode actuar como nó (ou *host*) móvel, conforme definido pelo RFC 3775 [28], ou como *router* móvel. Se pretender actuar como *router* móvel e fornecer conectividade aos nós da rede móvel, deve indicá-lo colocando a *flag R* do *Binding Update* a “1”. Consoante o modo de operação do NEMO (ver Subsecção 3.4.2), o *router* móvel poderá também incluir no *Binding Update* informação acerca do prefixo da rede móvel (ou prefixos, caso a rede móvel possua mais do que um), utilizando a *Mobile Network Prefix Option* (ver Subsecção 3.3.3), de forma a que o *home agent* possa encaminhar o tráfego destinado aos nós da rede móvel para o *router* móvel. Este encaminhamento é feito para o *care-of address* do *router* móvel. Em alguns cenários, como por exemplo, cenários em que é utilizado encaminhamento estático ou em que são usados protocolos de encaminhamento dinâmico (ver Secção 3.5), o *home agent* já sabe quais os prefixos que pertencem ao *router* móvel, logo o *router* móvel não necessita de incluir informação acerca desses prefixos no *Binding Update*. Nestas situações o *home agent* activa o encaminhamento para todos os prefixos geridos pelo *router* móvel quando recebe um *Binding Update* com a *Mobile Router Flag (R)* a “1”.

O *home agent* confirma a recepção do *Binding Update* do *router* móvel através do envio de um *Binding Acknowledgement* (ver Figura 3.10 → 5). Uma confirmação positiva com a *Mobile Router Flag (R)* a “1” significa que o *home agent* activou o encaminhamento para a rede móvel.

Assim que o processo de registo (*binding*) termina, é estabelecido um túnel bidireccional entre o *home agent* e o *router* móvel (ver Figura 3.11 → 6). Os extremos deste túnel são o *care-of address* do *router* móvel e o endereço do *home agent*. Quando o *router* móvel recebe um pacote proveniente da rede móvel, i.e., cujo endereço de origem pertence à rede móvel, destinado a um nó correspondente, envia-o pelo túnel para o *home agent*, encapsulando-o num outro pacote IPv6 (ver Figura 3.11 → 7). O *home agent* desencapsula o pacote e encaminha-o para o nó correspondente. Para tráfego originado por si próprio, o *router* móvel pode utilizar, como definido pelo MIPv6, *reverse tunneling* ou otimização de rotas.

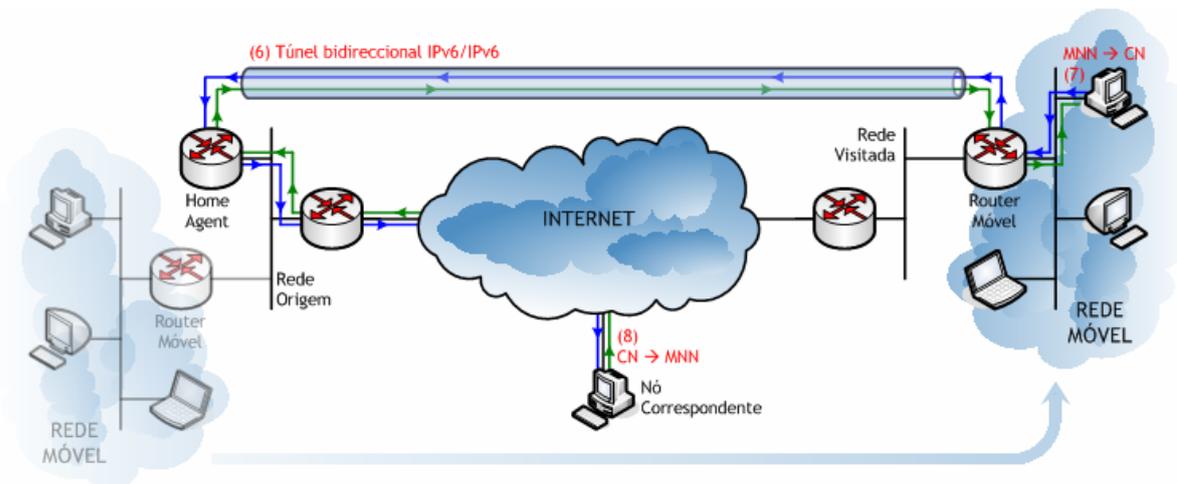


Figura 3.11 – Funcionamento do protocolo NEMO (sequência de acontecimentos, cont.).

Quando o nó correspondente envia um pacote para um nó da rede móvel, o pacote é encaminhado para o *home agent* com o qual o *router* móvel está registado (ver Figura 3.11 → 8). O *home agent* recebe o tráfego destinado à rede móvel porque anuncia rotas para o prefixo da rede móvel ou porque o prefixo do *router* móvel é agregado no *home agent*, que anuncia a agregação resultante. Quando o *home agent* recebe um pacote destinado a um nó da rede móvel envia-o por túnel para o *care-of address* actual do *router* móvel. O *router* móvel desencapsula o pacote e encaminha-o para a rede móvel através da interface a que esta está ligada. Por motivos de segurança, antes de desencapsular o pacote, o *router* móvel verifica se o endereço de origem do pacote IPv6 exterior é o endereço do *home agent*. Antes de encaminhar o pacote, o *router* móvel também verifica se o endereço de destino do pacote interior, enviado pelo túnel, pertence a um prefixo usado pela rede móvel.

3.4.2. Modos de Operação

Se o *router* móvel e o *home agent* não executarem nenhum protocolo de encaminhamento dinâmico entre si, o *router* móvel deverá utilizar um dos modos implícito ou explícito para indicar ao *home agent* que prefixos pertencem ao *router* móvel e à rede móvel. Em ambos os modos o *router* móvel tem de colocar a *flag R* dos *Binding Updates* a “1”.

Modo Implícito:

Neste modo o *router* móvel não inclui no *Binding Update* informação dos prefixos pertencentes à rede móvel, não incluindo assim nenhuma *Mobile Network Prefix Option*. O *home agent* poderá utilizar qualquer mecanismo para determinar o prefixo (ou prefixos) da rede móvel pelo qual o *router* móvel é responsável, de forma a activar o encaminhamento para a rede móvel (por exemplo, usando configuração manual associando o *home address* do *router* móvel ao(s) prefixo(s) da rede móvel, ou seja, usando encaminhamento estático).

Modo Explícito:

Neste modo o *router* móvel inclui uma ou mais *Mobile Network Prefix Options* no *Binding Update* com informação acerca do(s) prefixo(s) configurado(s) na rede móvel, para os quais o *router* móvel pretende que o *home agent* active o encaminhamento.

3.4.3. Router Móvel

Um nó móvel, como definido pelo MIPv6, pode actuar de duas maneiras:

- Como *host* móvel, caso em que o *home agent* não mantém informação acerca dos prefixos relacionados com o *home address* do *host* móvel;
- Como *router* móvel, caso em que, além de manter um registo relacionando o *home address* do *router* móvel ao seu *care-of address*, o *home agent* mantém informação de encaminhamento relacionada com os prefixos usados pela rede móvel.

A diferença entre os dois modos é representada pelo valor da nova *flag R* (*Mobile Router Flag*) usada nas mensagens trocadas (ver Secção 3.3).

O *router* móvel recebe *Binding Acknowledgements* do *home agent* correspondendo aos *Binding Updates* que envia. Quando recebe um *Binding Acknowledgement* com o valor de estado igual a

“0” e a *flag R* a “1”, o *router* móvel assume que o *home agent* processou com sucesso o seu registo e activou o encaminhamento para a rede móvel, e configura o seu extremo do túnel bidireccional. A partir desse momento pode começar a utilizar o túnel bidireccional para enviar o tráfego da rede móvel. Se a *flag R* do *Binding Acknowledgement* não vier a “1” o *router* móvel assume que o *home agent* não suporta *routers* móveis e executa o mecanismo de *Dynamic Home Agent Address Discovery* (DHAAD) para descobrir *home agents* que o suportem. Antes de se registar com um *home agent* que o suporte, o *router* móvel tem de anular o seu registo com o *home agent* anterior.

Quando o *router* móvel se encontra na sua rede origem pode estar configurado para enviar *Router Advertisements* e responder a *Router Solicitations* pela interface ligada ao *link* origem. Contudo, o valor do campo *Router Lifetime* deverá ser colocado a “0” para evitar que outros nós configurem este *router* como *default router*. No entanto, um *router* móvel não deve enviar *Router Advertisements* não solicitados nem responder a *Router Solicitations* por nenhuma interface de saída, quando essa interface está ligada a um *link* visitado. Por outro lado, o *router* móvel deverá responder, com *Neighbor Advertisements*, a *Neighbor Solicitations* recebidos na interface de saída, para endereços válidos naquele *link*.

Conforme especificado pelo IPv6 [25], tipicamente os *routers* ignoram *Router Advertisements* enviados por outros *routers* num *link*. O NEMO altera este comportamento e especifica que um *router* móvel não deve ignorar os *Router Advertisements* recebidos na interface de saída, pois esses poderão ser usados pelo *router* móvel para configurar o seu endereço na rede visitada (*care-of address*), configurar o *default router*, ou mesmo para efectuar detecção de movimento.

Quando o *router* móvel detecta que regressou à rede origem deve desvincular-se, i.e., anular o registo, com o seu *home agent* e executar o procedimento de regresso à rede origem definido para os nós móveis pelo MIPv6 [28]. O *router* móvel pode então voltar a enviar *Router Advertisements* através da sua interface de saída como anteriormente. Para anular o seu registo o *router* móvel deve enviar um *Binding Update* com o valor do campo *Lifetime* igual a “0” ou com o *care-of address* igual ao *home address*, conforme se verá no Capítulo 6.

3.4.4. Home Agent

Para a mobilidade de rede funcionar como esperado, o *home agent* deve implementar o protocolo NEMO e satisfazer as especificações definidas pelo MIPv6 [28]. O *home agent* deve também implementar ambos os modos de operação implícito e explícito apresentados.

A partir do momento em que o *router* móvel se regista com o *home agent*, o *home agent* mantém informação acerca dos prefixos da rede móvel pelos quais é o *router* móvel responsável.

O *home agent* protege o *home address* do *router* móvel, enquanto este se encontra na rede visitada, através de *Proxy Neighbor Discovery*, enviando mensagens *Neighbor Advertisement* em nome do *router* móvel. Todos os campos da mensagem *Proxy Neighbor Advertisement* devem ser preenchidos da mesma forma que seriam se fosse o *router* móvel a enviar o *Neighbor Advertisement* enquanto na rede origem. A única excepção é que a *flag R (Router)* do *Neighbor Advertisement* deve ser colocada a “1” caso a *flag R* do *Binding Update* também esteja a “1”.

Quando o *home agent* processa com sucesso o *Binding Update* de anulação do registo do *router* móvel, elimina a informação do *router* móvel dos seus registos e deixa de proteger o *home address* daquele através do *Proxy Neighbor Discovery*. Além do mais, o *home agent* remove o túnel bidireccional entre si e o *router* móvel e deixa de encaminhar pacotes para a rede móvel.

3.5. Utilização de Protocolos de Encaminhamento

O *router* móvel e o *home agent* podem correr um protocolo de encaminhamento dinâmico, como o RIPng ou o OSPFv3, entre si através do túnel bidireccional. Neste caso, o *router* móvel não deve incluir informação acerca do(s) prefixo(s) da rede móvel no *Binding Update*. Em vez disso, o *home agent* utiliza a informação disponibilizada pelo protocolo de encaminhamento para activar o encaminhamento para a rede móvel.

Quando o protocolo de encaminhamento está a correr e quando o *router* móvel está ligado ao *link* origem, o *router* móvel envia as actualizações de encaminhamento através da sua interface de saída. Quando o *router* móvel se move e se liga a um *link* visitado, o túnel bidireccional deve ser tratado como uma interface túnel, sendo esta interface incluída na lista de interfaces nas quais o protocolo de encaminhamento está activo. As actualizações de encaminhamento são então enviadas por esta interface para o *home agent*. O *router* móvel deve estar configurado para não enviar mensagens do protocolo de encaminhamento pela sua interface de saída quando não se encontra no *link* origem, i.e., quando se encontra num *link* visitado.

A utilização de um protocolo de encaminhamento dinâmico é muito útil quando a rede móvel é grande e possui múltiplas subredes, contendo diferentes prefixos IPv6. Desta forma as alterações de encaminhamento da rede móvel são rapidamente propagadas para o *home agent*, assim como as alterações de encaminhamento da rede origem o são para o *router* móvel.

3.6. Considerações de Segurança

A segurança é um aspecto crítico da mobilidade de rede. As rede móveis viajam para redes estranhas, e possivelmente não confiáveis, quando fora da rede origem. Como os nós da rede móvel não estão conscientes da mobilidade da rede, é importante que o NEMO forneça mecanismos de segurança quando a rede está em movimento. Este protocolo fornece aos nós da rede móvel privacidade ao nível da sua localização pois, devido ao uso do túnel, a localização actual da rede não é revelada aos nós correspondentes.

Para assegurar que os nós da rede móvel não usam o túnel para lançar ataques de *IP spoofing* o *router* móvel deve realizar *ingress filtering* ao tráfego recebido da rede móvel. Em particular, o *router* móvel deve verificar se o endereço origem dos pacotes que recebe dos nós da rede móvel deriva realmente ao prefixo (ou prefixos) delegado à rede móvel, e que não é um endereço usado por si.

Por sua vez, o *home agent* deve verificar que os pacotes recebidos pelo túnel bidireccional pertencem à rede móvel. Esta verificação é necessária para evitar que os nós da rede móvel usem o *home agent* para lançar ataques que de outra forma poderiam ser evitados através de *ingress filtering*. O endereço origem do cabeçalho IPv6 exterior tem de ser o *care-of address* do *router* móvel, e o endereço origem do cabeçalho IPv6 interior tem de pertencer ao(s) prefixo(s) usado(s) na rede móvel.

Se o *router* móvel envia um *Binding Update* com uma ou mais *Mobile Network Prefix Options*, antes de activar o encaminhamento para os prefixos indicados, o *home agent* deve verificar se o *router* móvel está autorizado para esses prefixos.

A segurança do NEMO aumenta significativamente através do uso de IPsec. O IPsec permite a autenticação das mensagens de sinalização trocadas entre o *home agent* e o *router* móvel, assim como a cifragem do tráfego trocado pelo túnel estabelecido. A protecção dos dados do túnel é útil de forma a proteger as comunicações contra atacantes no caminho do túnel.

3.7. Nested Mobility

A *nested mobility* ocorre quando existe mais de um nível de mobilidade, i.e., quando uma rede móvel serve de rede de acesso e permite que nós móveis visitantes (ou mesmo redes) se liguem a si. Existem dois casos de *nested mobility*:

- O nó que se liga à rede móvel é um VMN (*Visiting Mobile Node*) (e.g., um passageiro de um autocarro com um computador portátil que se liga à rede de acesso do autocarro);
- O nó que se liga à rede móvel é um *router* móvel que serve ele próprio uma rede móvel (e.g., um passageiro de um autocarro que transporta uma PAN e se liga à rede de acesso do autocarro).

A Figura 3.12 ilustra uma situação de um nível de *nested mobility* de forma a se melhor entender o conceito.

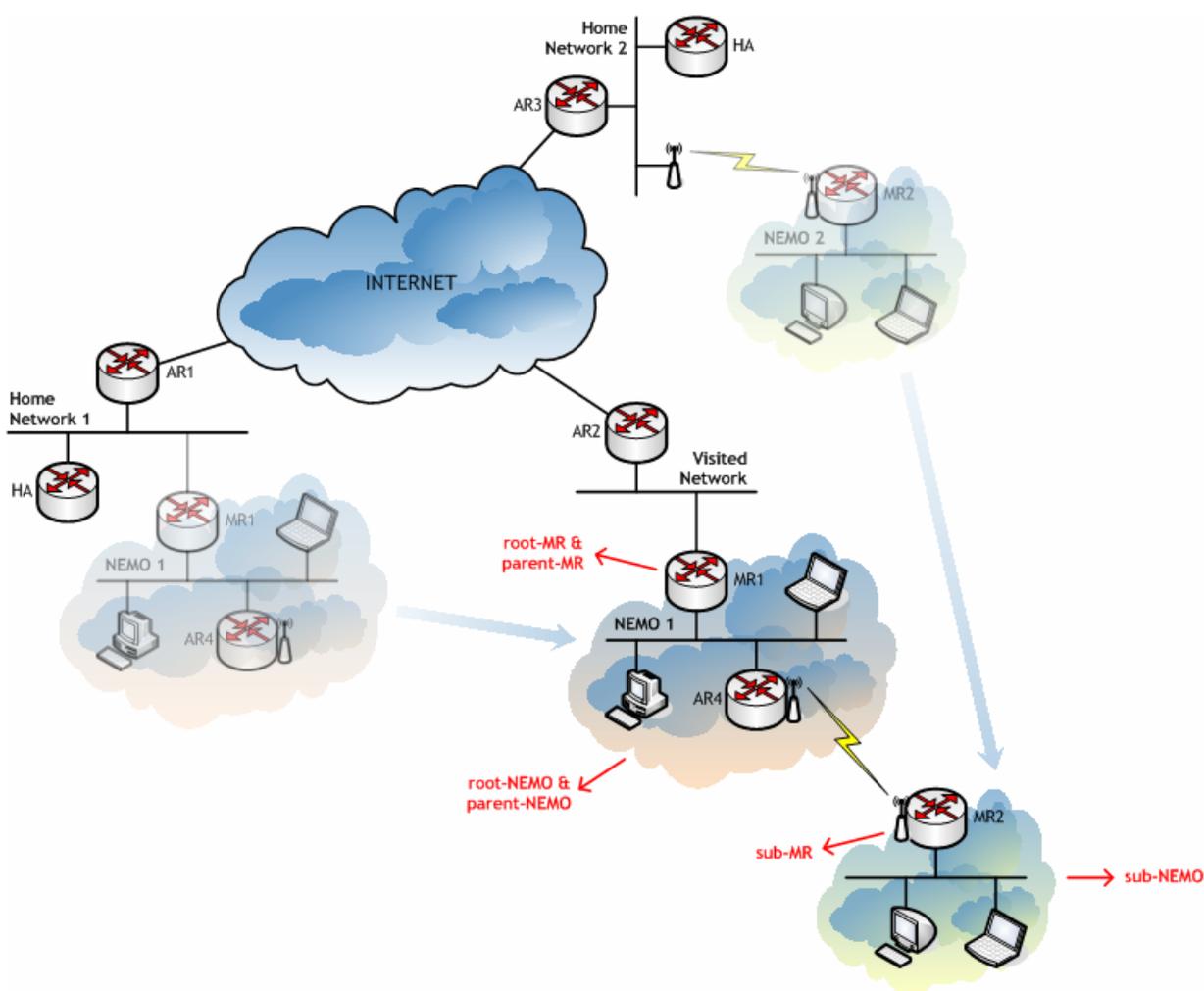


Figura 3.12 – Situação de um nível de *nested mobility*.

Uma rede móvel (*sub-NEMO*) diz-se *nested* quando está ligada a uma rede móvel maior (*parent-NEMO*). A hierarquia agregada de redes móveis torna-se numa única rede móvel *nested*. A rede móvel do topo da hierarquia que liga todas as redes móveis inferiores à Internet é a *root-NEMO*. A *sub-NEMO*, *parent-NEMO* e *root-NEMO* são servidas, respectivamente, pelo *sub-MR*, *parent-MR* e *root-MR*.

O protocolo NEMO não especifica o número de níveis de *nested mobility* que podem existir, podendo haver inúmeros níveis. A única implicação de tais cenários é o *overhead* inerente ao encapsulamento, pois cada nível deste tipo de mobilidade introduz mais um cabeçalho IPv6. O funcionamento do *router* móvel permanece o mesmo independentemente se aquele se liga a outro *router* móvel ou a um *router* de acesso de uma rede fixa.

3.8. Limitações

A característica mais atractiva do *NEMO Basic Support Protocol* é a sua simplicidade, pois é uma extensão lógica do MIPv6, tanto ao nível dos *routers* móveis como dos *home agents*. [17] Contudo, existem algumas limitações à implementação prática da mobilidade de rede, nomeadamente limitações associadas a encaminhamento sub-ótimo, optimização de rotas, problemas de desempenho, delegação de prefixos, problemas de *multihoming* e segurança, entre outras.

3.8.1. Encaminhamento Sub-ótimo e Optimização de Rotas

A solução básica de mobilidade de rede NEMO força a que, quando a rede móvel não se encontra na rede origem, todo o tráfego destinado aos seus nós passe pelo *home agent* e seja por este encaminhado para o *router* móvel, através do túnel estabelecido entre si. O caminho inverso é seguido pelos pacotes enviados pelos nós da rede móvel para os nós correspondentes. Este fenómeno, conhecido como encaminhamento triangular (*triangular routing*), resulta em alguma ineficiência, tanto em termos de atraso como de taxas de transmissão, o que pode ser inaceitável em algumas aplicações. [15]

Estes problemas de desempenho tornam-se mais graves quando a rede móvel é *nested*, porque o tráfego passa através de todos os *home agents* envolvidos (um por rede móvel atravessada). Este problema é conhecido como *pinball routing* e é ilustrado na Figura 3.13. Cada pacote trocado

entre um nó da rede móvel e um nó correspondente possui tantos cabeçalhos adicionais quanto o número de redes móveis que tem de atravessar, o que pode gerar um grande *overhead*. [16]

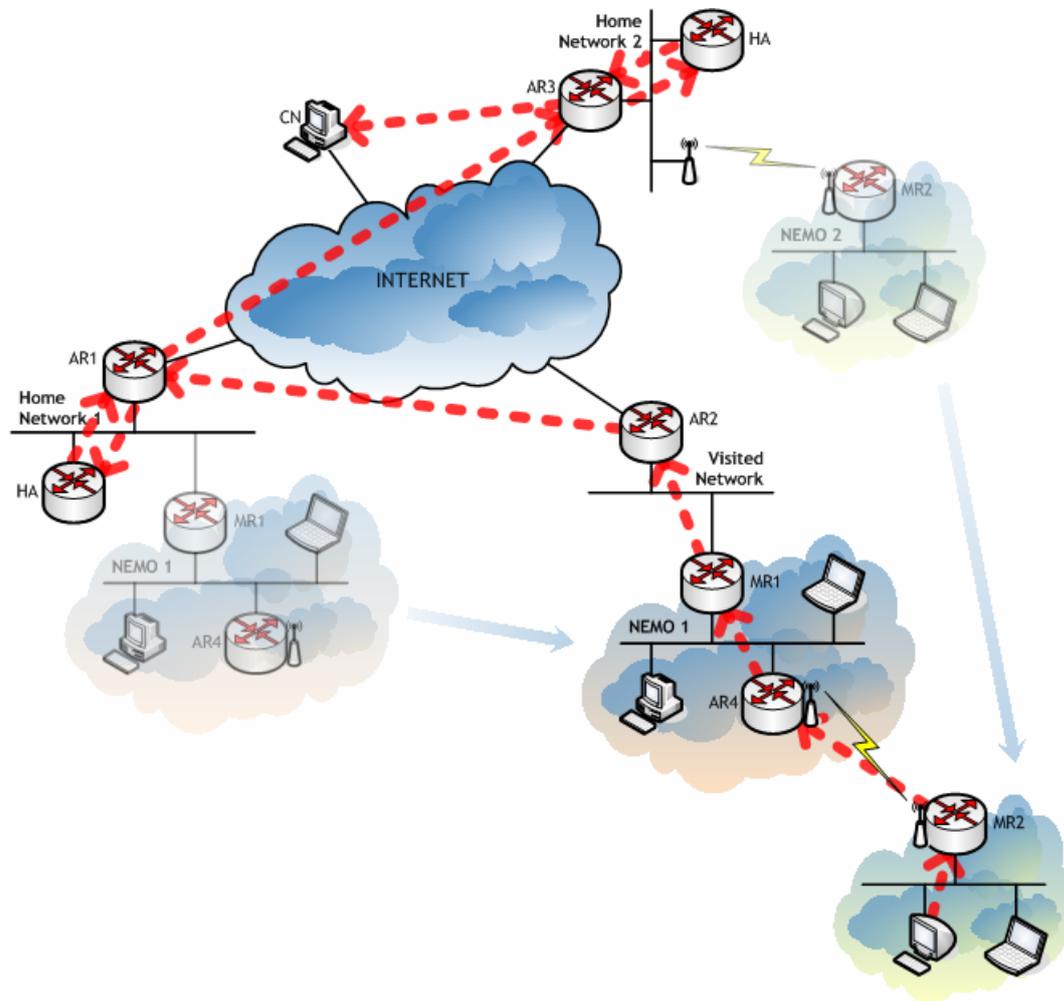


Figura 3.13 – Encaminhamento de tráfego devido a um nível de *nested mobility*.

Nestes cenários de *nested mobility* poderão existir nós pertencentes a diferentes redes móveis que pretendam comunicar entre si. Cada nó tem de comunicar através do seu *home agent*, apesar de a comunicação ser muito mais eficiente se fosse feita directamente entre si. Além do mais, se existir um problema com algum dos *home agents*, a comunicação parará, apesar de a comunicação directa entre os nós ser possível. Um exemplo seria dois passageiros de um comboio, cada um com a sua PAN, pretenderem comunicar entre si, tendo de o fazer através dos seus *home agents* algures na Internet.

A optimização de rotas (*Route Optimization – RO*) fornece mecanismos para tentar eliminar a ineficiência do encaminhamento dos pacotes entre o *router* móvel e o *home agent* através do túnel bidireccional. [7] Têm sido propostas diversas soluções de optimização de rotas para a

mobilidade de rede, sendo que o conceito básico é permitir que os *routers* móveis e os nós da rede móvel comuniquem directamente com os nós correspondentes sem que o tráfego tenha de passar pelo *home agent*. A optimização de rotas permite reduzir o atraso da transmissão e o *overhead* dos pacotes, e evita os *bottlenecks* e o congestionamento ao nível dos *home agents*. Detalhes acerca da optimização de rotas no âmbito do NEMO e de possíveis soluções poderão ser consultados em [37] e [38].

3.8.2. Multihoming

Um *host* ou um *router* é *multihomed* quando possui múltiplos endereços por onde escolher. Isto pode acontecer quando existem múltiplos prefixos anunciados no *link* ou *links* ao qual ou quais o *host* ou o *router* está ligado, ou quando o *host* ou o *router* possui múltiplas interfaces por onde escolher, num mesmo *link* ou não. [42] Se uma rede móvel possui mais de um *router* móvel, ou se um *router* móvel possui mais de uma interface de saída, a rede móvel poderá ter mais de um caminho de saída, ou seja, é *multihomed*. [96]

O suporte de *multihoming* é importante num ambiente de rede móvel, pois se o *router* móvel falhar a manutenção de sessões isso afectará a manutenção de sessões de toda a rede móvel. Além disso, o suporte de *multihoming* aumenta as capacidades de balanceamento de carga (*load balancing*) e de tolerância a falhas (*fault tolerance*) da rede móvel. [18] Decisões de encaminhamento feitas com base em políticas também beneficiam do suporte de *multihoming*; por exemplo, seria comercialmente lucrativo fornecer acesso à Internet aos passageiros de um avião de acordo com a classe em que viajam. [17]

Porém, o *multihoming* é um problema difícil de resolver devido aos muitos e complexos casos de *multihoming*. Cada caso possuiu as suas vantagens e desvantagens, mas cada um levanta várias questões: como escolher o melhor caminho?, como recuperar de uma falha de ligação?, entre outras. [7]

Mais detalhes acerca dos diversos tipos de *multihoming* no âmbito da mobilidade de rede, seus problemas e possíveis soluções poderão ser encontrados em [44].

3.8.3. Delegação de Prefixos por DHCPv6

O NEMO não fornece nenhum mecanismo para distribuir dinamicamente prefixos por redes móveis. Contudo, a delegação de prefixos por DHCPv6 (*DHCPv6 Prefix Delegation* –

DHCPv6PD) poderia oferecer esta capacidade ao NEMO. O DHCPv6PD seria iniciado pelo *router* móvel quando estabelece o registo com o *home agent*, e o *home agent* actuaria como um servidor ou um *relay* de DHCP, de forma a responder ao pedido de DHCPv6PD do *router* móvel. Este mecanismo poderia ser incorporado no mecanismo de DHAAD (*Dynamic Home Agent Address Discovery*). [7] Mais detalhes em [39].

3.9. NEMO vs. MANET

Uma MANET (*Mobile Ad-hoc NETwork*) é uma rede sem infra-estrutura física, composta por nós móveis, cuja topologia é altamente dinâmica. Todos os nós de uma MANET funcionam como *routers* móveis, pois todos fornecem conectividade uns aos outros. A mobilidade de redes *ad-hoc* foca-se em manter a conectividade entre os nós móveis, e não no acesso à Internet, sendo, por isso, o encaminhamento entre esses nós móveis o principal desafio. Por esse motivo este tipo de mobilidade não se preocupa com os *handovers* IP entre *routers* de acesso. [22]

Já uma NEMO (*MOBILE NETwork*) é uma rede de nós cuja topologia é relativamente fixa em relação ao *router* móvel. Este tipo de mobilidade de rede foca-se em manter a conectividade entre o *router* móvel e a infra-estrutura IP. Por isso, duas das suas principais preocupações são fornecer acesso ininterrupto à Internet e tratar dos *handovers* entre *routers* de acesso.

Uma NEMO pode ser constituída por MANETs, ou seja, os nós da NEMO podem ser nós de uma MANET (e.g., um comboio é uma NEMO, e os diversos passageiros formam uma MANET). Uma MANET pode ser constituída por várias NEMOs, ou seja, os nós da MANET são *routers* móveis, cada um com uma rede móvel por trás de si (e.g., um carro é um nó de uma MANET, que possui uma NEMO por trás do *router* móvel, ou seja, cada carro é uma NEMO e os diversos carros formam uma MANET). [24] A Figura 3.14 e a Figura 3.15, respectivamente, ilustram os dois tipos de combinações entre os dois tipos de redes.

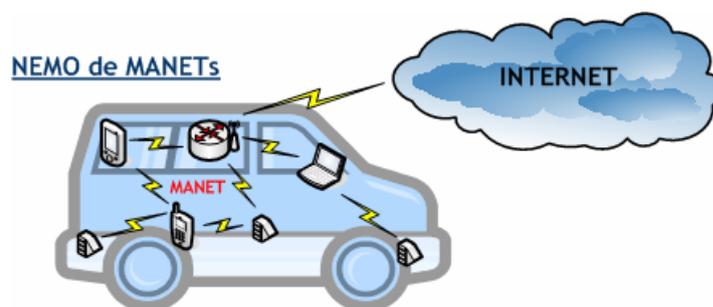


Figura 3.14 – NEMO constituída por MANETs.

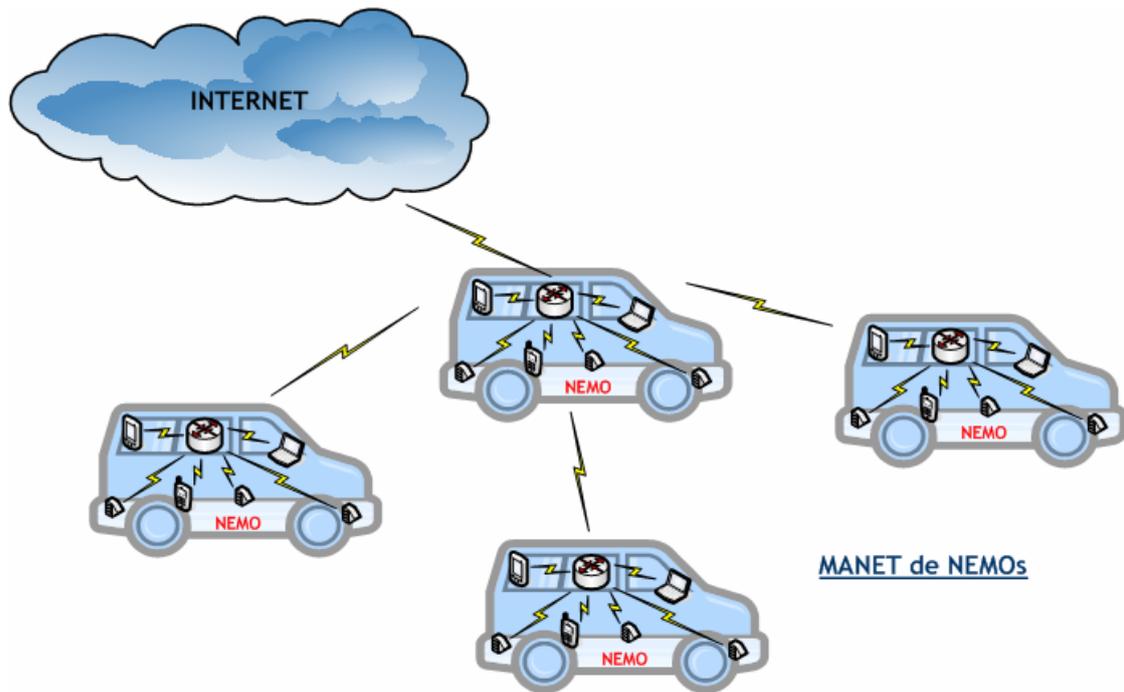


Figura 3.15 – MANET constituída por NEMOs.

Na Figura 3.14 ilustra-se a existência de uma MANET formada por diversos dispositivos num veículo, que por sua vez é uma NEMO, já que existe um *router* móvel que fornece conectividade à Internet a toda a rede. Na Figura 3.15 ilustra-se uma MANET formada por diversas NEMOs existentes em veículos.

4. Estado da Arte

Neste capítulo é apresentado o estado da arte no domínio da Mobilidade de Rede, nomeadamente os últimos avanços do grupo de trabalho NEMO do IETF, na normalização do protocolo com o mesmo nome, através dos seus RFCs e Internet-Drafts.

A especificação NEMO é relativamente recente. Contudo, existe já algum trabalho desenvolvido nesta área. Neste contexto são apresentadas as implementações existentes desta tecnologia e o nível de suporte dos principais sistemas operativos.

Diversas entidades têm contribuído, directa ou indirectamente, no desenvolvimento e promoção deste novo protocolo, pelo que uma referência ao trabalho por elas desenvolvido se revela essencial. Assim, são apresentadas algumas das entidades de referência no âmbito do NEMO e alguns dos projectos e trabalhos desenvolvidos que demonstram bem a capacidade e aplicabilidade do protocolo.

4.1. Normalização

O IETF possui múltiplos grupos de trabalho (*Working Groups* – WGs) [49] responsáveis pelo estudo e normalização de soluções de mobilidade, nomeadamente os grupos MIP4 (*Mobility for IPv4*) [50], MIP6 (*Mobility for IPv6*) [51], NEMO (*Network Mobility*) [54], MIPSHOP (*Mobility for IP: Performance, Signaling and Handoff Optimization*) [52], MONAMI6 (*Mobile Nodes and Multiple Interfaces in IPv6*) [53] e MANET (*Mobile Ad-hoc Networks*) [56].

4.1.1. Grupos de Trabalho do IETF

De entre os grupos mencionados, os que estão relacionados, directa ou indirectamente, com a Mobilidade de Rede em IPv6 são o MIP6, o NEMO, o MONAMI6 e o MANET, sendo que este

último se dedica ao estudo de soluções de encaminhamento IP no âmbito das redes *ad-hoc* móveis, o que foge ao âmbito deste trabalho [56]. O MONAMI6 [53] dedica-se ao estudo dos problemas relacionados com a presença de múltiplos endereços e/ou interfaces nos nós móveis (incluindo *routers*) usando a Mobilidade IPv6 e a Mobilidade de Rede, fugindo esta matéria também ao âmbito deste trabalho. O grupo MIP6 [51] é o responsável pelo estudo e normalização das soluções de mobilidade de nós IPv6, nas quais se baseia a Mobilidade de Rede. Os desenvolvimentos do grupo de trabalho MIP6 foram estudados no projecto “*Testes de Mobilidade IPv6*” [4] (antecessor do projecto sobre o qual se está a escrever) e continuam a sê-lo no projecto “*Mobilidade IPv6 – Estudo das variantes de handover*” [5] (que decorre em paralelo com o projecto objecto deste relatório), pelo que esses desenvolvimentos não vão ser estudados neste trabalho.

Na Figura 4.1 pode ver-se a relação entre diversos grupos de trabalho do IETF, nomeadamente dos relacionados com aspectos de mobilidade.

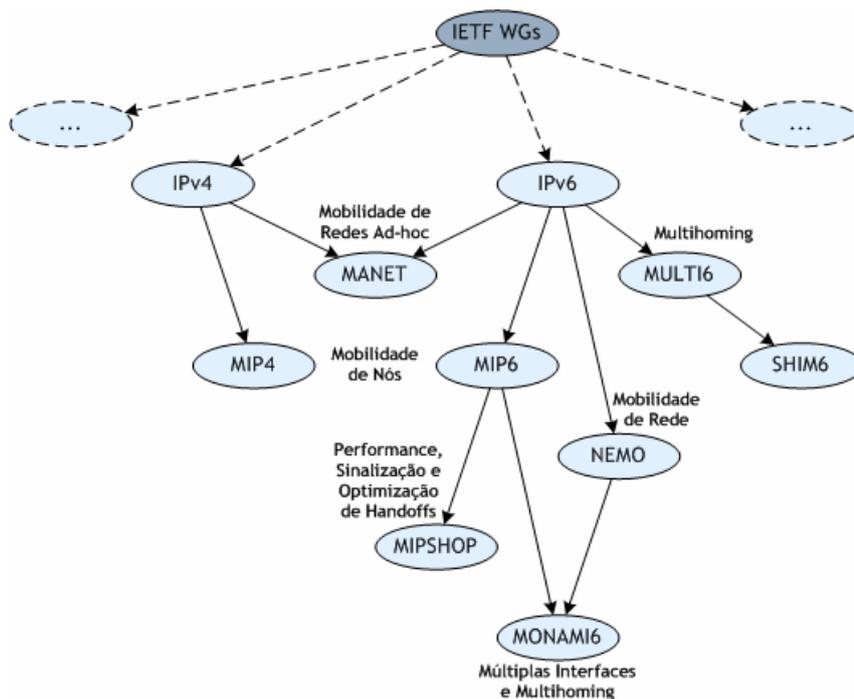


Figura 4.1 – Relação entre diversos grupos de trabalho do IETF (adaptado de [22]).

A Mobilidade de Rede em IPv6 é o objecto de estudo do grupo de trabalho NEMO [54]. Este grupo de trabalho, originalmente denominado MONET (*MOBILE NETWORKS*), foi criado em 2001 com o intuito de estudar e normalizar soluções de mobilidade de redes inteiras ao invés de apenas de um *host*. Desde 2003 este grupo de trabalho já lançou 11 Internet-Drafts (I-Ds), excluindo os inúmeros Drafts, que se contam em várias dezenas, lançados pelos próprios autores.

4.1.2. Request for Comments e Internet-Drafts

Dos 11 Internet-Drafts lançados pelo grupo, apenas um já resultou em RFC, o I-D *draft-ietf-nemo-basic-support*, que resultou no RFC 3963. No entanto, cinco desses Internet-Drafts estão actualmente em lista de espera para publicação em RFC. Dos Drafts lançados, actualmente apenas um está expirado, estando os outros quatro ainda activos e com os trabalhos a decorrer. [55]

O RFC 3963 [30], com o nome *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*, lançado em Janeiro de 2005, especifica o protocolo de suporte básico para a Mobilidade de Rede, protocolo este que permite às redes móveis ligarem-se a diferentes pontos da Internet mantendo a sua conectividade. Este protocolo é uma extensão ao MIPv6 e possibilita, de uma forma transparente, a continuidade de sessões a todos os nós da rede móvel enquanto esta se move.

Os cinco I-Ds actualmente em lista de espera para publicação em RFC são os seguintes: *Network Mobility Support Goals and Requirements (draft-ietf-nemo-requirements-06)* [41], *Network Mobility Support Terminology (draft-ietf-nemo-terminology-06)* [42], *NEMO Home Network models (draft-ietf-nemo-home-network-models-06)* [34], *Network Mobility Route Optimization Problem Statement (draft-ietf-nemo-ro-problem-statement-03)* [37] e *Network Mobility Route Optimization Solution Space Analysis (draft-ietf-nemo-ro-space-analysis-03)* [38].

Os quatro Drafts actualmente activos são o *NEMO Management Information Base (draft-ietf-nemo-mib-02)* [40], o *DHCPv6 Prefix Delegation for NEMO (draft-ietf-nemo-dhcpv6-pd-02)* [39], o *Mobile Network Prefix Delegation (draft-ietf-nemo-prefix-delegation-01)* [43] e o *Analysis of Multihoming in Network Mobility Support (draft-ietf-nemo-multihoming-issues-07)* [44].

O único Internet-Draft actualmente expirado é o *IPv4 Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol (draft-ietf-nemo-v4-base-01)* [36].

Informação detalhada relativa a todos estes documentos pode ser obtida em [55], através de [57] e nos próprios documentos.

A Figura 4.2 apresenta a evolução dos diversos Internet-Drafts produzidos pelo grupo de trabalho NEMO do IETF desde 2003 até à actualidade (Fevereiro de 2007).

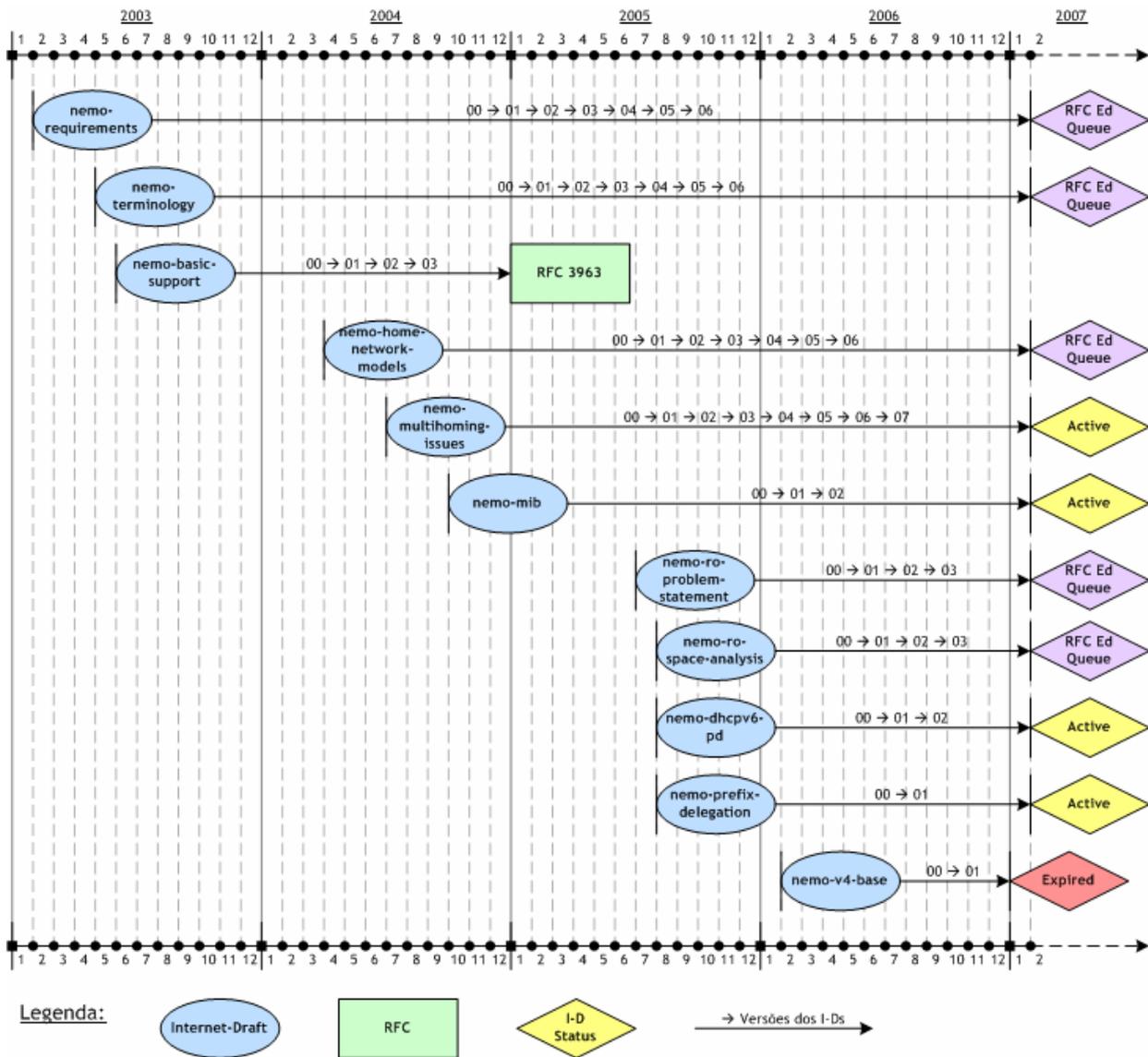


Figura 4.2 – Evolução dos diversos Internet-Drafts produzidos pelo NEMO WG do IETF.

Pode observar-se que têm existido actualizações contínuas aos diversos documentos, nomeadamente nos últimos meses, indicação de que a tecnologia está a “mexer” e de que a sua normalização está no bom caminho.

4.2. Implementações NEMO

Apesar de a tecnologia NEMO ser relativamente recente, existem já duas implementações “completas” e livres do *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol* (RFC 3693), assim como de características adicionais, ainda não totalmente normalizadas, relacionadas com este novo protocolo. Como o NEMO é uma extensão do MIPv6, as implementações actuais partem naturalmente de implementações de MIPv6 já existentes.

Nesta secção são apresentadas as implementações actuais deste protocolo, a SHISA e a NEPL, e a já obsoleta ATLANTIS.

4.2.1. SHISA



SHISA [64] é uma implementação de MIPv6 e NEMO desenvolvida pelo projecto WIDE (*Widely Integrated Distributed Environment*) (ver Subsecção 4.4.2) para sistemas operativos da família BSD. Antes de 2004 este projecto estava a desenvolver duas implementações diferentes de MIPv6 e NEMO, uma no projecto KAME, recentemente terminado, a KAMEMIP [60], e outra no projecto InternetCAR [76], a SFCMIP [65], mas decidiu em 2004 juntá-las e trabalhar numa única implementação, a SHISA.

Actualmente a implementação SHISA suporta as funcionalidades de *Mobile Node*, *Home Agent* e *Correspondent Node* do MIPv6, assim como várias extensões a este, como as definidas no RFC *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol* [30] e no Internet-Draft *Multiple Care-of Addresses Registration (draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05)* [33]. Os projectos responsáveis pela implementação SHISA continuam a trabalhar noutras extensões. Em termos de especificações, presentemente a SHISA implementa os RFCs 3775 [28], 3776 [29], 3963 [30] e 4584 [31], e os I-Ds *draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05* [33] e *draft-momose-mip6-mipsock-00* [32].

A SHISA foi implementada na plataforma KAME, com suporte para FreeBSD, NetBSD e OpenBSD. Contudo, com a conclusão do projecto KAME, os desenvolvimentos estão focados no NetBSD e FreeBSD como sistemas operativos alvo. Actualmente os responsáveis pelo desenvolvimento desta implementação estão a mover o código desenvolvido da plataforma KAME para os *kernels* daqueles sistemas operativos. Até terem terminado, a última versão desta implementação deverá ainda ser obtida através do KAME [60].

Apenas para referência, SHISA é originalmente um ornamento em forma de leão que pode ser visto no cimo de telhados ou à porta de casas da ilha de Okinawa, localizada no Sul do Japão. Esta implementação tem este nome devido ao facto de a primeira “sede” da equipa de desenvolvimento ter sido naquela ilha.

4.2.2. NEPL



NEPL (*NEMO Platform for Linux*) [66] é uma implementação do NEMO para Linux baseada na arquitectura MIPL 2. Esta implementação tem sido desenvolvida pelo projecto GO-Core da Helsinki University of Technology, em cooperação com o grupo de trabalho Nautilus6 do projecto WIDE (ver Subsecção 4.4.2), também responsável, em cooperação com o projecto USAGI [63], pelo desenvolvimento da implementação MIPL (*Mobile IPv6 for Linux*). A implementação NEPL adiciona extensões de Mobilidade de Rede à implementação MIPL existente.

Actualmente, a implementação NEPL implementa por completo o RFC 3963 [30], e suporta os modos de operação implícito e explícito (ver Subsecção 3.4.2), assim como o mecanismo de DHAAD (*Dynamic Home Agent Address Discovery*). Existem extensões a esta implementação [68], desenvolvidas pelo grupo de trabalho Nautilus6, que proporcionam suporte de *Multiple Care-of Addresses Registration*, segundo o I-D *draft-ietf-monami6-multiplecoa* [35], e de *Mobile Network Prefix Delegation*, segundo o I-D *draft-ietf-nemo-prefix-delegation-00* [43].

A última versão desta implementação, a 0.2, baseada na MIPL 2.0.1, pode ser obtida na página do MIPL [67]. Esta versão apenas suporta encaminhamento estático entre o *Home Agent* e o *Mobile Router*, estando a implementação de suporte de encaminhamento dinâmico pensada para um futuro próximo.

A versão 0.1 desta implementação foi testada com as implementações da Cisco Systems e do projecto KAME (SHISA) em Janeiro de 2005 no *6th TAHI IPv6 Interoperability Test Event* [70]. Um sumário dos testes pode ser encontrado em [6].

4.2.3. ATLANTIS

ATLANTIS [69] é uma implementação do *NEMO Basic Support Protocol*, desenvolvida pelo grupo de trabalho Nautilus6, baseada na versão 3 do I-D que originou o RFC 3693 (*draft-ietf-nemo-basic-support-03*) e na *snap* 20040126 da implementação MIPv6 do projecto KAME para a versão 1.6.1 do NetBSD. Esta implementação possui suporte para *Mobile Router* e *Home*

Agent, ambos os modos de operação implícito e explícito (o HA suporta ambos os modos simultaneamente, o MR troca de modo através de configuração), DHAAD (*Dynamic Home Agent Address Discovery*) e IPsec entre o HA e o MR.

O desenvolvimento desta implementação foi entretanto abandonado, não estando disponível para *download* devido a problemas com direitos de propriedade intelectual.

4.3. Suporte dos Sistemas Operativos

Qualquer tecnologia desenvolvida não tem a menor utilidade se não houver sistemas operativos que a suportem e disponibilizem aos seus utilizadores. Neste sentido, muito trabalho tem sido desenvolvido para incorporar o NEMO no *kernel* dos sistemas operativos da família Unix, nomeadamente Linux e BSD, assim como em sistemas operativos comerciais, como o Cisco IOS e o Microsoft Windows.

4.3.1. Linux



A implementação NEPL, pelo projecto GO-Core em cooperação com o Nautilus6, oferece aos sistemas operativos Linux suporte para a Mobilidade de Rede (ver Subsecção 4.2.2). Actualmente este suporte é possível através da aplicação de um *patch* ao *kernel* 2.6.15, conforme se verá na Secção 6.1.

4.3.2. BSD



Em relação aos sistemas operativos BSD, está disponível a implementação SHISA. O desenvolvimento da implementação ATLANTIS foi abandonado, não estando já disponível. A implementação SHISA está actualmente disponível para a versão 5.4 do FreeBSD, para a versão

2.0 do NetBSD e para a versão 3.6 do OpenBSD. Na Secção 6.1 ver-se-á como esta implementação é instalada no sistema operativo FreeBSD.

4.3.3. Cisco IOS



A funcionalidade de *Home Agent* da especificação *Mobile IPv6* [28] está disponível a partir da versão 12.3(14)T do Cisco IOS e superiores (12.4 e 12.4T) [71]. Contudo, o suporte de NEMO ainda não está disponível numa versão comercial do IOS. Não obstante, a tecnologia está já a ser desenvolvida, podendo constar de um próximo lançamento do IOS.

Apesar de a Mobilidade de Rede IPv6 não estar ainda disponível no Cisco IOS, já desde a versão 12.2 que a Cisco Systems possui suporte para Mobilidade de Rede em IPv4, sob o nome *Cisco Mobile Networks*. Esta implementação é uma extensão à *Mobile IPv4* como definido no RFC 3344 [26] e, segundo [72], suporta parcialmente a especificação NEMO (RFC 3963) [30].

4.3.4. Microsoft Windows



A Microsoft ainda não oferece suporte de NEMO nos seus sistemas operativos Windows. Contudo, as versões actuais do Windows (XP SP1, XP SP2 e Server 2003) suportam uma funcionalidade limitada de *Correspondent Node*, segundo a versão 12 do Internet-Draft, já obsoleto, que originou o RFC 3775 [28].

A Microsoft, através do seu grupo de investigação *Mobile IPv6* [73], desenvolveu em 2000 uma implementação denominada *Mobile IPv6 Technology Preview*, disponível para o Windows XP SP1, com praticamente todas as funcionalidades do MIPv6, segundo a versão 12 do I-D referido anteriormente, mas sem suporte NEMO. Contudo, por diversos motivos, essa implementação foi descontinuada, não estando disponível para utilização.

Espera-se que a Microsoft desenvolva suporte de MIPv6, e possivelmente de NEMO, para os seus sistemas operativos futuros. Com base na informação em [93], [94] e [95] julga-se que o

recente sistema operativo Vista da Microsoft não possui qualquer suporte de Mobilidade IPv6, nem de Mobilidade de Rede, possuindo apenas suporte IPv6 básico.

4.3.5. Mac OS X e Darwin



Como o sistema operativo Mac OS X está construído sobre um *kernel* Darwin, que é baseado, não só mas também, em partes do FreeBSD 5, é possível instalar naquele sistema operativo suporte para MIPv6 e NEMO com base na implementação SHISA para sistemas BSD [74]. Desta forma, está também assegurado neste sistema operativo o suporte de Mobilidade de Rede em IPv6.

4.4. Entidades de Referência

Diversas entidades têm contribuído, directa ou indirectamente, para o desenvolvimento e promoção do novo protocolo NEMO, pelo que não se podia deixar de mencionar algumas delas e qual o seu papel neste desenvolvimento e promoção.

4.4.1. IETF



O IETF (*Internet Engineering Task Force*) [48], com os seus grupos de trabalho, nomeadamente o NEMO, tem sido fundamental na normalização desta solução de Mobilidade de Rede em IPv6, até porque é o IETF, através do grupo de trabalho referido, que publica os RFCs com as especificações do protocolo.

O grupo de trabalho NEMO [54] está focado na gestão da mobilidade de toda uma rede, que altera, como uma unidade, o seu ponto de ligação à Internet, e assim a sua atingibilidade na topologia.

4.4.2. WIDE Project e Nautilus6



O projecto japonês WIDE [58] (*Widely Integrated Distributed Environment*), em curso desde 1988, é um consórcio de investigação formado por empresas e instituições públicas e académicas cujo principal objectivo é fazer investigação e desenvolvimento em ambientes reais na área das tecnologias da Internet, nomeadamente no âmbito do IPv6. Actualmente, o número de membros a trabalhar no projecto excede as sete centenas, de mais de cem companhias privadas e mais de quarenta universidades. O projecto WIDE está intimamente ligado a outros projectos como, por exemplo, o KAME e o TAHI.

O grupo de trabalho Nautilus6 [59], parte integrante do projecto WIDE, tem sido uma das principais entidades responsáveis pelo desenvolvimento do suporte do protocolo NEMO. Este grupo de trabalho foi criado para melhorar a mobilidade em IPv6 nas plataformas Linux e BSD. Para atingir este objectivo, o Nautilus6 trabalha na implementação das especificações actuais da Mobilidade IPv6, entre as quais se encontra a especificação NEMO, assim como no desenvolvimento e implementação de características adicionais de mobilidade. Uma dessas características, na qual o Nautilus6 está a trabalhar, é o suporte de Mobilidade de Rede em IPv6 para Linux e BSD. A SHISA e a NEPL são actualmente as implementações de referência do Nautilus6 para BSD e Linux respectivamente (ver Secção 4.2).

4.4.3. KAME Project



O projecto KAME [60], iniciado em Abril de 1998 e terminado em Março de 2006, foi um esforço conjunto de seis companhias japonesas para fornecer uma *stack* sólida e única de IPv6, IPsec e MIPv6/NEMO para sistemas operativos da família BSD. Um dos objectivos deste projecto era desenvolver implementações de referência livres daqueles protocolos para as variantes BSD, incluindo FreeBSD, NetBSD e OpenBSD.

Este projecto é um dos principais responsáveis pela implementação SHISA (ver Subsecção 4.2.1) para os sistemas operativos BSD.

4.4.4. TAHI Project



Como outros projectos semelhantes, o projecto TAHI [61] surgiu do empenho de várias instituições com o objectivo de investigar e desenvolver tecnologia de verificação, validação e interoperabilidade para IPv6.

O processo de crescimento do IPv4 fez-se através da conquista dos diversos obstáculos encontrados ao longo do tempo. Contudo, assim que a tecnologia atinge o nível de infraestrutura, não se podem repetir os mesmos erros. É por esta razão que a tecnologia de verificação e validação é essencial no desenvolvimento do IPv6 e protocolos relacionados, nomeadamente do NEMO. Desta forma, projectos como o TAHI revelam-se de extrema importância, dando um elevado contributo para o avanço do IPv6 e das suas tecnologias.

Entre as actividades do projecto TAHI incluem-se o suporte à operação do *IPv6 Ready Logo Program* [75] e a organização de eventos de testes de interoperabilidade.

4.4.5. GO-Core Project



O projecto GO-Core [62], ligado ao Laboratory for Theoretical Computer Science da Helsinki University of Technology, é o projecto responsável, em cooperação com o Nautilus6, pelo desenvolvimento da Plataforma NEMO para Linux (NEPL) (ver Subsecção 4.2.2).

Este projecto dedica-se à investigação de soluções de mobilidade em redes IPv6 heterogéneas. Um dos principais tópicos de interesse deste projecto é precisamente o da Mobilidade de Rede.

Projectos académicos como este dão importantes e valiosos contributos nos processos de evolução das novas tecnologias, neste caso da Mobilidade de Rede, encontrando-se muitas vezes

ligados ao desenvolvimento daquelas, estando na linha da frente da implementação, como acontece com este projecto. Projectos como este apresentam estudos, sugestões, testes e resultados que contribuem para a mobilização das restantes entidades, como sejam as entidades governamentais, empresas privadas, operadores de telecomunicações, utilizadores individuais e demais utilizadores da Internet. [4]

4.5. Outros Projectos e Trabalhos

Os projectos e trabalhos de investigação desenvolvidos por entidades privadas e/ou instituições académicas desempenham um papel extremamente importante, juntamente com as entidades oficiais, no desenvolvimento das novas tecnologias e dos protocolos a elas associados. No âmbito da mobilidade de rede este esforço é feito conjuntamente com grupo de trabalho NEMO do IETF, e tem dado bons resultados no desenvolvimento do protocolo de mobilidade de rede.

Neste contexto, existem inúmeros projectos e trabalhos que têm contribuído para o progresso do NEMO em particular e da mobilidade de rede em geral. Entre estes projectos e trabalhos destacam-se os seguintes: *InternetCAR Project* [76], *OverDRiVE Project* [77], *eMOTION* [78], *E-Bicycle* [16][79][80], *E-Wheelchair* [19], *CVIS Project* [81] e *IPv6 e-Vehicle* [82][98].

Não se encontra qualquer informação acerca de projectos ou trabalhos em curso relacionados com a mobilidade de rede em Portugal, crendo-se que este projecto tenha sido um dos primeiros, ou mesmo o primeiro, a abordar a Mobilidade de Rede em IPv6, nomeadamente o protocolo NEMO, no nosso país.

5. Arquitectura de Testes

De modo a testar e demonstrar o funcionamento da mobilidade de rede em IPv6 definiu-se uma rede de testes para englobar diversos cenários envolvendo o protocolo NEMO e a mobilidade de rede em IPv6. Neste capítulo é apresentada essa arquitectura de testes e respectivos cenários. Apresentam-se também os principais testes a realizar, bem como os requisitos em termos de *hardware* e *software* dos cenários definidos.

5.1. Cenários de Testes

Os cenários definidos para englobar a arquitectura de testes são aqui apresentados, destacando-se as principais acções na sua configuração e os seus objectivos essenciais. Quaisquer alterações à arquitectura e aos cenários aqui definidos serão apresentadas aquando da sua implementação e configuração (ver Capítulo 6).

5.1.1. Cenário Geral

Os cenários de teste ao funcionamento do protocolo NEMO têm todos por base o mesmo cenário geral apresentado na Figura 5.1.

A base dos testes a realizar no cenário geral definido é a movimentação de uma rede móvel (*Mobile Network* – NEMO) da sua rede origem (*Home Network* – HN) para uma rede visitada (*Visited Network* – VN). A rede origem e a rede visitada pretendem simular duas quaisquer redes separadas pela Internet. Estas redes são servidas por dois *routers* de acesso (*Access Routers* – AR) denominados, respectivamente, AR_HN e AR_VN (ou apenas AR). Neste cenário não podia faltar a rede móvel com a qual se demonstrará a mobilidade de rede em IPv6. A rede móvel é servida por um *router* móvel (*Mobile Router* – MR) e, apesar de poder possuir múltiplos nós, para efeitos de testes, possui apenas um (*Mobile Network Node* – MNN).

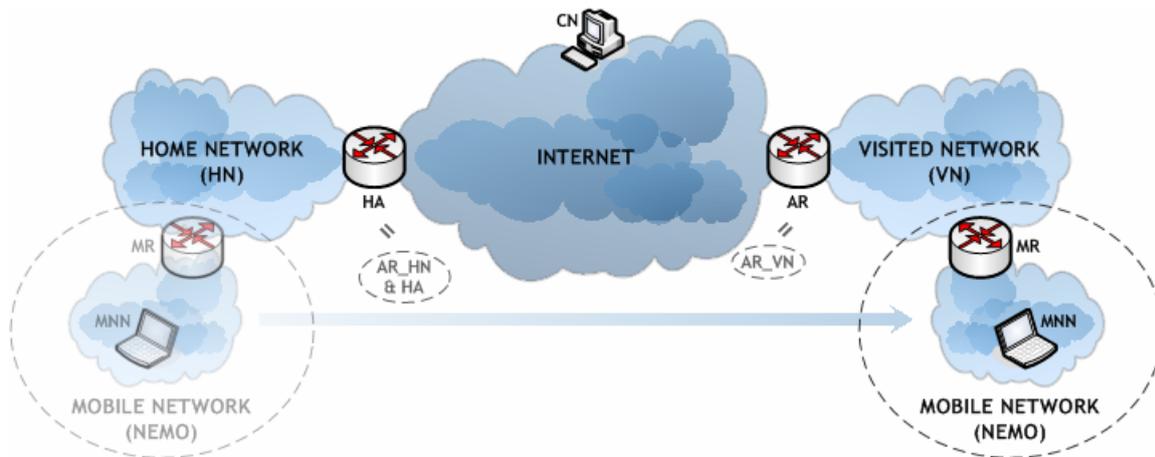


Figura 5.1 – Cenário geral da arquitectura de testes.

No cenário geral da arquitectura de testes inclui-se um *home agent* (HA), localizado na rede origem, com o qual o *router* móvel se regista quando se move para a rede visitada. Devido a limitações de *hardware*, e como se pode ver na figura, as funções de *home agent* (HA) e de *router* de acesso da rede origem (AR_HN) são partilhadas por um único *router*, i.e., uma única máquina (HA). Num cenário real esta situação poderia não ser muito desejável pois aquele *router* seria um ponto central de falhas já que, caso aquele *router* falhasse devido a algo relacionado com as funções de *home agent*, seriam comprometidas todas as comunicações da rede origem para a Internet e vice-versa. Por este motivo, é comum, em praticamente todas as configurações e cenários que se vêem na Internet, o HA e o AR_HN serem dois *routers* distintos, tratando o AR_HN do acesso da rede origem à Internet e o HA apenas da mobilidade dos nós e/ou redes móveis originários da rede origem.

No cenário apresentado inclui-se ainda um nó correspondente (CN), localizado algures na Internet, com o qual o nó da rede móvel comunica. Poderiam existir múltiplos nós correspondentes com os quais o(s) nó(s) da rede móvel poderia(m) comunicar, mas, para efeitos de testes, apenas um será suficiente para demonstrar o conceito.

Nos cenários definidos não serão usados *routers* dedicados, por exemplo, *routers* Cisco, mas máquinas Linux e BSD configuradas como *routers*. Uma das razões para a não utilização de *routers* Cisco para funcionarem como HA e MR é o facto de estes *routers* ainda não possuírem um suporte do protocolo NEMO de acordo com a especificação.

Convém referir, como se verá mais à frente, que a mobilidade de rede, assim como a mobilidade IPv6, não implica necessariamente um ambiente sem fios, podendo o conceito ser testado com sucesso em ambientes com fios [4]. Em ambas as situações, beneficia-se sempre do facto de

todos os nós da rede móvel, incluindo o seu *router*, manterem as suas sessões com os seus nós correspondentes e poderem ser atingidos através dos mesmos endereços pelos quais são atingidos quando se encontram na rede origem.

5.1.2. Endereçamento

Na Figura 5.2 apresenta-se o esquema de endereçamento da arquitectura de testes definida, apresentando-se os endereços de cada um dos seus componentes.

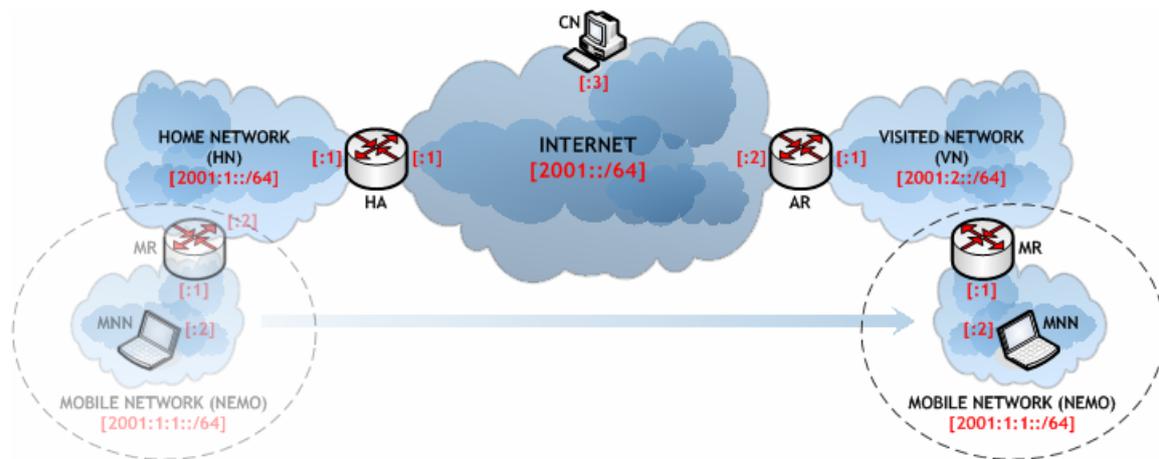


Figura 5.2 – Esquema de endereçamento da arquitectura de testes definida.

Escolheu-se como base dos prefixos de todas as redes o prefixo $2001::/16$ por este ser, actualmente, o mais utilizado na Internet. Contudo, poderia utilizar-se qualquer prefixo derivado do $2000::/3$, alocado pela IANA para o endereçamento *Global Unicast* [46], ou mesmo qualquer outro, desde que não tenha nenhuma utilização especial. Com a utilização deste prefixo pretende-se apenas dar mais realidade aos cenários, utilizando um prefixo utilizado na Internet.

No esquema de endereçamento não se apresenta o endereço do *router* móvel na rede visitada, o *care-of address* (CoA), pois esse endereço é configurado automaticamente pelo *router* móvel, com base nos *Router Advertisements* enviados pelo *router* de acesso (AR), quando se move para a rede visitada. Para além do *care-of address* que o *router* móvel obtém quando se move para a rede visitada, o *router* móvel mantém o seu endereço original da rede origem, o *home address* (HoA).

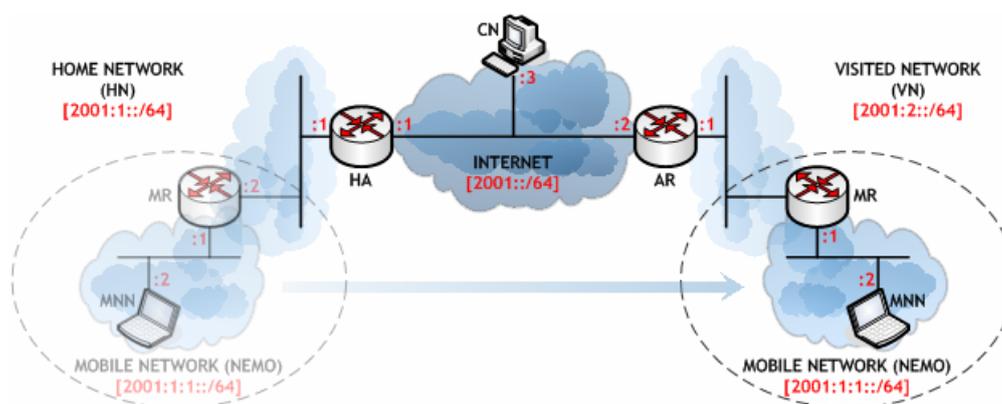
A Tabela 5.1 resume o esquema de endereçamento da arquitectura de testes definida, apresentado de forma compacta os diversos endereços das diversas máquinas utilizadas nas diversas redes, assim como algumas observações acerca de alguns desses endereços.

Rede	Máquina	Endereço (/64)	Observações
Internet	HA	2001::1	-
	AR	2001::2	-
	CN	2001::3	-
Home Network (HN)	HA	2001:1::1	Endereço do <i>home agent</i> e <i>default router</i> do <i>router</i> móvel.
	MR	2001:1::2	Endereço do <i>router</i> móvel na rede origem (<i>Home Address</i> – HoA).
Visited Network (VN)	AR	2001:2::1	-
	MR	2001:2::«eui-64»	Endereço do <i>router</i> móvel na rede visitada (<i>Care-of Address</i> – CoA). Configurado automaticamente. [45]
Mobile Network (NEMO)	MR	2001:1:1::1	-
	MNN	2001:1:1::2	-

Tabela 5.1 – Resumo do esquema de endereçamento da arquitectura de testes.

5.1.3. Cenário 1 – Wired

O primeiro cenário a implementar, cuja topologia é apresentada na Figura 5.3, consiste num cenário completamente com fios, i.e., *wired*. Com este cenário pretende-se testar a mobilidade de rede em IPv6 e visualizar o funcionamento básico do protocolo NEMO sem os desafios e dificuldades dos ambientes *wireless*.

Figura 5.3 – Cenário 1 – *Wired*.

Este cenário é constituído por máquinas Windows, Linux e BSD. As máquinas que não necessitam de suporte NEMO nem de efectuar encaminhamento (e.g., CN e MNN) serão configuradas com o Windows XP Professional SP2. As máquinas que necessitam de suporte

NEMO e de efectuar encaminhamento de tráfego (e.g., AR, HA e MR) serão configuradas com os sistemas operativos Fedora Core 6 e FreeBSD 5.4 com, respectivamente, as implementações NEPL e SHISA do NEMO.

Os primeiros passos na configuração deste cenário serão a instalação dos sistemas operativos e a garantia de conectividade de rede entre todos os seus elementos, nomeadamente através da configuração do encaminhamento nas máquinas com funções de *routers* (ARs e MR). Seguidamente será configurado o suporte NEMO propriamente dito nas máquinas que dele necessitam (HA e MR). Ambos os *routers* de acesso têm de ser configurados para enviar *Router Advertisements* (RAs) de forma a que o *router* móvel consiga detectar quando se move entre as duas redes.

Apesar deste cenário se basear numa topologia cablada, i.e., com fios, serve perfeitamente para testar e verificar o funcionamento da mobilidade de rede em IPv6. Para isso basta desligar o *router* móvel do segmento de rede origem e ligá-lo no segmento de rede visitado, verificando-se assim a operacionalidade do NEMO. Uma das limitações deste cenário é que não permite efectuar *handovers* suaves, havendo sempre perda de pacotes, dependendo do tempo de mudança de rede. Para testar o regresso à rede origem basta desligar o *router* móvel do segmento de rede visitado e ligá-lo ao segmento de rede origem.

5.1.4. Cenário 2 – Wireless

Este cenário é basicamente igual ao cenário anterior, *wired*, mas consiste numa topologia sem fios, i.e., *wireless*. Na Figura 5.4 é apresentado o cenário em causa.

Neste cenário o *router* móvel liga-se às redes origem e visitada por intermédio de APs (*Access Points*) ligados aos respectivos *routers* de acesso. Pretende-se que as redes origem e visitada estejam espacialmente afastadas de forma a realmente se ver a rede móvel mexer-se. Porém, a distância entre as duas redes deverá ser tal que as células dos dois APs se intersectem algures, permitindo assim uma transição “suave” entre as duas redes de forma a testar os *handovers* suaves. O principal objectivo dos *handovers* suaves é evitar ao máximo a perda de pacotes durante o *handover*. Esta situação é ilustrada na Figura 5.5.

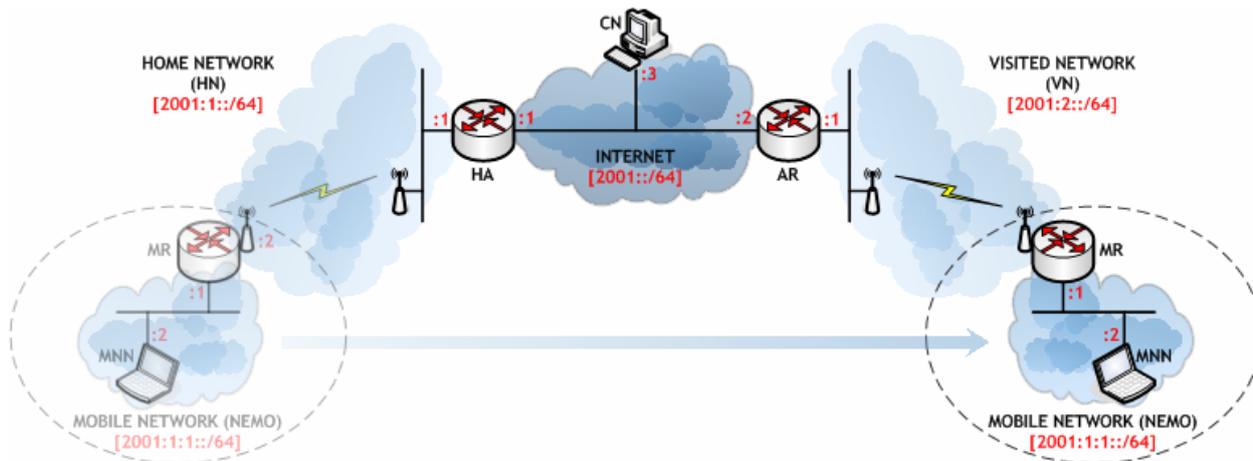


Figura 5.4 – Cenário 2 – Wireless.

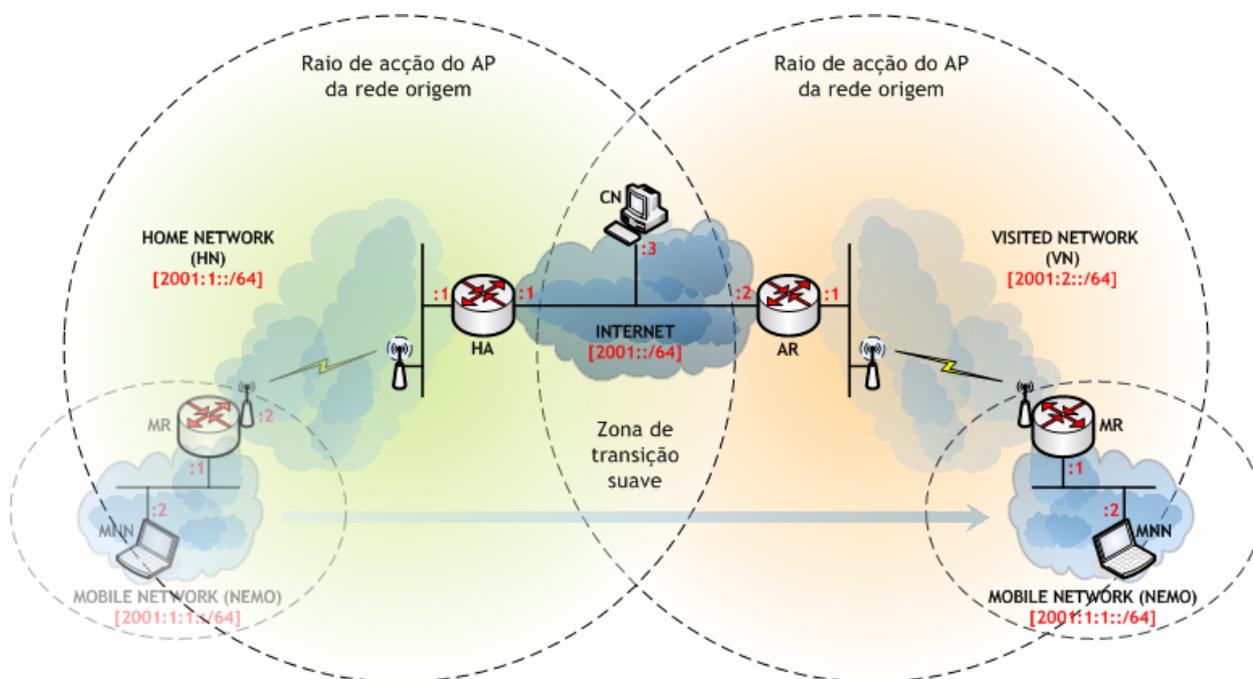


Figura 5.5 – Ilustração do raio de acção dos APs das duas redes e da zona de transição suave.

No projecto anterior, “*Testes de Mobilidade IPv6*” [4], existiram alguns problemas com o encaminhamento dos *Router Advertisements* dos *routers* de acesso por parte de APs Cisco (ver [4], p. 78). Por este motivo, caso tais problemas voltassem a ocorrer, pensou-se num cenário equivalente ao apresentado na Figura 5.4, mas no qual cada *router* de acesso, em vez de estar ligado a um AP, possui uma interface *wireless* para servir de AP. Este cenário é apresentado na Figura 5.6 e nele cada AR possui uma interface *ethernet* e uma interface *wireless* que funciona como AP. Na figura são também apresentados os endereços das interfaces *wireless*.

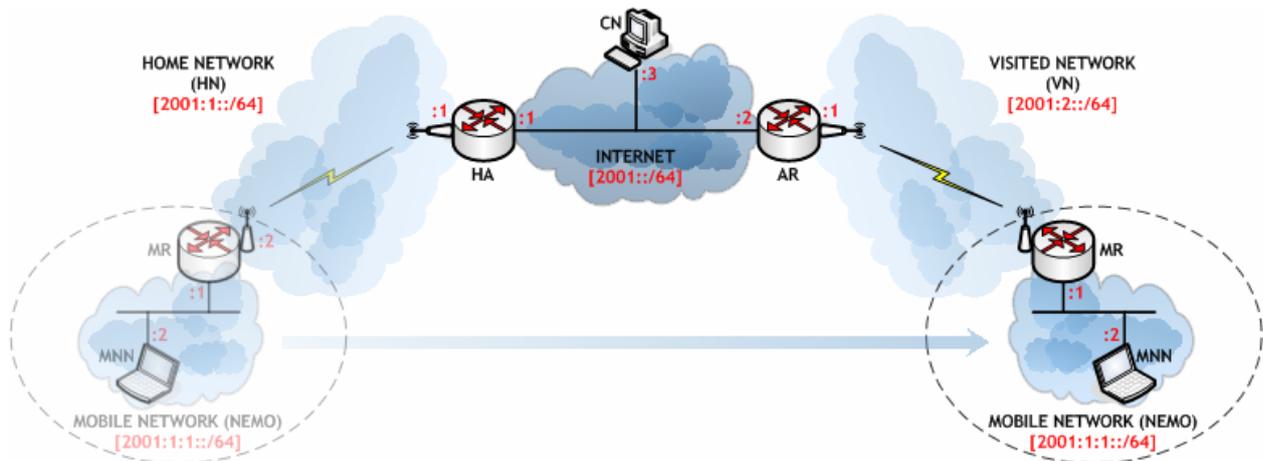


Figura 5.6 – Cenário em que os APs de acesso são substituídos por interfaces *wireless*.

5.2. Definição de Testes

Os testes que se pretendem realizar nos cenários definidos prendem-se essencialmente com a demonstração do conceito de mobilidade de rede, mais concretamente através da observação do funcionamento do protocolo NEMO. Neste sentido, para além de outros aspectos, observar-se-á:

- A troca de mensagens através do protocolo NEMO, identificando-se as alterações apresentadas na Secção 3.3;
- Os dois modos de operação do NEMO;
- A forma como é realizado o encaminhamento quando a rede móvel se encontra na rede origem e quando esta se encontra na rede visitada;
- A manutenção da conectividade enquanto a rede se move.

A manutenção da conectividade IPv6 com a movimentação da rede será demonstrada utilizando aplicações típicas da análise de redes, nomeadamente as aplicações *ping* e *traceroute*. Para dar algum realismo aos testes a efectuar, será também utilizada uma aplicação de *streaming* (VLC media player [92]) para tentar demonstrar a conectividade ininterrupta durante a movimentação da rede móvel.

Um exemplo da utilização da aplicação de *streaming* para demonstrar a conectividade ininterrupta (ou quase) entre a rede móvel e a Internet consiste em configurar o nó correspondente da Internet (CN) como servidor de *streaming*, colocando-o a servir um *stream* de áudio ou vídeo, e o nó da rede móvel (MNN), enquanto ainda se encontra na rede origem, como

cliente. Seguidamente move-se a rede móvel para a rede visitada e verifica-se que a conectividade se mantém, mantendo-se a recepção do *stream*.

De forma a testar e configurar as duas implementações do NEMO existentes, a SHISA para BSD e a NEPL para Linux, e para se verificar a sua interoperabilidade, os cenários apresentados serão configurados de quatro formas distintas, efectuando-se as combinações possíveis entre as duas implementações no *router* móvel e *home agent*, conforme se pode visualizar na Tabela 5.2.

Combinação	MR	HA
1	NEPL	NEPL
2	SHISA	SHISA
3	NEPL	SHISA
4	SHISA	NEPL

Tabela 5.2 – Combinações possíveis das duas implementações do NEMO entre o MR e o HA.

5.3. Requisitos

Os cenários que se pretendem implementar possuem diversos requisitos em termos de *hardware* e *software*, requisitos esses que se apresentam nesta secção.

5.3.1. Hardware

Os cenários referidos são relativamente exigentes em termos de *hardware*, nomeadamente no que diz respeito a máquinas e interfaces de rede. Na Tabela 5.3 resumem-se os requisitos dos diversos cenários, apresentando-se algumas observações acerca desses requisitos.

Hardware	Quantidade	Observações
Máquinas	5	Incluindo <i>routers</i> , pois serão usadas máquinas configuradas como <i>routers</i> , e computadores portáteis para se poder mover a rede móvel.
Interfaces <i>ethernet</i>	8	Placas de rede <i>ethernet</i> para as diversas máquinas dos cenários. No caso do cenário <i>wireless</i> (com APs) será necessária menos 1 placa. No caso do cenário com interfaces <i>wireless</i> (em vez de APs) serão necessárias menos 3 placas.

<i>Access Points</i>	2	Um para a rede origem e outro para a rede visitada para o cenário <i>wireless</i> .
Interfaces <i>wireless</i>	3	Uma placa de rede <i>wireless</i> para o <i>router</i> móvel se ligar às redes origem e visitada no cenário <i>wireless</i> , e uma para cada um dos <i>routers</i> de acesso para substituir os APs.

Tabela 5.3 – Resumo dos requisitos de *hardware* dos diversos cenários.

5.3.2. Software

Em termos de *software* necessário ao desenvolvimento dos cenários propostos não existem grandes requisitos, sendo apenas necessários sistemas operativos, as implementações do protocolo NEMO já referidas e algumas aplicações para efectuar diversos testes. A Tabela 5.4 resume os requisitos de *software* dos cenários a implementar.

Software	Tipo	Observações
Windows XP Professional SP2	Sistemas Operativos	Para máquinas que não necessitam de suporte NEMO nem de efectuar encaminhamento (e.g., CN e MNN).
Fedora Core 6		Para máquinas que necessitam de suporte NEMO e de efectuar encaminhamento (e.g., ARs, HA e MR).
FreeBSD 5.4		
NEPL	Implementações NEMO	Implementação para Linux (versão 0.2).
SHISA		Implementação para BSD (<i>snapshot</i> de 20061201 para FreeBSD 5.4).
<i>ping6</i>	Aplicações Diversas	Para testar a conectividade.
<i>traceroute6</i>		Para testar o encaminhamento.
VLC media player		Servidor e cliente de <i>streaming</i> para Windows XP (versão 0.8.6).
Wireshark		Analisador de protocolos para Windows e Linux (versão 0.99.4).

Tabela 5.4 – Resumo dos requisitos de *software* dos diversos cenários.

Em relação à escolha da distribuição de Linux a utilizar não houve grandes critérios, tendo esta escolha que ver simplesmente com a maior experiência com os ambientes Fedora Core. Já em relação à escolha do FreeBSD 5.4, esta opção prendeu-se com o facto deste sistema operativo ser um dos mais *user friendly* da família BSD. Em relação à versão, escolheu-se a 5.4 devido ao facto de ser para essa versão que os *snapshots* da implementação SHISA estão disponíveis.

5.4. Utilização de Máquinas Virtuais

A virtualização, apesar de exigir maiores capacidades em termos de processamento e memória às máquinas físicas que alojam as máquinas virtuais, é uma solução comum quando se pretendem implementar cenários que exigem muito *hardware*. Desta forma a utilização de máquinas virtuais surge como forma de aproveitar ao máximo os recursos disponíveis, utilizando uma única máquina física para implementar duas ou mais máquinas distintas.

Devido aos elevados requisitos em termos de *hardware* dos cenários definidos para os testes a realizar neste projecto, e às limitações de *hardware* existentes, surgiu a hipótese de se recorrer à virtualização por forma a se poderem implementar aqueles cenários com o *hardware* disponível. Assim, a solução encontrada, apresentada na Figura 5.7, corresponde ao cenário a implementar de forma a se conseguir ter as cinco máquinas necessárias em apenas três físicas.

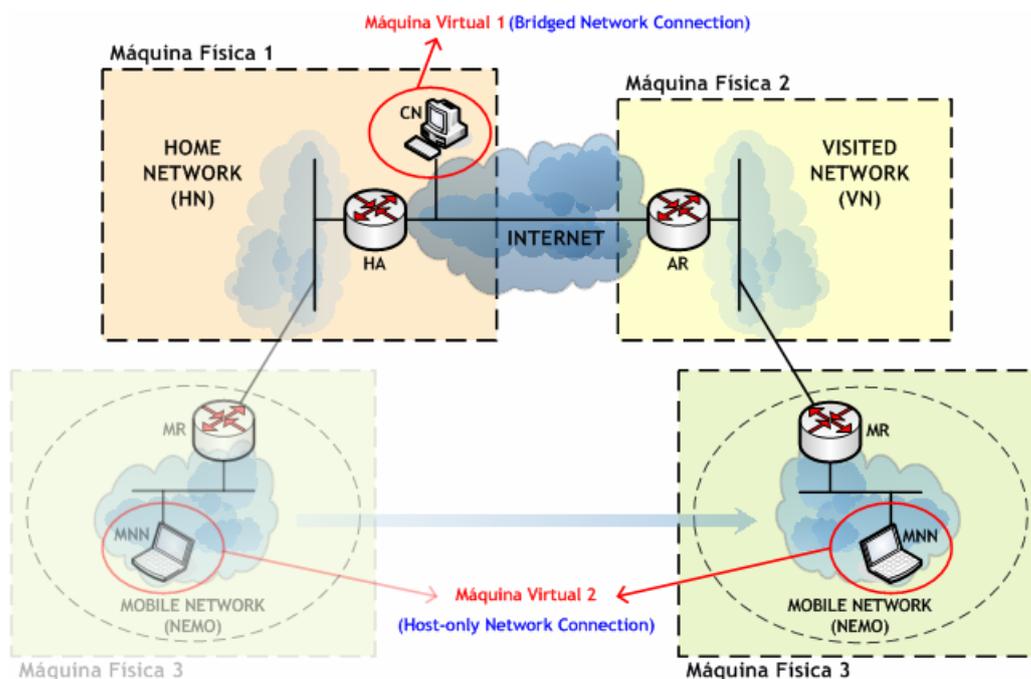


Figura 5.7 – Solução encontrada para a utilização de máquinas virtuais.

Como se pode ver na figura, a solução encontrada, tendo em conta as máquinas disponíveis e as suas características, passa por as máquinas que servem de HA e MR (máquinas físicas 1 e 3) implementarem duas máquinas virtuais, uma cada uma, que servirão de CN e MNN (máquinas virtuais 1 e 2), respectivamente. As máquinas físicas correrão o sistema operativo Fedora Core 6 (ou FreeBSD 5.4), pois ambas necessitam de suporte NEMO e de efectuar encaminhamento, e as

máquinas virtuais correrão o sistema operativo Windows XP. O *software* utilizado para implementar as máquinas virtuais será o VMware Workstation (versão 5.5.3).

A máquina física 2 não implementa nenhuma máquina virtual, desempenhando apenas as funções de *router* de acesso à rede visitada.

Em relação às máquinas virtuais destacam-se os seguintes pontos para que o cenário funcione como esperado:

- A interface de rede da máquina virtual 1 deve ser *Bridged*, partilhando assim a ligação de rede da máquina física à Internet e pertencendo à mesma rede que esta;
- A interface de rede da máquina virtual 2 deve ser *Host-only*, tendo-se assim uma rede privada entre o MR e o MNN que simula a rede móvel.

Desta forma, recorrendo à utilização de máquinas virtuais, reduzem-se um pouco os requisitos de *hardware* dos cenários definidos. Nomeadamente, reduzem-se de cinco para três e de oito para cinco, respectivamente, o número máquinas físicas e de interfaces de rede necessárias. A Tabela 5.5 resume os requisitos de *hardware* dos diversos cenários tendo em conta a utilização de máquinas virtuais.

<i>Hardware</i>	Quantidade
Máquinas físicas	3
Interfaces <i>ethernet</i>	5
<i>Access Points</i>	2
Interfaces <i>wireless</i>	3

Tabela 5.5 – Resumo dos requisitos de *hardware* dos cenários recorrendo à virtualização.

5.5. Possibilidade de Utilização de Simuladores

Um simulador de rede é uma aplicação que permite simular uma rede, sem que exista uma rede “física”. Os simuladores de rede servem uma grande variedade de propósitos. Comparados com o custo e tempo envolvidos no desenvolvimento de uma plataforma de testes contemplando uma infra-estrutura complexa e múltiplos computadores e *routers*, os simuladores de rede proporcionam uma solução relativamente rápida e acessível. Os simuladores permitem testar cenários que poderiam ser particularmente difíceis e/ou dispendiosos de simular usando *hardware* real, como por exemplo, simular os efeitos de um elevado volume de tráfego ou de um

ataque de DoS (*Denial of Service*) num serviço de rede. Os simuladores de rede são particularmente úteis para permitir o teste de novos protocolos de rede ou de alterações aos protocolos existentes num ambiente controlado e reprodutível, assim como o teste de novas tecnologias.

Devido à exigência de diversos cenários e à dificuldade de testar determinadas tecnologias, muitos trabalhos e projectos recorrem ao uso de simuladores de rede para simular redes e/ou testar e analisar tecnologias. Neste projecto, devido à elevada exigência em termos de *hardware* dos cenários a implementar, ponderou-se a possibilidade de utilizar simuladores. Nesse sentido, fez-se um levantamento dos simuladores disponíveis para testar a Mobilidade de Rede em IPv6, em particular a especificada pelo NEMO. Depois de alguma pesquisa obteve-se a seguinte lista de simuladores que poderiam suportar NEMO:

- *Network Simulator 2 (NS-2)* [85];
- *MobiWan: NS-2 extensions to study mobility in Wide-Area IPv6 Networks* [86];
- *SimulX* [87];
- *OMNeT++* [88][89].

O *NS-2* é um dos simuladores de rede mais conhecidos e divulgados. É bastante popular no mundo académico devido à sua extensibilidade (devido ao seu modelo de código aberto) e ao fácil acesso a documentação. Segundo alguns documentos, nomeadamente [21], o *NS-2* possui suporte para Mobilidade de Redes IPv6 (NEMO), mas através de extensões às próprias extensões criadas para dar suporte de Mobilidade IPv6 (*MobiWan*), e tais extensões não se encontram publicamente acessíveis.

O *MobiWan* é uma ferramenta de simulação baseada no *NS* (versão ns-2.1b6) com o intuito de simular a Mobilidade IPv6 em grandes redes de área alargada (WANs) (tanto mobilidade de área local como global). Assim sendo, o *MobiWan* consiste numa série de extensões para simular a Mobilidade IPv6. O *MobiWan* por si só não possui suporte para Mobilidade de Rede e NEMO e, como se viu, as extensões definidas não se encontram publicamente disponíveis.

O *SimulX* é um simulador de redes sem fios especialmente desenhado para simular redes 802.11 e Mobilidade IPv6. Segundo [90] e [91] o *SimulX* possui suporte para Mobilidade de Rede e NEMO, mas não se encontra mais informação sobre esse suporte.

O *OMNeT++* é um ambiente modular de simulação de rede com suporte para Mobilidade IPv6, mas ainda sem suporte para Mobilidade de Rede e NEMO.

Apesar de se terem encontrado vários simuladores que poderiam suportar Mobilidade de Rede, e mais concretamente o protocolo NEMO, a informação acerca desse suporte é por vezes contraditória, ou mesmo indisponível. Pelos motivos apresentados, a possibilidade de utilizar simuladores para testar os cenários propostos foi posta de parte, não tendo sido explorada ao detalhe nenhuma solução em particular.

6. Configuração de Cenários, Testes e Resultados

Depois de estudada a tecnologia NEMO e de definida a arquitectura de testes a utilizar, passou-se para a configuração dos cenários e realização de diversos testes, com vista à obtenção de resultados acerca da utilização desta tecnologia e das implementações disponíveis. Neste capítulo apresenta-se a configuração dos cenários de teste definidos, os testes realizados e os resultados obtidos.

Apesar de existirem diversos guias de instalação (conhecidos com *HOWTO*) com as instruções de instalação das implementações NEMO utilizadas, nem todos são muito completos, principalmente devido ao facto de serem desactualizados ou à falta de passos de configuração. Por esta razão, apresentam-se também neste capítulo os passos seguidos neste projecto para a instalação das implementações NEPL e SHISA nos respectivos sistemas operativos.

6.1. Instalação das Implementações NEMO

O primeiro passo para a configuração dos cenários de teste definidos passou pela instalação e configuração dos sistemas operativos e das implementações NEMO utilizadas, a NEPL e a SHISA. Nesta secção apresentam-se os passos seguidos para a referida instalação no *home agent* e no *router* móvel.

6.1.1. NEPL

A instalação da implementação NEPL (*NEMO Platform for Linux*) no Linux, no caso deste projecto na distribuição Fedora Core 6, é relativamente simples, tendo sido seguidas as instruções relativamente bem explicadas em [8] e na documentação da aplicação.

A versão 0.2 da NEPL é composta por um *patch* para o *kernel* 2.6.15 do Linux e pela aplicação propriamente dita. Este *patch* permite ao *kernel* suportar a mobilidade de rede. Primeiramente foi compilado um *kernel* 2.6.15 com o suporte de mobilidade de rede activo e depois foi instalada a aplicação NEPL. O código fonte do *kernel* 2.6.15, o *patch* e a aplicação foram obtidos da seguinte forma:

```
# cd /usr/src/  
# wget http://www.kernel.org/pub/linux/kernel/v2.6/linux-2.6.15.tar.gz  
# wget http://www.mobile-ipv6.org/software/download/nemo-0.2-linux-2.6.15.patch.gz  
# wget http://www.mobile-ipv6.org/software/download/nemo-0.2.tar.gz
```

Descompactaram-se os ficheiros descarregados e procedeu-se à aplicação do *patch* às fontes do *kernel*:

```
# tar -xzf linux-2.6.15.tar.gz  
# gunzip nemo-0.2-linux-2.6.15.patch.gz  
# tar -xzf nemo-0.2.tar.gz  
# mv nemo-0.2-linux-2.6.15.patch linux-2.6.15/  
# cd linux-2.6.15/  
# patch -p1 < nemo-0.2-linux-2.6.15.patch
```

Com o *patch* aplicado prosseguiu-se para a criação do ficheiro de configuração do *kernel* e para a sua edição, de forma a activar as opções que permitem ao *kernel* suportar a mobilidade de rede:

```
# make oldconfig  
# vi .config
```

Conforme a documentação indica, para activar o suporte de mobilidade no *kernel* foi necessário activar as seguintes opções no ficheiro de configuração criado:

```
CONFIG_EXPERIMENTAL=y  
CONFIG_SYSVIPC=y  
CONFIG_PROC_FS=y  
CONFIG_NET=y  
CONFIG_INET=y  
CONFIG_IPV6=y  
CONFIG_IPV6_MIP6=y  
CONFIG_XFRM=y  
CONFIG_XFRM_USER=y  
CONFIG_XFRM_ENHANCEMENT=y
```

```
CONFIG_IPV6_TUNNEL=y
CONFIG_IPV6_ADVANCED_ROUTER=y
CONFIG_IPV6_MULTIPLE_TABLES=y
CONFIG_IPV6_SUBTREES=y
CONFIG_ARPD=y
CONFIG_INET6_ESP=y
CONFIG_NET_KEY=y
CONFIG_NET_KEY_MIGRATE=y
```

Refira-se que, segundo a documentação seguida, a opção `CONFIG_IPV6_SUBTREES` apenas é necessária no MR e que as opções `CONFIG_INET6_ESP`, `CONFIG_NET_KEY` e `CONFIG_NET_KEY_MIGRATE` apenas são necessárias no caso de se pretender utilizar IPsec entre o HA e o MR ou no caso de se pretender utilizar um túnel IPsec. No entanto, activaram-se todas aquelas opções tanto no HA como no MR para evitar problemas na execução da aplicação.

Após a edição o ficheiro de configuração do *kernel*, verificou-se se todas as opções necessárias para a mobilidade de rede tinham sido correctamente activadas. Para isso utilizou-se o *script* `chkconf_kernel.sh` disponibilizado no pacote da NEPL:

```
# /usr/src/nemo-0.2/chkconf_kernel.sh /usr/src/linux-2.6.15/
```

Depois de executado o *script* e do seu *output* ter indicado que todas as opções de mobilidade de rede se encontravam correctamente activadas, seguiu-se para a compilação e instalação do *kernel*:

```
# make
# make modules_install
# make install
```

Após se ter compilado e instalado o *kernel* 2.6.15, reiniciou-se a máquina com o novo *kernel* e, para concluir o processo de instalação da NEPL, compilou-se e instalou-se a aplicação:

```
# cd /usr/src/nemo-0.2/
# CPPFLAGS=-I/usr/src/linux-2.6.15/include/ ./configure --enable-vt
# make
# make install
```

A opção `--enable-vt` permite activar o terminal virtual da aplicação, que pode ser útil para obter informação acerca do registo do MR no HA. O terminal virtual pode ser utilizado no HA e no MR através de *telnet* à porta 7777 (por omissão).

Nas secções seguintes apresentam-se as configurações dos diversos cenários e os testes realizados envolvendo a mobilidade de rede IPv6 utilizando a implementação NEPL para Linux.

6.1.2. SHISA

A instalação da implementação NEPL no Linux é relativamente simples, mas já da SHISA não se pode dizer o mesmo. Os guias de instalação e manuais existentes para instalar a SHISA nos sistemas operativos da família BSD não são muito claros, mas com alguma dificuldade se foi avançando nos passos de instalação. Para isso tentou seguir-se os passos apresentados na documentação incluída no pacote da SHISA e em [9], [10] e [11].

A implementação SHISA está disponível em *snapshots* regulares no *site* do projecto KAME [60] e consiste numa pequena extensão ao *kernel* do BSD e em vários pequenos programas. Para a sua instalação começou-se por obter o *snapshot* de 1 de Dezembro de 2006 (20061201) para o sistema operativo FreeBSD 5.4:

```
# mkdir /usr/root
# mkdir /usr/root/src
# cd /usr/root/src/
# ftp -a ftp://ftp.kame.net/pub/kame/snap/kame-20061201-freebsd54-snap.tgz
```

Após a sua obtenção, descompactou-se o pacote da SHISA e, para evitar problemas futuros, realizaram-se cópias de segurança das directorias */boot/kernel* e */usr/include*, pois o conteúdo destas é substituído ou alterado durante o processo de instalação:

```
# tar -xzf kame-20061201-freebsd54-snap.tgz
# cp -r /boot/kernel /boot/kernel.bak
# cp -r /usr/include /usr/include.bak
```

Depois destes passos preliminares, preparou-se a árvore de directorias da aplicação para a compilação, indicando qual o sistema operativo de destino, neste caso o FreeBSD 5.4:

```
# cd kame/
# make TARGET=freebsd5 prepare
```

Com a árvore de directorias preparada para o sistema operativo utilizado, criou-se um ficheiro de configuração do *kernel*, baseado num ficheiro de configuração genérico, no qual foram activadas as opções que permitem ao *kernel* suportar a mobilidade de rede:

```
# cd freebsd5/sys/i386/conf/  
# cp GENERIC.KAME CONFIGFILE  
# vi CONFIGFILE
```

De forma a que o *kernel*, tanto do HA como do MR, pudesse suportar a mobilidade de rede, foi necessário activar as seguintes opções no ficheiro de configuração *CONFIGFILE*:

```
options IPSEC  
options MIP6
```

Para que o HA pudesse suportar MRs, i.e., mobilidade de rede, foi necessário definir uma pseudo-interface para que o encaminhamento por túnel pudesse ser efectuado:

```
device nemo 1
```

O número apresentado representa o número de MRs que o HA em causa pode suportar, neste caso apenas um. No caso do MR, foi necessário definir as seguintes pseudo-interfaces para activar o suporte de mobilidade de rede:

```
device mip 1  
device nemo 1
```

Após se terem activado as opções necessárias para o suporte de mobilidade de rede, configurou-se o código fonte do *kernel* com base no ficheiro de configuração criado e prosseguiu-se para a compilação do *kernel*:

```
# /usr/sbin/config CONFIGFILE  
# cd ../compile/CONFIGFILE/  
# make depend  
# make
```

Por algum motivo, a compilação do *kernel* (comando `make`) não terminou com sucesso, tendo ocorrido erros durante a compilação do código fonte de um ficheiro relacionado com o suporte

de mobilidade de rede (ficheiro *if_nemo.c*). O *output* do erro ocorrido foi o apresentado na Figura 6.1.

```
../../../../net/if_nemo.c: In function `nemoattach':  
../../../../net/if_nemo.c:153: error: invalid application of `sizeof' to incomplete  
type `nemo_softc'  
../../../../net/if_nemo.c:155: error: invalid application of `sizeof' to incomplete  
type `nemo_softc'  
../../../../net/if_nemo.c:156: error: increment of pointer to unknown structure  
../../../../net/if_nemo.c:156: error: arithmetic on pointer to an incomplete type  
[...]  
*** Error code 1
```

Figura 6.1 – Extracto do *output* do erro ocorrido durante a compilação do ficheiro *if_nemo.c*.

Após muito *troubleshooting* não foi possível descobrir a causa do problema ocorrido, não se tendo também encontrado qualquer informação sobre este problema na Internet. Por este motivo, não foi possível resolvê-lo em tempo útil. Assim, não foi possível recompilar o *kernel* do FreeBSD 5.4 de forma a que este pudesse suportar a mobilidade de rede, pelo que a possibilidade de utilização da implementação SHISA ficou afastada deste projecto. De qualquer forma o passo seguinte seria a instalação do *kernel* compilado através do seguinte comando:

```
# make install
```

Após a instalação do *kernel* preparado para a mobilidade de rede seria necessário instalar algumas bibliotecas também preparadas para a mobilidade de rede, de forma a reflectirem as alterações efectuadas ao *kernel*:

```
# cd /usr/root/src/kame/freebsd5/  
# make includes  
# make install-includes
```

Depois destes passos, restaria compilar e instalar a aplicação SHISA, assim como todos os programas e bibliotecas que a compõem:

```
# make  
# make install
```

Refira-se que, para que o HA suportasse a mobilidade de rede NEMO, seria necessário activar a *flag* de compilação `MIP_NEMO` no ficheiro *Makefile* do programa *had*, parte integrante da SHISA, em `/usr/root/src/kame/freebsd5/usr.sbin/shisad/had/`:

```
CFLAGS+= -DMIP_NEMO
```

Depois de se reiniciar o sistema com o novo *kernel*, a SHISA estaria então pronta a ser configurada e utilizada. Devido aos problemas encontrados, e que não se conseguiram resolver em tempo útil, tal não foi possível. Por este motivo, nos cenários definidos apenas foi utilizada a implementação do NEMO para Linux, a NEPL, não tendo sido por isso possível testar a interoperabilidade entre as duas implementações.

6.2. Cenário 1 – Wired

O primeiro cenário configurado, apresentado na Subsecção 5.1.3, consistiu num cenário inteiramente com fios, no qual se pretendia testar a mobilidade de rede em IPv6 e observar o funcionamento básico do protocolo NEMO sem os desafios e as dificuldades dos ambientes *wireless*.

6.2.1. Descrição

A Figura 6.2 apresenta em detalhe o cenário em questão, com a rede móvel na rede origem, antes de qualquer movimentação. Este cenário apenas inclui máquinas físicas ligadas por cabo.

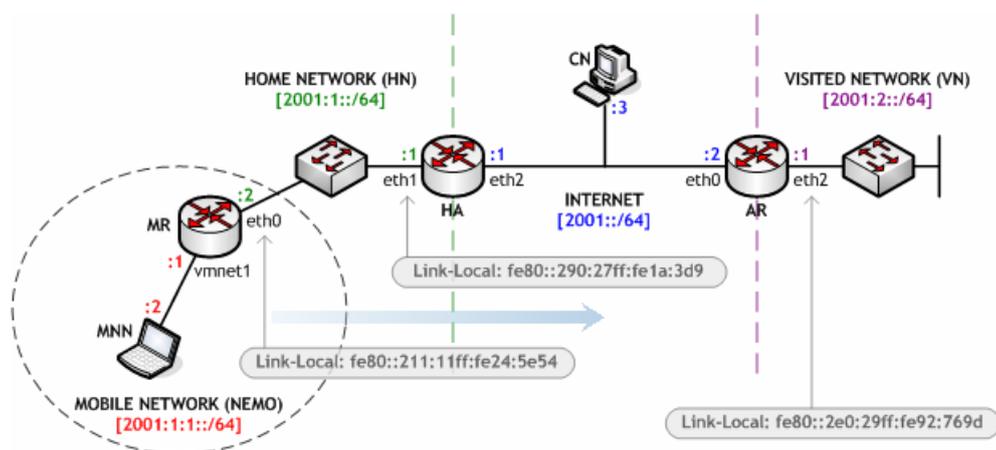


Figura 6.2 – Ilustração detalhada do Cenário 1 – *Wired*.

Neste cenário os *routers* HA, AR e MR foram configurados com o sistema operativo Fedora Core 6. Para além do facto de os *routers* HA e MR necessitarem de suporte NEMO através da implementação NEPL para Linux, tanto o HA como o AR necessitam de enviar *Router Advertisements* (RAs), em intervalos o mais curtos possíveis, de forma a acelerar ao máximo a detecção de movimento por parte do MR, sendo para isso utilizada a aplicação *radvd* (*Linux IPv6 Router Advertisement Daemon*) para Linux. Ponderou-se utilizar o Windows XP Professional SP2 no *router* de acesso da rede visitada (AR), pois este sistema operativo também permite efectuar encaminhamento IPv6, mas, no entanto, não permite personalizar/optimizar os intervalos de envio de RAs. Por este motivo, foi mesmo necessário recorrer ao Linux, tanto para o HA como para o AR, de forma a utilizar-se o *radvd* para que aqueles *routers* enviassem *Router Advertisements* para os respectivos *links* origem e visitado. O *radvd* permite optimizar bastante o tempo de envio dos RAs, nomeadamente quando utilizado com as extensões de mobilidade IPv6.

O intervalo de envio dos RAs é crítico quando se fala da mobilidade IPv6 porque é com base na recepção dos RAs num determinado *link* que o *router* móvel determina em que rede se encontra e se se moveu ou não. Por esta razão (para que a detecção de movimento por parte do MR seja tão rápida quanto possível) convém que este intervalo seja o mínimo possível, pois quanto menor for o intervalo de envio dos RAs por parte do HA e do AR mais depressa o *router* móvel se aperceberá de que se moveu, acelerando-se assim o processo de *handover*.

As máquinas CN e MNN foram configuradas com o sistema operativo Windows XP Professional SP2. Estas máquinas não necessitam de nenhum suporte específico, pelo que este sistema operativo serviu perfeitamente. Estas duas máquinas representam duas quaisquer máquinas de dois quaisquer utilizadores da Internet.

No Anexo A.1 apresentam-se as principais características dos equipamentos utilizados na implementação deste cenário.

6.2.2. Configuração

Após a instalação dos sistemas operativos em todas as máquinas e da instalação da NEPL nas máquinas respectivas (HA e MR), conforme os passos apresentados na Secção 6.1, passou-se à configuração propriamente dita dos diversos *routers* e máquinas.

As acções de configuração passaram por:

- Configurar os endereços IPv6 nas respectivas interfaces em todas as máquinas e *routers*;

- Configurar rotas de encaminhamento para as diversas redes nas diversas máquinas e *routers*;
- Negar a aceitação de *Router Advertisements* nos diversos *routers*, pois sendo *routers* não faz sentido que tentassem realizar auto-configuração com base em RAs que pudessem receber de outros *routers*;
- Activar o encaminhamento IPv6 em todas as interfaces dos diversos *routers*, de forma a que pudessem realizar com sucesso o encaminhamento entre as suas interfaces de entrada (ingresso) e saída (egresso);
- Configurar e iniciar o *radvd* nos *routers*, de forma poderem enviar RAs para as respectivas redes (rede origem no caso do HA, rede visitada no caso do AR e rede móvel no caso do MR);
- Configurar e iniciar a aplicação NEPL (*daemon nemod*) no HA e MR, de forma a activar as funções mobilidade de rede.

Todas as configurações deste cenário (*scripts* de configuração e inicialização e ficheiros de configuração das aplicações) são apresentadas no Anexo B.1, com comentários apropriados. Convém, no entanto, destacar alguns pontos acerca das configurações apresentadas:

- No comando para configurar a rota de encaminhamento do HA para a rede móvel (*script* de configuração e inicialização do HA, ver Anexo B.1.3), o endereço especificado para o *gateway* é o endereço *link-local* da interface de saída (interface ligada à rede origem) do *router* móvel;
- Na interface de saída do MR (*script* de configuração e inicialização do MR, ver Anexo B.1.6) não se configurou nenhum endereço porque essa informação faz parte da configuração do NEMO, sendo o *nemod* o responsável por essa configuração;
- No MR também não se configuraram rotas de encaminhamento pois essa informação é inserida automaticamente pelo *nemod* com base nos RAs recebidos do HA;
- No MNN (ver Anexo B.1.9) apenas se configurou o endereço pois as outras configurações, nomeadamente o *default router*, são obtidas automaticamente com base nos RAs que o MNN recebe do MR. Este endereço apenas se configurou para que o MNN pudesse ser atingido da Internet através de um endereço fixo e não através daquele que auto-configura com base no prefixo divulgado pelo MR nos RAs.

6.2.3. Problemas Encontrados

Depois da configuração do cenário, tentaram efectuar-se alguns testes básicos de comunicação e de funcionamento global da aplicação NEPL e do protocolo NEMO. Após alguns testes verificou-se que existiam três problemas principais com a aplicação NEPL:

1. Quando a rede móvel se encontrava na rede origem, o *router* móvel não encaminhava tráfego da rede móvel para a Internet. Isto é, o nó da rede móvel apenas conseguia atingir o MR e o HA, não conseguindo atingir a Internet nem a rede visitada. Isto, apesar de o *router* móvel conseguir atingir todos os nós do cenário e de tanto o *router* móvel como o nó da rede móvel possuírem rotas por omissão, o primeiro apontando para o HA e o segundo apontando para o MR. O tráfego do nó da Internet conseguia chegar ao nó da rede móvel, o que prova que o *router* móvel encaminhava o tráfego da Internet para a rede móvel, mas a resposta a esse tráfego não era reencaminhada pelo MR, estando o problema apenas no encaminhamento da rede móvel para a Internet.
2. Quando a rede móvel se movia para a rede visitada, como era esperado, o *router* móvel enviava um *Binding Update* para o *home agent*, mas este nunca enviava o *Binding Acknowledgement* para o *router* móvel. Apesar de, no *home agent*, o *debug* da aplicação indicar que um *Binding Acknowledgement (Mobility Header (MH) Type 6)* era enviado, indicando a aceitação do *Binding Update* recebido e o sucesso do registo (*status 0*), Figura 6.3, este nunca era enviado. Como para o *home agent* o registo era efectuado com sucesso, pois “pensava” que enviava o *Binding Acknowledgement*, o túnel era criado e o tráfego com destino à rede móvel era encaminhado com sucesso. Devido ao facto de o *home agent* nunca enviar *Binding Acknowledgements* a confirmar os *Binding Updates*, o *router* móvel nunca sabia que o registo era efectuado, continuando sempre a enviar *Binding Updates*.

```
mh_bu_parse: Binding Update Received
ndisc_do_dad: Dad success
__tunnel_add: created tunnel ip6tnl1 (9) from 2001:1:0:0:0:0:1
to 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54 user count 1
mh_send_ba: status 0
mh_send: sending MH type 6
from 2001:1:0:0:0:0:1
to 2001:1:0:0:0:0:2
mh_send: remote CoA 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
```

Figura 6.3 – Debug do *nemod* no HA indicando o envio do *Binding Acknowledgement*.

3. Apesar de o registo do *router* móvel no *home agent* ser efectuado com sucesso, mesmo o *home agent* não enviando o *Binding Acknowledgement* para o *router* móvel em resposta ao seu *Binding Update*, e o túnel ser criado tanto no *home agent* como no *router* móvel, este não conseguia encaminhar tráfego pelo túnel para o *home agent* (e.g., um *ping6* no MR para o HA devolvia “*operation not permitted*”). Este comportamento dava a entender que o túnel estava fechado para o tráfego de saída do *router* móvel, sendo, em vez de bidireccional, unidireccional, pois o tráfego que o *home agent* enviava pelo túnel chegava ao *router* móvel com sucesso.

Quando a rede móvel voltava para a rede origem, à parte do problema de da rede móvel não se conseguir atingir a Internet, tudo voltava a funcionar como devia. A anulação do registo do *router* móvel com o *home agent* era efectuada com sucesso, sendo neste caso já enviado o *Binding Acknowledgement* pelo *home agent* em resposta ao *Binding Update* do *router* móvel.

Após alguns contactos com um responsável pela aplicação NEPL do grupo Nautilus6 (Romain Kuntz) obtiveram-se algumas respostas acerca dos problemas identificados:

1. O problema de o *router* móvel não encaminhar tráfego da rede móvel para a Internet era já um *bug* conhecido (e por resolver) pelos responsáveis pelo desenvolvimento da aplicação. Este problema devia-se ao facto de o *router* móvel encaminhar o tráfego da rede móvel (prefixo *2001:1:1::/64*) com base na tabela de encaminhamento número 252 do Linux (regra número 1004), como se pode ver no *output* do comando `ip -6 rule`, apresentado na Figura 6.4, e de essa tabela não estar correctamente preenchida com as rotas devidas quando o *router* móvel se encontrava na rede origem. Através do comando `ip -6 route show table 0 | grep 252` podia precisamente ver-se que aquela tabela não continha quaisquer rotas, não devolvendo o comando qualquer entrada.

```
# ip -6 rule
0:      from all lookup local
1000:   from all to 2001:1:1::/64 lookup main
1001:   from 2001:1::2 lookup 252
1002:   from fe80::/64 lookup main
1002:   from 2001:1::/64 lookup main
1003:   from 2001:1::2 blackhole
1004:   from 2001:1:1::/64 lookup 252
32766:  from all lookup main
```

Figura 6.4 – Regras de encaminhamento do MR.

Já quando o *router* móvel se encontrava na rede visitada, o *nemod* inseria correctamente as rotas de encaminhamento na tabela número 252, como se pode observar através do *output* do comando anterior (`ip -6 route show table 0 | grep 252`), com o *router* móvel na rede visitada, Figura 6.5. Nesta situação o encaminhamento era efectuado correctamente.

```
# ip -6 route show table 0 | grep 252
default from 2001:1::2 dev ip6tnl1 table 252 proto ntk metric 128 [...]
default from 2001:1:1::/64 dev ip6tnl1 table 252 proto ntk metric 192 [...]
default via fe80::290:27ff:fe1a:3d9 dev eth0 table 252 metric 1024 [...]
```

Figura 6.5 – Tabela de encaminhamento número 252 do MR, com este na rede visitada.

A solução para este problema poderia passar por se inserir manualmente uma rota por omissão na tabela 252 de forma a que o encaminhamento pudesse ser efectuado com sucesso quando o *router* móvel se encontrava na rede origem (`ip -6 route add default <ha-link-local-address> dev <output-device> table 252`), neste caso:

```
ip -6 route add default via fe80::290:27ff:fe1a:3d9 dev eth0 table 252
```

Contudo, sempre que o *router* móvel se move o *nemod* actualiza automaticamente as tabelas de encaminhamento, pelo que a rota inserida manualmente é eliminada, tendo de ser inserida novamente quando o *router* móvel se move de novo para a rede origem. Como é óbvio, esta situação não é desejável, pois exige sempre intervenção no *router* móvel, não sendo dessa forma o movimento do *router* móvel um processo transparente.

Após diversos contactos com o responsável do Nautilus6 pela NEPL, acerca do problema e das possíveis soluções, este produziu um *patch* para aplicar ao código fonte da aplicação, de forma a corrigir o problema, permitindo assim à aplicação instalar a rota por omissão correcta na tabela de encaminhamento número 252. O *patch* foi aplicado da seguinte forma:

```
# mv nemo-0.2-homenet-fix-20070109.diff /usr/src/nemo-0.2/
# cd /usr/src/nemo-0.2/
# patch -p1 < nemo-0.2-homenet-fix-20070109.diff
```

Depois de aplicado o *patch* e de recompilada e instalada a aplicação, o resultado do comando `ip -6 route show table 0 | grep 252`, enquanto o *router* móvel se encontrava

na rede origem, apresentava já a rota correcta, Figura 6.6. Desta forma o *router* móvel podia então encaminhar com sucesso o tráfego da rede móvel para a Internet.

```
# ip -6 route show table 0 | grep 252
default via fe80::290:27ff:fe1a:3d9 dev eth0 table 252 proto ntk metric 192 [...]
```

Figura 6.6 – Rota por omissão correctamente inserida na tabela de encaminhamento do MR.

O código do *patch* em questão é apresentado no Anexo C.

2. Em relação ao problema do não envio dos *Binding Acknowledgements* por parte do *home agent* para o *router* móvel em resposta aos seus *Binding Updates*, não se chegou a nenhuma conclusão clara, podendo o problema estar associado a alguma incompatibilidade da aplicação NEPL com a distribuição Fedora Core 6 do Linux ou com o *hardware* utilizado, nomeadamente com as interfaces de rede.
3. O problema de, no *router* móvel, o túnel não deixar enviar tráfego para o *home agent*, estava relacionado com o problema anterior. Segundo o referido responsável, enquanto o *router* móvel não receber um *Binding Acknowledgement* do *home agent* a confirmar a recepção do seu *Binding Update* e a realização do registo com sucesso, a aplicação bloqueia todo o tráfego de saída do *router* móvel, fechando a extremidade de saída do túnel. Este comportamento faz sentido, na medida em que um *router* móvel pode tentar registar-se com qualquer *home agent* e não convém que possa enviar tráfego pelo túnel sem que o registo esteja completo e que o *home agent* o “autorize” a utilizá-lo. O problema é que, como o *home agent* nunca enviava *Binding Acknowledgements*, o *router* móvel nunca abria a extremidade de saída do túnel, não podendo assim enviar tráfego pelo túnel. Para resolver este problema, a solução seria utilizar a opção *OptimisticHandoff* na configuração tanto do *home agent* como do *router* móvel. Com esta opção o *router* móvel parte do princípio que o registo com o *home agent* especificado no ficheiro de configuração é efectuado com sucesso e activa logo a extremidade de saída do túnel, podendo começar logo a enviar tráfego pelo túnel para o *home agent*. Desta forma o *router* móvel não necessita de receber o *Binding Acknowledgement* do *home agent* para activar o envio de tráfego pelo túnel.

Ao se tentar utilizar a opção *OptimisticHandoff* verificou-se que esta não estava disponível na versão da NEPL que se estava a utilizar. Após alguma pesquisa, verificou-se que esta opção estava apenas disponível nas *nightly snapshots* lançadas posteriormente ao

lançamento da versão final da aplicação. Por este motivo, a solução passou por se instalar e utilizar uma dessas *snapshots*, tanto no *home agent* como no *router* móvel. A *snapshot* utilizada foi a de 25 de Julho de 2006 (20060725), a última lançada até ao momento.

6.2.4. Instalação da Nightly Snapshot 20060725 da NEPL

Como as *nightly snapshots* não são versões oficiais ou finais da aplicação, mas sim código de desenvolvimento que os responsáveis pela aplicação lançam de vez em quando com novas características, estas versões não estão preparadas para ser automaticamente instaladas como as versões finais. Por este motivo foi necessário efectuar alguns procedimentos, além dos apresentados na Subsecção 6.1.1, para preparar a aplicação para a instalação e configuração. Neste sentido, os passos seguidos para a instalação desta versão da aplicação foram os aqui apresentados.

Começou-se por obter a *nightly snapshot* em causa (versão 0.2.1 da NEPL para o *kernel* 2.6.16) e um *kernel* 2.6.16 já preparado para esta versão da aplicação:

```
# cd /usr/src/  
# wget http://www.mobile-ipv6.org/software/snapshots/kernel-20060725.tar.gz  
# wget http://www.mobile-ipv6.org/software/snapshots/nemo-20060725.tar.gz
```

O *kernel* obtido no site da aplicação traz já o *patch* da mobilidade de rede aplicado, não havendo assim necessidade de obter ou aplicar qualquer *patch*.

Após descompactar os ficheiros descarregados, criou-se e editou-se o ficheiro de configuração do *kernel* de forma a activar as opções necessárias ao suporte de mobilidade de rede:

```
# tar -xzf kernel-20060725.tar.gz  
# tar -xzf nemo-20060725.tar.gz  
# cd kernel-20060725/  
# make oldconfig  
# vi .config
```

Activaram-se então as opções de configuração do *kernel* que possibilitam o funcionamento da mobilidade de rede, já especificadas na Subsecção 6.1.1.

Depois de editado e guardado o ficheiro de configuração do *kernel*, verificou-se se todas as opções necessárias para a mobilidade de rede tinham sido correctamente activadas recorrendo ao *script* `chkconf_kernel.sh` disponibilizado no pacote da NEPL:

```
# /usr/src/nemo-20060725/chkconf_kernel.sh /usr/src/kernel-20060725/
```

Após a execução do *script* e a confirmação de que todas as opções necessárias estavam correctamente activadas seguiu-se para a compilação e instalação do novo *kernel*:

```
# make
# make modules_install
# make install
```

Depois do *kernel* 2.6.16, preparado para a mobilidade de rede, ter sido compilado e instalado, e depois de se ter reiniciado a máquina com o novo *kernel*, preparou-se o código fonte da NEPL para a instalação segundo as instruções do ficheiro *README.developer*, incluído no pacote da aplicação. Para aquele procedimento, nomeadamente para se poder manipular o código fonte da aplicação, foi necessário obter e instalar algumas *packages* de desenvolvimento, mais concretamente as *packages* *autoconf*, *automake*, *bison*, *byacc*, *indent* e *flex*, esta última na sua versão 2.5.33. Obtiveram-se e instalaram-se, então, as *packages* necessárias:

```
# yum install autoconf automake bison byacc indent
# wget http://mesh.dl.sourceforge.net/sourceforge/flex/flex-2.5.33.tar.gz
# tar -xzf flex-2.5.33.tar.gz
# cd flex-2.5.33
# ./configure
# make install
```

Após a instalação das *packages* necessárias à instalação da aplicação, obteve-se e aplicou-se o *patch* produzido pelo responsável do grupo Nautilus6, que permite ao *router* móvel, quando se encontra na rede origem, encaminhar com sucesso o tráfego da rede móvel para a Internet:

```
# cd /usr/src/nemo-20060725/
# wget http://www.nautilus6.org/doc/nepl-howto/patch/nemo-0.2-homenet-fix-20070109.diff
# patch -p1 < nemo-0.2-homenet-fix-20070109.diff
```

De seguida, preparou-se o código fonte da aplicação para a compilação e instalação através do comando:

```
# autoreconf -i
```

Restou então compilar e instalar a NEPL para que estivesse tudo pronto para se poder testar a mobilidade de rede:

```
# CPPFLAGS=-I/usr/src/kernel-20060725/include/ ./configure --enable-vt
# make
# make install
```

Depois de realizados os passos apresentados, o *kernel* 2.6.16, com suporte de mobilidade de rede, e a *nightly snapshot* 20060725 da NEPL, respectivamente corrigida para que o *router* móvel pudesse encaminhar o tráfego da rede móvel para a Internet, enquanto aquela se encontra na rede origem, estavam instalados e prontos a utilizar. Foi então possível prosseguir com os testes do primeiro cenário e testar a mobilidade de rede sem os problemas experimentados anteriormente. Restava apenas o problema do não envio de *Binding Acknowledgements* por parte do *home agent* em resposta aos *Binding Updates* do *router* móvel. Contudo, com a utilização da opção *OptimisticHandoff*, não havia problema em aqueles não serem enviados pois o *router* móvel podia imediatamente utilizar o túnel criado para enviar tráfego através do *home agent*, tendo em conta que o registo era sempre efectuado com sucesso. Nas configurações deste cenário apresentadas no Anexo B.1, os ficheiros de configuração do *nemod* do HA e do MR já possuem a opção *OptimisticHandoff* activa:

```
OptimisticHandoff enabled;
```

6.2.5. Testes e Resultados

Os testes efectuados neste cenário, apresentado anteriormente na Figura 6.2, serviram para observar e comprovar o funcionamento da mobilidade de rede, através da aplicação NEPL e do protocolo NEMO, num ambiente *wired*.

Com a rede móvel na rede origem, começou por se executar os *scripts* de configuração e inicialização em todas as máquinas, de forma a configurá-las e a inicializar as aplicações devidas

(*nemod* e *radvd*). De maneira a evitar comportamentos inesperados, as máquinas foram configuradas pela seguinte ordem: AR, HA, CN, MR, MNN.

Após a inicialização do *router* móvel na rede origem, observou-se o *debug* do *nemod*, Figura 6.7, e pôde ver-se que o *router* móvel cria automaticamente o túnel para o *home agent* ❶, configurando-lhe o *home address* (HoA) (*2001:1::2*) ❷. Contudo, assim que descobre, através dos *Router Advertisements* enviados pelo *home agent*, que se encontra na rede origem ❸, transfere o *home address* para a interface ligada ao *home link*, neste caso a *eth0* ❹.

```

conf_home_addr_info: HoA address 2001:1:0:0:0:0:0:2
conf_home_addr_info: is Mobile Router
conf_home_addr_info: Mobile Network Prefix 2001:1:1:0:0:0:0:0/64
conf_home_addr_info: HA address 2001:1:0:0:0:0:0:1
❶ __tunnel_add: created tunnel ip6tnl1 (9) from 2001:1:0:0:0:0:0:2 to
2001:1:0:0:0:0:0:1 user count 1
❷ flag_hoa: set HoA 2001:1:0:0:0:0:0:2/128 iif 9 [...]
conf_home_addr_info: Added new home_addr_info successfully
__md_discover_router: discover link on iface eth0 (6)
md_change_default_router: add new router
fe80:0:0:0:290:27ff:fe1a:3d9 on interface eth0 (6)
mn_addr_do_dad: DAD succeeded!
mn_move: 1688
❸ mn_move: in home net
❹ mv_hoa: move HoA 2001:1:0:0:0:0:0:2/64 from iface 9 to 6

```

Figura 6.7 – Debug do *nemod* do MR após a sua inicialização na rede origem.

Através do comando `ifconfig | grep ip6tnl1`, apresentado na Figura 6.8, pode observar-se a existência da interface túnel já criada, mas sem o *home address* configurado, encontrando-se este endereço configurado na interface de saída (*eth0*) do *router* móvel. A configuração desta interface é apresentada na Figura 6.9.

```

# ifconfig | grep ip6tnl1
ip6tnl1  Link encap:UNSPEC  HWaddr 20-01-00-01-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
        inet6 addr: fe80::211:11ff:fe24:5e54/64 Scope:Link
        UP POINTOPOINT RUNNING NOARP  MTU:1460  Metric:1
        RX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
        TX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
        collisions:0 txqueuelen:0
        RX bytes:0 (0.0 b)  TX bytes:0 (0.0 b)

```

Figura 6.8 – Verificação da existência da interface túnel no MR após a sua inicialização.

```
# ifconfig | grep eth0
eth0      Link encap:Ethernet  HWaddr 00:11:11:24:5E:54
          inet6 addr: 2001:1::2/64 Scope:Global
          inet6 addr: fe80::211:11ff:fe24:5e54/64 Scope:Link
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:14950 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:16686 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:1850552 (1.7 MiB)  TX bytes:4544870 (4.3 MiB)
          Base address:0xbc00 Memory:ff8e0000-ff900000
```

Figura 6.9 – Configuração da interface *eth0* do MR após a sua inicialização na rede origem.

Procurando por rotas por omissão (*default*) na tabela de encaminhamento do *router* móvel (comando `ip -6 route show table 0 | grep default` apresentado na Figura 6.10) verificou-se que o encaminhamento era efectuado pela interface *eth0*, sendo o endereço do *gateway*, `fe80::290:27ff:fe1a:3d9`, o endereço *link-local* da interface do *home agent* no *link* origem (*eth1*).

```
# ip -6 route show table 0 | grep default
default via fe80::290:27ff:fe1a:3d9 dev eth0 table 252 proto ntk metric 192 [...]
```

Figura 6.10 – Rota por omissão configurada no MR após a sua inicialização na rede origem.

No *home agent* pôde verificar-se que o encaminhamento do tráfego com destino à rede móvel era efectuado para o endereço *link-local* do *router* móvel através da interface ligada ao *link* origem, a *eth1*, Figura 6.11.

```
# ip -6 route show table 0 | grep 2001:1:1::/64
2001:1:1::/64 via fe80::211:11ff:fe24:5e54 dev eth1 metric 1 [...]
```

Figura 6.11 – Rota para a rede `2001:1:1::/64` (rede móvel) no HA com o MR na rede origem.

A observação do *output* destes comandos serviu para comprovar que o encaminhamento entre o *router* móvel e o *home agent* era efectuado directamente sem recurso ao túnel. Mais à frente pôde observar-se que, depois da movimentação do *router* móvel para a rede visitada, o encaminhamento era já efectuado pelo túnel.

De forma a se observar a mobilidade da rede, efectuou-se um *ping6* contínuo entre o nó da rede móvel (MNN) e o nó correspondente da Internet (CN), Figura 6.12. Desta forma era possível verificar que a conectividade se mantinha com a movimentação da rede móvel.

```
C:\>ping6 -t 2001::3

Pinging 2001::3
from 2001:1:1::2 with 32 bytes of data:

Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
[...]
```

Figura 6.12 – Início do ping6 entre o MNN e o CN com o MR na rede origem.

De seguida, movimentou-se a rede móvel para a rede visitada, conforme ilustra a Figura 6.13.

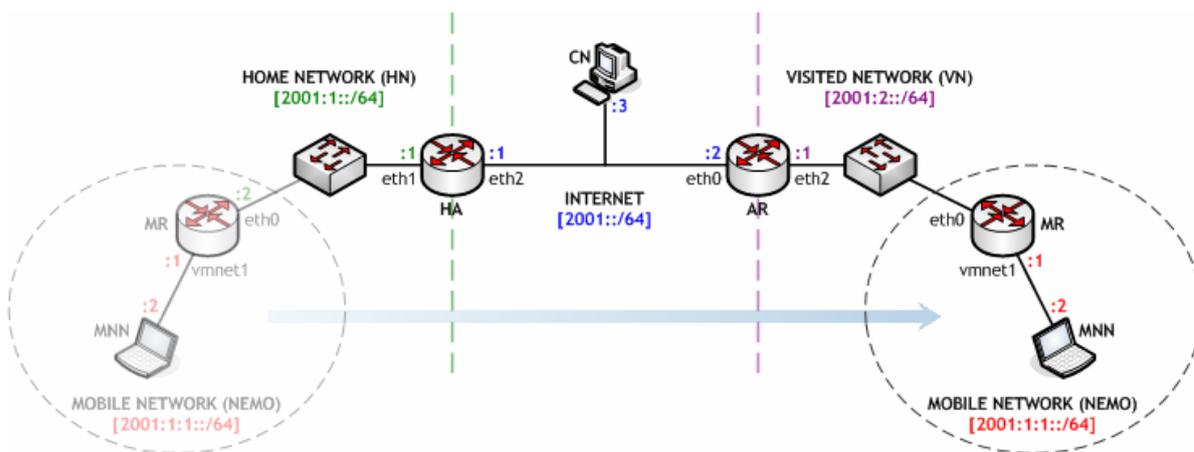


Figura 6.13 – Movimentação da rede móvel.

Após a movimentação da rede móvel pôde verificar-se que o ping6, efectuado do MNN para o CN enquanto a rede ainda se encontrava na rede origem, continuava a funcionar, mantendo-se assim a conectividade entre a rede móvel e a Internet, através da utilização dos mesmos endereços, como se pretende através da utilização da mobilidade de rede NEMO. A Figura 6.14 apresenta a continuação do ping6 após a movimentação da rede móvel.

```
[...]
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
Request timed out.
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
[...]
```

Momento do handover da rede móvel. (Home → Visited)

Figura 6.14 – Continuação do ping6 entre o MNN e o CN com o MR na rede visitada.

Como se pode observar na figura anterior, perdeu-se apenas um pacote durante o *handover* da rede origem para a rede visitada, devendo-se estas perdas ao tempo necessário para efectuar as operações de mobilidade. No caso deste cenário, os dois *switches* representados na Figura 6.14 eram apenas um, sendo as redes (ou *links*) origem e visitada representadas por duas VLANs diferentes, pelo que a mudança de rede foi efectuada alterando apenas a VLAN da porta do *switch* à qual estava ligado o *router* móvel. O processo de alteração da VLAN da porta através da consola do *switch* é quase instantâneo, pois não implica quebra da ligação física, daí apenas se ter perdido um pacote. Em alguns testes não se chegavam mesmo a perder quaisquer pacotes, sendo o tempo de resposta apenas mais elevado (cerca de 1500~2000 ms). Se a mudança de rede fosse efectuada com a quebra física da ligação, ou seja, desligando o cabo de rede do segmento da rede origem e voltando a ligar no segmento da rede visitada, perder-se-iam mais pacotes pois o tempo de restabelecer a ligação era superior, dependendo sempre as perdas do tempo que demorasse o restabelecimento da ligação.

O *debug* do *nemod* do *router* móvel, apresentado na Figura 6.15, ajuda a compreender algumas das operações efectuadas pelo *router* móvel durante o processo de *handover*:

- Após a movimentação da rede móvel para a rede visitada, o *router* móvel começa a receber *Router Advertisements* do *router* de acesso da rede visitada (AR), configurando este *router* como o seu *default router* (endereço *link-local* `fe80::2e0:29ff:fe92:769d`) ❶ e detectando que se moveu para uma rede visitada ❷;
- O *router* móvel move então o endereço que possui na sua rede origem, o *home address* (HoA) (`2001:1::2`), da interface *eth0* (índice 6 indicado na figura) para a interface *ip6tnl1* (índice 9 indicado na figura) ❸, a interface que implementa o túnel com o *home agent*;
- De seguida, o *router* móvel cria uma entrada na sua *Binding Update List* (BUL) ❹ com informação acerca dos seus endereços, e do seu registo, e envia um *Binding Update* (*Mobility Header (MH) Type 5*) para o *home agent* para registar a sua movimentação ❺;
- Por último, actualiza o túnel, criado aquando da sua inicialização, de forma a reflectir a informação do seu novo *care-of address* (`2001:2::211:11ff:fe24:5e54`) ❻, endereço que obteve na rede visitada através de auto-configuração, com base na informação divulgada nos *Router Advertisements* do AR, estabelecendo como extremos do túnel o endereço do *home agent* (`2001:1::1`) e o seu próprio *care-of address*.

Na informação da entrada da BUL existe um campo, *CN address*, que não representa o endereço no nó correspondente da Internet, mas o endereço do nó com o qual o *router* móvel se está a

registar, neste caso o *home agent*. Numa situação em que acontecesse optimização de rotas entre o *router* móvel e o nó correspondente, o *router* móvel registar-se-ia com o nó correspondente e, nesse caso, o campo *CN address* da BUL seria igual ao endereço deste nó.

```

md_expire_router: expiring router fe80:0:0:0:290:27ff:fe1a:3d9 on iface eth0 (6)
__md_discover_router: discover link on iface eth0 (6)
❶ md_change_default_router: add new router fe80:0:0:0:2e0:29ff:fe92:769d on
interface eth0 (6)
mn_move: 1688
❷ mn_move: in foreign net
❸ mv_hoa: move HoA 2001:1:0:0:0:0:0:2/128 from iface 6 to 9
mn_send_home_bu: 740
mn_get_home_lifetime: CoA lifetime 2591999 s, HoA lifetime 2591993 s, BU lifetime
60 s
process_first_home_bu: New bule for HA
❹ bul_add: Adding bule
== BUL_ENTRY ==
Home address      2001:1:0:0:0:0:0:2
Care-of address  2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
CN address        2001:1:0:0:0:0:0:1
lifetime = 60,   delay = 1500
flags: IP6_MH_BU_HOME IP6_MH_BU_ACK
mn_send_home_bu: New bule for HA
❺ mh_send: sending MH type 5
from 2001:1:0:0:0:0:0:2
to 2001:1:0:0:0:0:0:1
mh_send: local CoA 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
[...]
❻ tunnel_mod: modifying tunnel 9 end points with from 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
to 2001:1:0:0:0:0:0:1
__tunnel_mod: modified tunnel iface ip6tnl1 (9) from 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
to 2001:1:0:0:0:0:0:1

```

Figura 6.15 – Debug do *nemod* do MR após a movimentação para a rede visitada.

Na Figura 6.16 pode observar-se o *debug* do *nemod* do *home agent*, onde se pode verificar a recepção do *Binding Update* do *router* móvel ❶, a criação do túnel com extremo no seu *care-of address* ❷ e o envio do *Binding Acknowledgement* confirmando o registo ❸. Utilizando o terminal virtual disponibilizado pela aplicação, pode visualizar-se a informação deste registo guardada na *Binding Cache* (BC) do *home agent* (ver Figura 6.17).

```

1  mh_bu_parse: Binding Update Received
   ndisc_do_dad: Dad success
2  __tunnel_add: created tunnel ip6tnl1 (12) from 2001:1:0:0:0:0:1
   to 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54 user count 1
   mh_send_ba: status 0
3  mh_send: sending MH type 6
   from 2001:1:0:0:0:0:1
   to 2001:1:0:0:0:0:2
   mh_send: remote CoA 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54

```

Figura 6.16 – Debug do *nemod* do HA após a movimentação do MR para a rede visitada.

```

mip6d> bc
hoa 2001:1:0:0:0:0:2 status registered
  coa 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54 flags AH--
  local 2001:1:0:0:0:0:1
  lifetime 51 / 60 seq 7554 unreach 0 mpa - / 1320 retry 0

```

Figura 6.17 – Binding Cache do HA apresentando a informação do registo do MR.

Apesar de, como se viu, o *home agent* informar que enviava o *Binding Acknowledgement* ao *router* móvel, confirmando o seu registo, devido ao problema de que se falou na Subsecção 6.2.3, isto nunca acontecia. Na Figura 6.18 pode ver-se, através do terminal virtual do *nemod*, a entrada criada na *Binding Update List* do *router* móvel, na qual se pode observar que este, após o envio de vários *Binding Updates*, continuava à espera de um *Binding Acknowledgement*.

```

mip6d> bul
hoa 2001:1:0:0:0:0:2 cn 2001:1:0:0:0:0:1
coa 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54 flags AH-- type bul ack wait
lifetime 49 / 60 seq 7555 resend 6 delay 32(after 22s)

```

Figura 6.18 – BUL do MR indicando a espera de um *Binding Acknowledgement* do HA.

Devido ao facto de nunca receber um *Binding Acknowledgement* confirmando o seu registo e de não saber o estado desse registo perante o *home agent*, o *router* móvel continuava a enviar *Binding Updates* para o *home agent*, conforme se pode observar no *debug* do *nemod* apresentado na Figura 6.19.

```

bu_resend: Bul resend [0x8082a78] type 0
mn_get_home_lifetime: CoA lifetime 2591999 s, HoA
lifetime 2591961 s, BU lifetime 60 s
mh_send: sending MH type 5
from 2001:1:0:0:0:0:2
to 2001:1:0:0:0:0:1
mh_send: local CoA 2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
bul_update_timer: Updating timer
== BUL_ENTRY ==
Home address      2001:1:0:0:0:0:2
Care-of address  2001:2:0:0:211:11ff:fe24:5e54
CN address        2001:1:0:0:0:0:1
lifetime = 60,   delay = 3000
flags: IP6_MH_BU_HOME IP6_MH_BU_ACK

```

Figura 6.19 – Debug do *nemod* do MR indicando o reenvio do *Binding Update* para o HA.

A Figura 6.20 apresenta uma captura de um *Binding Update* enviado pelo *router* móvel para o *home agent* para registrar a sua movimentação.

```

▣ Frame 4116 (134 bytes on wire, 134 bytes captured)
▣ Ethernet II, Src: Intel_24:5e:54 (00:11:11:24:5e:54), Dst: Standard_92:76:9d (00:e0:29:92:76:9d)
▣ Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 80
  Next header: IPv6 destination option (0x3c)
  Hop limit: 64
  Source address: 2001:2::211:11ff:fe24:5e54 ①
  Destination address: 2001:1::1
▣ Destination Option Header
  Next header: Mobile IPv6 (0x87)
  Length: 2 (24 bytes)
  PadN: 4 bytes
  Option Type: 201 (0xc9) - Home Address Option
  Option Length : 16
  Home Address : 2001:1::2 (2001:1::2) ②
▣ Mobile IPv6 / Network Mobility
  Payload protocol: IPv6 no next header (0x3b)
  Header length: 6 (56 bytes)
  Mobility Header Type: Binding Update (5)
  Reserved: 0x00
  Checksum: 0x1296
  ③ Binding Update
    Sequence number: 60569
    1... .... = Acknowledge (A) flag: Binding Acknowledgement requested
    .1... .... = Home Registration (H) flag: Home Registration
    ..0. .... = Link-Local Compatibility (L) flag: No Link-Local Compatibility
    ...0 .... = Key Management Compatibility (K) flag: No Key Management Mobility Compatibility
    .... 0... ④ MAP Registration Compatibility (M) flag: No MAP Registration Compatibility
    .... ①... = Mobile Router (R) flag: Mobile Router Compatibility
    Lifetime: 15 (60 seconds)
▣ Mobility options
  PadN: 2 bytes
  Alternate care-of address: 2001:2::211:11ff:fe24:5e54 (2001:2::211:11ff:fe24:5e54) ⑤
  PadN: 4 bytes
▣ Mobile Network Prefix
  Mobile Network Prefix Length: 64
  Mobile Network Prefix: 2001:1:1:: (2001:1:1::) ⑥

```

Figura 6.20 – Captura do *Binding Update* enviado pelo MR para se registrar no HA.

Nesta captura pode ver-se que o *Binding Update* foi enviado pelo *router* móvel quando já se encontrava na rede visitada pois o endereço origem do pacote IPv6 é o seu *care-of address*, sendo o destino o endereço do *home agent* ❶. O pacote IPv6 possui uma *Home Address Option* na qual *router* móvel indica o seu *home address* na rede origem ❷, *home address* esse que o *router* móvel pretende registar no seu *home agent*, de forma a relacioná-lo com o seu *care-of address* actual ❸. Na mensagem *Binding Update* propriamente dita ❹ podem observar-se algumas das alterações em relação aos tipos e formatos das mensagens apresentadas na Secção 3.3, nomeadamente a existência da *flag R* activa (i.e., com o valor “1”) ❺, introduzida pela especificação NEMO para um nó móvel indicar que desempenha funções de *router* móvel, e a existência de uma *Mobile Network Prefix Option* na qual este *router* móvel indica qual o prefixo da rede móvel que está a servir, neste caso o prefixo *2001:1:1::/64* ❻.

A presença desta *Mobile Network Prefix Option*, com informação do prefixo que o *router* móvel está a servir, é indicativa da utilização do modo de operação explícito (ver Subsecção 3.4.2). A configuração deste modo de operação do protocolo, e da aplicação, foi feita explicitamente no ficheiro de configuração do *nemod* do MR (ver Anexo B.1.7) através da activação da opção `MobRtrUseExplicitMode`, mais concretamente:

```
MobRtrUseExplicitMode enabled;
```

O modo de operação explícito é o modo de operação por omissão do *nemod*.

Configurando o *router* móvel para operar no modo implícito, verifica-se que a única diferença para o modo explícito é que o *router* móvel não envia nenhuma *Mobile Network Prefix Option* nos *Binding Updates* com informação acerca do prefixo da rede móvel. Não informando, assim, o *home agent* do prefixo (ou prefixos) que serve. Esta configuração é feita desactivando a opção `MobRtrUseExplicitMode` no ficheiro de configuração do *nemod*, mais concretamente:

```
MobRtrUseExplicitMode disabled;
```

Neste caso, o *home agent* obtém a informação do prefixo da rede móvel através do seu ficheiro de configuração (ver Anexo B.1.4), no qual foi configurado que o *router* móvel com o *home address* *2001:1::2* está associado ao prefixo *2001:1:1::/64* e pode registar-se para esse prefixo:

```
BindingAclPolicy 2001:1::2 (2001:1:1::/64) allow;
```

Assim, quando o *home agent* recebe um *Binding Update* daquele *router* móvel, activa automaticamente o encaminhamento para aquele prefixo através do túnel configurado com o *router* móvel em questão.

Como o comportamento por omissão do *home agent* é a negação de qualquer registo (`DefaultBindingAclPolicy deny;`), a configuração anterior é necessária tanto no modo implícito como no modo explícito, servindo para o *home agent* saber que *routers* móveis estão autorizados a registarem que prefixos.

Após a movimentação da rede móvel e o registo do *router* móvel perante o seu *home agent*, a configuração do cenário 1 era a apresentada na Figura 6.21. Destacam-se nesta figura a existência do *care-of address* na interface de saída do *router* móvel e o túnel bidireccional IPv6/IPv6 entre este *router* e o *home agent*. Era pelo túnel bidireccional criado que o tráfego de e para a rede móvel, enquanto esta se encontrava na rede visitada, era encaminhado.

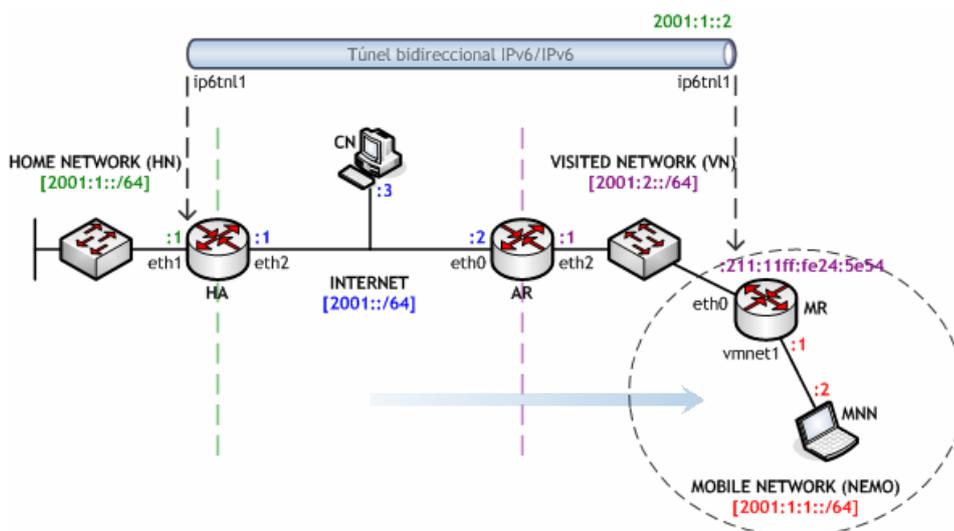


Figura 6.21 – Configuração do cenário de testes após o movimento da rede móvel.

Nas figuras seguintes, Figura 6.22 e Figura 6.23, podem ver-se, respectivamente, as configurações das interfaces *eth0* e *ip6tnl1* do *router* móvel, quando este se encontra na rede visitada, obtidas através do comando `ifconfig`. Comprova-se assim a existência do *care-of address* `2001:2::211:11ff:fe24:5e54` na interface de saída daquele *router* e do *home address* `2001:1::2` na interface que implementa o túnel bidireccional entre o MR e o HA.

Através da Figura 6.24 e da Figura 6.25 pode ver-se que, quando a rede móvel se encontrava na rede visitada, o tráfego, respectivamente, de e para a rede móvel era encaminhado pelo túnel criado pelo MR e pelo HA, com base nas rotas de encaminhamento existentes nas suas tabelas.

```
# ifconfig | grep eth0
eth0      Link encap:Ethernet  HWaddr 00:11:11:24:5E:54
          inet6 addr: 2001:2::211:11ff:fe24:5e54/64 Scope:Global
          inet6 addr: fe80::211:11ff:fe24:5e54/64 Scope:Link
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:18684 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:21905 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:2316360 (2.2 MiB)  TX bytes:5835088 (5.5 MiB)
          Base address:0xbc00 Memory:ff8e0000-ff900000
```

Figura 6.22 – Configuração da interface *eth0* do MR na rede visitada.

```
# ifconfig | grep ip6tnl1
ip6tnl1   Link encap:UNSPEC  HWaddr 20-01-00-02-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
          inet6 addr: 2001:1::2/128 Scope:Global
          inet6 addr: fe80::211:11ff:fe24:5e54/64 Scope:Link
          UP POINTOPOINT RUNNING NOARP  MTU:1460  Metric:1
          RX packets:73 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:67 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:0
          RX bytes:5840 (5.7 KiB)  TX bytes:8040 (7.8 KiB)
```

Figura 6.23 – Configuração da interface túnel (*ip6tnl1*) do MR na rede visitada.

```
# ip -6 route show table 0 | grep default
default from 2001:1:1::/64 dev ip6tnl1 table 252 proto ntk metric 192 [...]
```

Figura 6.24 – Rota por omissão configurada no MR na rede visitada.

```
# ip -6 route show table 0 | grep 2001:1:1::/64
2001:1:1::/64 dev ip6tnl1 table 252 proto ntk metric 192 [...]
```

Figura 6.25 – Rota para a rede *2001:1:1::/64* (rede móvel) no HA com o MR na rede visitada.

Observando a captura, à saída do *router* móvel, de um *Echo Request* ❶ do *ping6* efectuado do nó da rede móvel para o nó correspondente da Internet, pode ver-se o encapsulamento do pacote IPv6 com origem no MNN (*2001:1:1::2*) e destinado ao CN (*2001::3*) ❷ dentro de outro pacote IPv6 com origem no MR (*2001:2::211:11ff:fe24:5e54*) e destinado ao HA (*2001:1::1*) ❸ (ver Figura 6.26). Este encapsulamento IPv6/IPv6 é a prova da utilização do túnel para encaminhar o tráfego da rede móvel. O *Echo Reply* do CN, em resposta a este *Echo Request* do MNN, apesar de não ser aqui mostrado, seguia o mesmo caminho, sendo encaminhado pelo *home agent* para o

router móvel através do túnel, sendo depois entregue pelo MR ao MNN. Ao nível da camada de ligação, pode ver-se que o pacote foi enviado pelo *router* móvel para o *router* de acesso da rede visitada, pois o endereço de destino da *frame Ethernet* é o endereço MAC daquele *router* 4. A semelhança entre este endereço e o endereço *link-local* daquele *router* que se viu na Figura 6.15 (*fe80:0:0:0:2e0:29ff:fe92:769d*) é clara.

```

Frame 5050 (134 bytes on wire, 134 bytes captured)
Ethernet II, Src: Intel_24:5e:54 (00:11:11:24:5e:54), Dst: Standard_92:76:9d (00:e0:29:92:76:9d)
Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 80
  Next header: IPv6 (0x29)
  Hop limit: 64
  Source address: 2001:2::211:11ff:fe24:5e54
  Destination address: 2001:1::1
Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 40
  Next header: ICMPv6 (0x3a)
  Hop limit: 63
  Source address: 2001:1:1::2
  Destination address: 2001:1:1::3
Internet Control Message Protocol v6
  Type: 128 (Echo request)
  Code: 0
  Checksum: 0x9021 [correct]
  ID: 0x0000
  Sequence: 0x04cf
  Data (32 bytes)

```

Figura 6.26 – Captura de um *Echo Request* de um *ping6* do MNN para o CN à saída do MR.

Após estes testes verificou-se que a mobilidade de rede, utilizando o protocolo NEMO e a implementação NEPL, realmente funciona, pelo menos num ambiente *wired*. De seguida moveu-se a rede móvel de novo para a rede origem de forma a se verificar se o processo de “regresso a casa” era efectuado com sucesso, nomeadamente se a desvinculação do *router* móvel perante o seu *home agent* e a eliminação do túnel bidireccional eram realizadas como se esperava, e se o encaminhamento voltava a ser feito normalmente sem recurso ao túnel configurado aquando da movimentação.

Depois de se mover a rede móvel de novo para a rede origem, i.e., desligando o *router* móvel do segmento de rede visitado e ligando-o novamente ao segmento de rede origem (neste caso, alterando apenas a VLAN da porta do *switch* à qual estava ligado o *router* móvel para a VLAN da rede origem), foi possível verificar que o *ping6* contínuo, ainda a decorrer, efectuado entre o MNN e o CN antes de se mover a rede móvel para a rede visitada, continuava a funcionar, tendo-se perdido, mais uma vez, apenas um pacote. Um extracto do *ping6* durante o *handover* para a rede origem pode ser visto na Figura 6.27.

```
[...]
Reply from 2001::3: bytes=32 time<1ms
Reply from 2001::3: bytes=32 time=1ms
Request timed out.
Reply from 2001::3: bytes=32 time=23ms
Reply from 2001::3: bytes=32 time=1ms
[...]
```

Momento do *handover*
da rede móvel.
(Visited → Home)

Figura 6.27 – Continuação do *ping6* entre o MNN e o CN após o “regresso a casa” do MR.

Mais uma vez, observou-se o *debug* do *nemod*, tanto no HA como no MR, de forma a perceber melhor os vários passos seguidos durante a anulação do registo do *router* móvel perante o seu *home agent*. Na Figura 6.28 apresenta-se o *debug* do *nemod* do *router* móvel e entre as diversas operações efectuadas destacam-se as seguintes:

- Já na rede origem, o *router* móvel deixa de receber *Router Advertisements* do *router* de acesso da rede visitada e recomeça a receber RAs do *home agent*, pelo que reconfigura este *router* como seu *default router* (endereço *link-local* `fe80:0:0:0:290:27ff:fe1a:3d9`) ❶;
- Como o prefixo divulgado nestes *Router Advertisements* coincide com o prefixo do seu *home address* (`2001:1::/64`), o *router* móvel descobre que se encontra na sua rede origem ❷ e inicia o processo de “regresso a casa”, começando por mover o seu *home address* da interface `ip6tnl1` (índice 9 indicado na figura) para a interface `eth0` (índice 6 indicado na figura) ❸, a sua interface de saída ligada ao *link* origem;
- De seguida, o *router* móvel envia um *Binding Update* ❹ para o *home agent* colocando no campo *care-of address* dessa mensagem o seu *home address* ❺, conforme definido na especificação da Mobilidade IPv6 [28], indicando que pretende anular o seu registo, não desejando que o *home agent* continue a encaminhar o tráfego destinado à rede móvel pelo túnel;
- Seguidamente, o *router* móvel actualiza o túnel, terminando-o no seu *home address* e não no *care-of address* ❻, pois esse endereço já não existe;
- O *router* móvel recebe então o *Binding Acknowledgement* do *home agent* ❼, confirmando a anulação do seu registo (*status 0*), e elimina a informação do registo constante numa entrada da sua *Binding Update List* ❽.

Após estes passos, o *router* móvel encontrava-se na rede origem ❾ e toda a comunicação entre a rede móvel e a Internet voltava a ser realizada normalmente, como se nunca se tivesse movido.

```

❶ md_change_default_router: add new router fe80:0:0:0:290:27ff:fe1a:3d9 on interface
eth0 (6)
mn_move: 1688
❷ mn_move: in home net
❸ mv_hoa: move HoA 2001:1:0:0:0:0:2/64 from iface 9 to 6
mn_send_home_bu: 740
mn_get_home_lifetime: BU lifetime 0 s
mn_send_home_bu: Moved to home network
mn_pol_ext_cleanup:
mn_send_home_bu: Bule for HA exists. Updating it.
❹ mh_send: sending MH type 5
from 2001:1:0:0:0:0:2
to 2001:1:0:0:0:0:1
❺ mh_send: local CoA 2001:1:0:0:0:0:2
bul_update_timer: Updating timer
== BUL_ENTRY ==
Home address      2001:1:0:0:0:0:2
Care-of address 2001:1:0:0:0:0:2
CN address        2001:1:0:0:0:0:1
lifetime = 0, delay = 1000
flags: IP6_MH_BU_HOME IP6_MH_BU_ACK
❻ tunnel_mod: modifying tunnel 9 end points with from 2001:1:0:0:0:0:2 to
2001:1:0:0:0:0:1
__tunnel_mod: modified tunnel iface ip6tnl1 (9) from 2001:1:0:0:0:0:2 to
2001:1:0:0:0:0:1
mn_recv_ba: 992
❼ mn_recv_ba: Got BA from 2001:1:0:0:0:0:1 to home address 2001:1:0:0:0:0:2 with
coa 0:0:0:0:0:0:0 and status 0
❽ mn_recv_ba: Dumping corresponding BULE
== BUL_ENTRY ==
[...]
bul_delete: Deleting bule
== BUL_ENTRY ==
[...]
mn_addr_do_dad: DAD succeeded!
mn_move: 1688
❾ mn_move: in home net

```

Figura 6.28 – Debug do *nemod* do MR após a sua movimentação para a rede origem.

Na Figura 6.29 é apresentado o *debug* do *nemod* do *home agent*, no qual é indicada a recepção do *Binding Update* do *router* móvel ❶, seguida da alteração e eliminação do túnel existente entre si ❷, e posterior envio do *Binding Acknowledgement* para aquele *router* confirmando a sua desvinculação (*status 0*) ❸.

```

1  mh_bu_parse: Binding Update Received
   tunnel_mod: modifying tunnel 9 end points with from 2001:1:0:0:0:0:0:1
   to 2001:1:0:0:0:0:0:2
   __tunnel_mod: modified tunnel iface ip6tnl1 (9) from 2001:1:0:0:0:0:0:1
   to 2001:1:0:0:0:0:0:2
2  __tunnel_del: tunnel ip6tnl1 (9) from 2001:1:0:0:0:0:0:1 to
   2001:1:0:0:0:0:0:2 user count decreased to 0
   __tunnel_del: tunnel deleted
   mh_send_ba: status 0
3  mh_send: sending MH type 6
   from 2001:1:0:0:0:0:0:1
   to 2001:1:0:0:0:0:0:2

```

Figura 6.29 – Debug do *nemod* do HA após a movimentação do MR para a rede origem.

Na Figura 6.30 e na Figura 6.31 apresentam-se, respectivamente, as capturas do *Binding Update* e do *Binding Acknowledgement* trocados entre o *router* móvel e o *home agent*. O primeiro enviado pelo *router* móvel para o *home agent* para anular o seu registo com este, o segundo enviado pelo *home agent* para o *router móvel* confirmando a anulação do seu registo.

```

Frame 13267 (86 bytes on wire, 86 bytes captured)
Ethernet II, Src: Intel_24:5e:54 (00:11:11:24:5e:54), Dst: Intel_1a:03:d9 (00:90:27:1a:03:d9)
Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 32
  Next header: Mobile IPv6 (0x87)
  Hop limit: 64
  Source address: 2001:1::2
  Destination address: 2001:1::1 1
Mobile IPv6 / Network Mobility
  Payload protocol: IPv6 no next header (0x3b)
  Header length: 3 (32 bytes)
  Mobility Header Type: Binding Update (5)
  Reserved: 0x00
  Checksum: 0xc4c8
Binding Update
  Sequence number: 53872
  1... .. = Acknowledge (A) flag: Binding Acknowledgement requested
  .1. ... = Home Registration (H) flag: Home Registration
  ..0. ... = Link-Local Compatibility (L) flag: No Link-Local Address Compatibility
  ...0 ... = Key Management Compatibility (K) flag: No Key Management Mobility Compatibility
  ... 0... = MAP Registration Compatibility (M) flag: No MAP Registration Compatibility
  ... .1.. = Mobile Router (R) flag: Mobile Router Compatibility
  Lifetime: 0 (0 seconds) 3
Mobility options
  PadN: 2 bytes
  Alternate care-of address: 2001:1::2 (2001:1::2) 2

```

Figura 6.30 – Captura do *Binding Update* enviado pelo MR para o HA para se desvincular.

Neste *Binding Update* pode ver-se que a origem do pacote IPv6 é o *home address* do *router* móvel 1 e não o seu *care-of address*, como acontecia nos *Binding Updates* enviados, quando o *router* móvel se encontrava na rede visitada, para se registar. Destaca-se também neste *Binding Update* a presença do *home address* no campo do *care-of address* 2, o que indica que este se

trata de um *Binding Update* de anulação de registo, e o campo *Lifetime* preenchido a “0” ³, facto também indicativo de que este *Binding Update* pretendia anular o registo do *router* móvel no *home agent*.

Já no *Binding Acknowledgement* do *home agent* destaca-se o código de estado “0” do *Binding Acknowledgement* ⁴ e o campo *Lifetime* preenchido também a “0” ⁶, indicando a aceitação do *Binding Update* do *router* móvel e o sucesso da sua desvinculação.

Como se viu na Subsecção 3.3.2, a especificação NEMO introduz uma nova *flag* R nos *Binding Acknowledgements*, servindo esta para o *home agent* indicar se suporta ou não o registo de *routers* móveis. Neste *Binding Acknowledgement* pode ver-se esta *flag* R a “1”, indicativa de que este *home agent* suporta o registo de *routers* móveis ⁵, como, aliás, já se tinha verificado.

```

⊞ Frame 13281 (70 bytes on wire, 70 bytes captured)
⊞ Ethernet II, Src: Intel_1a:03:d9 (00:90:27:1a:03:d9), Dst: Intel_24:5e:54 (00:11:11:24:5e:54)
⊞ Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 16
  Next header: Mobile IPv6 (0x87)
  Hop limit: 64
  Source address: 2001:1::1
  Destination address: 2001:1::2
⊞ Mobile IPv6 / Network Mobility
  Payload protocol: IPv6 no next header (0x3b)
  Header length: 1 (16 bytes)
  Mobility Header Type: Binding Acknowledgement (6)
  Reserved: 0x00
  Checksum: 0xaaad
⊞ Binding Acknowledgement
  Status: Binding Update accepted (0) 4
  0... .. = Key Management Compatibility (K) flag: No Key Management Mobility Compatibility
  5 (1) . ... = Mobile Router (R) flag: Mobile Router Compatibility
  Sequence number: 53872
  Lifetime: 0 (0 seconds) 6
⊞ Mobility options
  PadN: 4 bytes

```

Figura 6.31 – Captura do *Binding Acknowledgement* enviado pelo HA para o MR.

Antes de se terminar a apresentação dos testes efectuados neste primeiro cenário apresenta-se um gráfico de fluxo, Figura 6.32, que resume a troca de mensagens NEMO entre o MR e o HA. Na figura é possível visualizar qual a origem e destino das mensagens, nomeadamente no que refere aos endereços do *router* móvel, *care-of address* (CoA) e *home address* (HoA). É também possível observar que, durante o processo de registo do *router* móvel com o *home agent*, quando a rede móvel se move para a rede visitada, o *home agent* não envia nenhum *Binding Acknowledgement* ao *router* móvel em resposta aos seus *Binding Updates*, conforme já se tinha visto, apenas o fazendo em resposta ao *Binding Update* de anulação de registo do *router* móvel, quando a rede móvel volta para a rede origem.

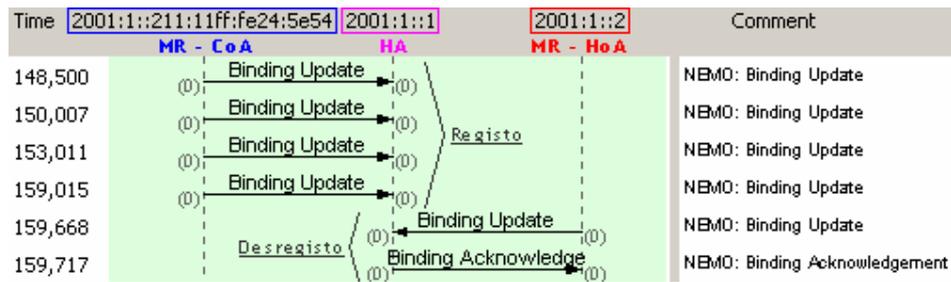


Figura 6.32 – Gráfico de fluxo das mensagens NEMO trocadas entre o MR e o HA.

Com a observação de que a mobilidade de rede funciona, tanto na movimentação da rede móvel para uma rede visitada como no seu “regresso a casa”, e após se ter analisado em detalhe os procedimentos executados pelo *router* móvel e pelo *home agent* durante os vários *handovers*, deram-se por terminados os testes no cenário 1.

6.3. Cenário 2 – Wireless

Conforme apresentado na Subsecção 5.1.4, neste cenário pretendia observar-se o comportamento do protocolo NEMO e demonstrar o seu funcionamento através da sua implementação NEPL, num cenário *wireless* no qual existisse uma mobilidade efectiva da rede móvel, ou seja, movimentando-se realmente a rede, espacialmente de uma rede para outra. Para isso pretendiam-se utilizar aplicações de uso real, ou seja, aplicações que os utilizadores da Internet realmente utilizem (e não apenas o simples *ping6*), nomeadamente aplicações que comunicassem em UDP e TCP, de forma a que se pudesse visualizar, entre outras coisas:

- O comportamento das comunicações durante os *handovers* da rede móvel;
- Se existiam ou não perdas de pacotes e/ou de dados durante esses *handovers*;
- A manutenção das sessões TCP durante os *handovers*.

6.3.1. Descrição

Com o propósito de se atingirem os objectivos propostos, implementou-se o cenário ilustrado na Figura 6.33. Neste cenário, de forma a se observar o sucesso de comunicações UDP e TCP durante o movimento da rede móvel, o nó correspondente da Internet (CN) e o *router* de acesso da rede visitada (AR) implementam, respectivamente, um servidor de *streaming* (VLC media player) que envia um *stream* de vídeo para o nó da rede móvel (MNN) e um servidor de SSH

6.3.2. Configuração

A configuração deste cenário é idêntica à do cenário 1, estando as alterações associadas ao facto de se ter alterado a máquina que implementa o *router* móvel, assim com a sua interface de rede. Neste sentido, as alterações às configurações do primeiro cenário passaram por:

- Alterar o endereço *link-local* do *router* móvel na rota de encaminhamento para a rede móvel presente no *script* de configuração e inicialização do *home agent*, de forma a reflectir o novo endereço *link-local* da interface de saída do *router* móvel (*fe80::211:21ff:fec2:cae*);
- Alterar, no *script* de configuração do *router* móvel e no ficheiro de configuração do seu *nemod*, o código da interface de saída do *router* móvel para *eth1*, o código desta interface na nova máquina;
- Configurar na interface de rede do MR o mesmo SSID¹ configurado nos APs das redes origem e visitada, de forma a que o MR se possa associar a eles e às suas redes.

Como neste cenário os *routers* de acesso das redes origem e visitada (o HA para a rede origem e o AR para a rede visitada) se encontravam afastados fisicamente, não era possível estabelecer conectividade IPv6 directa entre si, por exemplo através de um cabo cruzado. Por este motivo, a forma de os interligar passou por ligar cada *router* à rede IPv4 da ESTG na sala onde se encontravam (2.2 e 2.7) e estabelecer um túnel IPv6 sobre IPv4 (IPv6/IPv4) entre si. Esta situação é ilustrada na Figura 6.34.

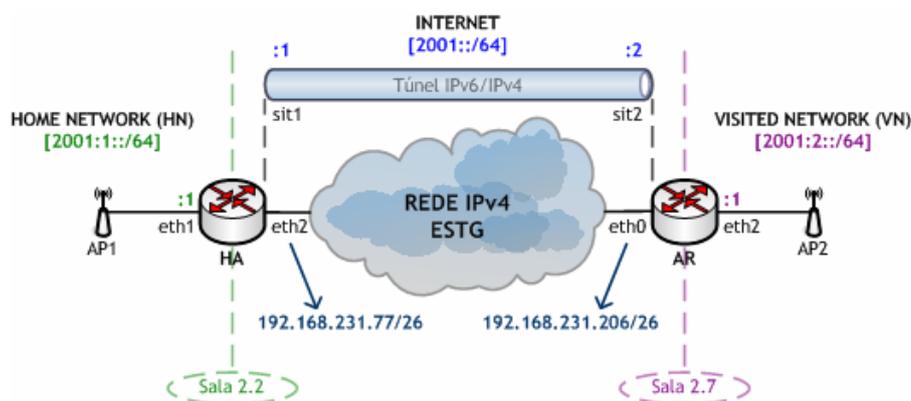


Figura 6.34 – Ilustração do túnel estabelecido entre o HA e o AR através da rede da ESTG.

¹ Um SSID (*Service Set Identifier*) é um identificador alfanumérico único que os dispositivos clientes utilizam para se associarem a um AP. O SSID ajuda os dispositivos a distinguirem entre múltiplas redes *wireless* existentes na sua vizinhança. Múltiplos APs numa mesma rede ou subrede podem, e devem, partilhar o mesmo SSID. [12]

As configurações do túnel assim como as alterações às configurações do primeiro cenário, mencionadas anteriormente, são apresentadas no Anexo B.2 com o devido destaque. Todas as configurações deste cenário que não se apresentam no anexo são idênticas às do cenário 1.

6.3.3. Testes e Resultados

O primeiro teste realizado neste cenário não se relacionou directamente com a mobilidade de rede, mas com um problema ocorrido no decorrer do projecto do ano lectivo anterior (“*Testes de Mobilidade IPv6*”) [4]. O autor daquele projecto relatou que os APs Cisco utilizados não encaminhavam “*pacotes recebidos com destino a um endereço layer 2 multicast*”, pelo que os *Router Advertisements* enviados pelos *routers* e os *Router Solicitations* enviados pelo nó móvel não eram encaminhados pelos APs, e dessa forma o nó móvel não detectava o seu movimento e não efectuava o *handover* (ver [4], p. 78).

Os APs utilizados neste cenário (Cisco Aironet 350 Series) não apresentaram quaisquer problemas relativamente a este assunto, encaminhando com sucesso qualquer do tráfego IPv6 trocado entre as máquinas do cenário. Porém, os APs utilizados no projecto anterior eram de outro modelo (Cisco Aironet 1200 Series), pelo que não foi possível determinar com exactidão a causa dos problemas, pois não foi possível, neste projecto, efectuar testes com estes APs.

Como neste projecto não houve problemas relativamente ao encaminhamento dos *Router Advertisements* dos *routers* do cenário (HA e AR), a possibilidade de implementação do cenário só com interfaces *wireless* e sem APs, sugerido na Subsecção 5.1.4, não se colocou, pois tal não era necessário.

Após se ter verificado que não se teriam problemas com os APs partiu-se para os testes relacionados com a mobilidade de rede. Neste cenário efectuaram-se dois testes principais para observar o comportamento da mobilidade de rede:

1. Envio de um *stream* de vídeo de um servidor de *streaming* da Internet (CN) para o nó da rede móvel (MNN) e observação de que esse *stream* continua a ser recebido após a movimentação da rede móvel para a rede visitada, mesmo verificando-se a perda de alguns segundos de vídeo;
2. Estabelecimento de uma sessão SSH entre o nó da rede móvel e um determinado servidor da Internet (AR) e observação de que, após o *handover* da rede móvel para a rede visitada, a sessão SSH é mantida, assim como a correspondente sessão TCP.

Pretendia-se utilizar em ambos os testes o MIPv6 Tester [83] para medir os tempos médios de *handover* da rede móvel, da rede origem para a rede visitada e vice-versa, proporcionados pelo protocolo NEMO e pela aplicação NEPL, de forma a se compararem com os tempos proporcionados pelo MIPv6 e MIPL obtidos no desenvolvimento do projecto anterior [4]. Porém, esta aplicação (MIPv6 Tester) funciona com base no envio e recepção de *Binding Updates* e *Binding Acknowledgements*, pelo que, devido ao problema de o *home agent* não enviar *Binding Acknowledgements* em resposta aos *Binding Updates* do *router* móvel, a aplicação não conseguia medir os tempos de *handover*, não tendo sido assim possível a sua utilização.

6.3.3.1. Streaming/UDP

Ao se tentar efectuar este primeiro teste, verificou-se que, no HA, não se conseguia realizar uma ligação *bridged* entre a máquina virtual que implementava o CN e o túnel (interface *sit1*) estabelecido entre o HA e o AR. Esta ligação *bridged* era fundamental para que se conseguisse simular a presença do CN na Internet, de modo a este enviar um *stream* de vídeo para o MNN. Devido a este problema, este teste não foi efectuado com as duas redes separadas fisicamente recorrendo ao túnel, mas com os dois *routers* (HA e AR) juntos, ou seja, na mesma sala (sala 2.2), e ligados directamente entre si, como acontecia no primeiro cenário. Desta forma, a ligação *bridged* entre a interface *eth2* do HA e a máquina virtual CN poderia ser efectuada, simulando-se a localização do CN na Internet.

De forma a que cada AP estivesse associado a uma rede diferente (rede origem para o AP1 e rede visitada para o AP2), e de forma a que o MR pudesse distinguir os dois APs e, por conseguinte, as duas redes, configuraram-se SSIDs diferentes nos dois APs (“MIPv6/NEMO – Rede Origem” no AP1 e “MIPv6/NEMO – Rede Visitada” no AP2). A movimentação do MR de uma rede para a outra era feita alterando o SSID da sua interface *wireless*. Desta forma, o MR deixava de estar associado ao AP a que estava associado antes (SSID anterior), passando a estar associado ao AP no qual estava configurado o novo SSID configurado na sua interface *wireless*. Esta alteração era feita recorrendo ao seguinte comando, substituindo-se `<new_ssid>` pelo SSID da respectiva rede para onde se queria mover a rede móvel:

```
# iwconfig eth1 essid <new_ssid>
```

Após se ter o cenário operacional como pretendido, e após a configuração e inicialização de todas as máquinas, colocou-se o nó correspondente a enviar o *stream* de vídeo, Figura 6.35, para o nó da rede móvel e configurou-se este para receber o referido vídeo, Figura 6.36. Inicialmente a rede móvel encontrava-se na rede origem.



Figura 6.35 – VLC media player no servidor de *streaming* (CN) a enviar o *stream* vídeo.



Figura 6.36 – VLC media player no cliente de *streaming* (MNN) a receber o *stream* de vídeo.

Pôde verificar-se que o *stream* era correctamente recebido pelo nó da rede móvel, sendo encaminhado pelo *home agent*, do nó correspondente para o *router* móvel, e por este para o nó da rede móvel. A Figura 6.37 ilustra como é efectuado o encaminhamento do *stream* de vídeo desde a sua origem (CN) até ao seu destino (MNN) (setas tracejadas a laranja), quando a rede móvel se encontra na rede origem.

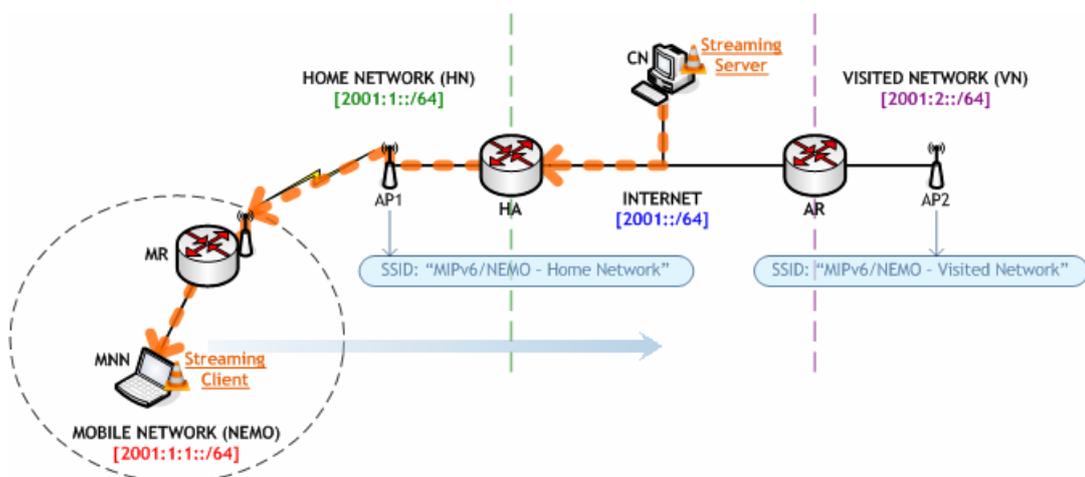


Figura 6.37 – Encaminhamento do *stream* de vídeo com a rede móvel na rede origem.

Na Figura 6.38 apresenta-se uma captura, à entrada da interface de saída do *router* móvel, de um pacote do *stream* enviado pelo CN, podendo verificar-se que o pacote tem origem no nó correspondente (endereço `2001::3`) e destina-se ao nó da rede móvel (endereço `2001:1:1::2`) ❶. Pode também verificar-se que, ao nível da camada de ligação, o pacote foi realmente enviado pelo *home agent* (endereço MAC `00:90:27:1a:03:d9`) para o *router* móvel (endereço MAC `00:11:21:c2:0e:ae`) ❷.

```

⊞ Frame 12089 (1390 bytes on wire, 1390 bytes captured)
⊞ Ethernet II, Src: Intel_1a:03:d9 (00:90:27:1a:03:d9), Dst: Cisco_c2:0e:ae (00:11:21:c2:0e:ae)
⊞ Internet Protocol Version 6
    Version: 6
    Traffic class: 0x00
    Flowlabel: 0x00000
    Payload length: 1336
    Next header: UDP (0x11)
    Hop limit: 127
    Source address: 2001::3
    Destination address: 2001:1:1::2 ❶
⊞ User Datagram Protocol, Src Port: 1025 (1025), Dst Port: 1234 (1234)
⊞ Real-Time Transport Protocol
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x44 CC=9
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=15
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=0
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x44 CC=10
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=1
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=2
⊞ ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=3

```

Figura 6.38 – Captura, à entrada da interface de saída do MR, de um pacote do *stream*.

Depois de se ter verificado que o encaminhamento era efectuado como se esperava, movimentou-se a rede móvel para a rede visitada, de forma a verificar se o vídeo continuava a ser correctamente recebido na rede móvel. Esta movimentação foi feita alterando o SSID da interface *wireless* do *router* móvel para o configurado no AP da rede visitada (“*MIPv6/NEMO – Visited Network*”):

```
# iwconfig eth1 essid "MIPv6/NEMO - Visited Network"
```

Após esta alteração, verificou-se uma breve perturbação (2~3 segundos) na recepção do vídeo no nó da rede móvel, sendo esta perturbação indicativa de que se tinha efectuado o *handover* para a rede visitada e se tinham perdido alguns pacotes do *stream*. Após os escassos momentos em que o vídeo ficou bloqueado, pôde verificar-se que este voltava a ser reproduzido na perfeição pelo nó da rede móvel, já na rede visitada.

Este processo é completamente transparente, tanto para o nó correspondente, que não sabe que o nó para o qual está a enviar o *stream* de vídeo pertence a uma rede móvel, como para o nó da rede móvel, que não possui qualquer conhecimento de que a sua rede é móvel. O processo de movimentação e *handover* é totalmente assegurado pelo *router* móvel, que se regista no *home*

agent quando se move, e pelo *home agent*, que encaminha o tráfego para a posição actual do *router* móvel.

A Figura 6.39 ilustra como é realizado o encaminhamento do *stream* de vídeo desde a sua origem (CN) até ao seu destino (MNN), quando a rede móvel se encontra na rede visitada. Nesta situação o *home agent* encaminha o tráfego do nó correspondente para o *router* móvel através do túnel estabelecido com este (setas tracejadas a laranja). Por sua vez, o tráfego encapsulado no túnel é encaminhado para o *router* móvel através do *router* de acesso (seta tracejadas a azul).

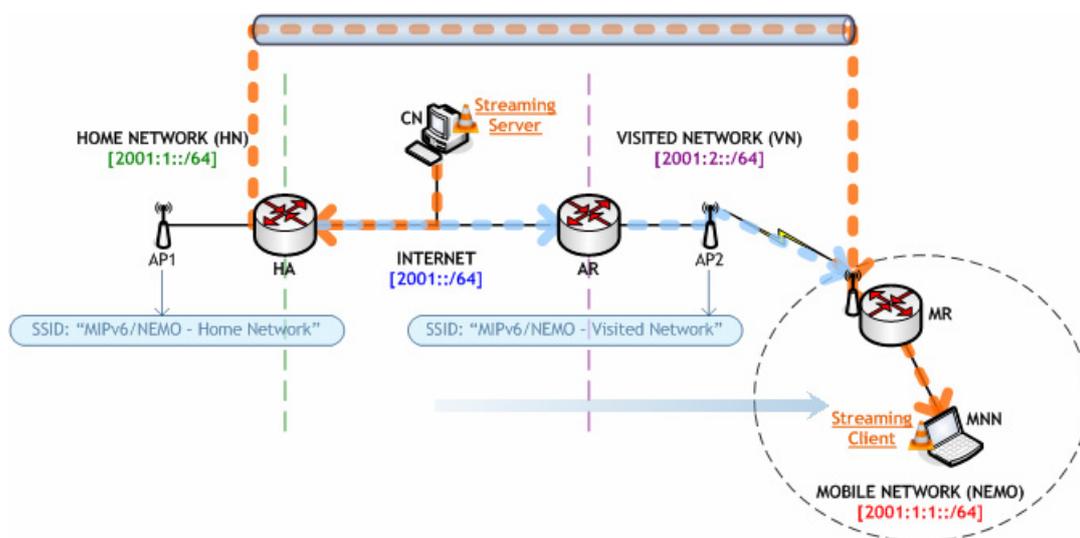


Figura 6.39 – Encaminhamento do *stream* de vídeo com a rede móvel na rede visitada.

Na Figura 6.40 pode ver-se uma captura, à entrada da interface de saída do *router* móvel, quando este se encontrava na rede visitada, de um pacote do *stream* enviado pelo CN. Pode observar-se que o pacote IPv6, que transporta o *stream*, com origem no nó correspondente ($2001::3$) e destinado ao nó da rede móvel ($2001:1:1::2$) ❶ segue encapsulado num outro pacote IPv6 com origem no endereço do *home agent* no *home link* ($2001:1::1$) e destinado ao *care-of address* do *router* móvel ($2001:2::211:21ff:fec2:ea$) ❷, o endereço actual deste *router* na rede visitada. É possível verificar que, ao nível da camada de ligação, o pacote foi realmente enviado pelo *router* de acesso (endereço MAC $00:e0:29:92:76:9d$) para o *router* móvel (endereço MAC $00:11:21:c2:0e:ae$) ❸. Pode também observar-se que o pacote que transporta o *stream* de vídeo em questão se trata de um pacote RTP ❹.

Após estes testes moveu-se a rede móvel de novo para a rede origem:

```
# iwconfig eth1 essid "MIPv6/NEMO - Home Network"
```

Após esta movimentação, verificou-se que, após a breve perturbação na recepção do vídeo no nó da rede móvel, o vídeo continuava a ser recebido em perfeitas condições. Efectuaram-se estes testes diversas vezes, tendo-se verificado sempre o sucesso da mobilidade da rede neste cenário.

```

Frame 12159 (1430 bytes on wire, 1430 bytes captured)
Ethernet II, Src: standard_92:76:9d (00:e0:29:92:76:9d), Dst: Cisco_c2:0e:ae (00:11:21:c2:0e:ae)
Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 1376
  Next header: IPv6 (0x29)
  Hop limit: 63
  Source address: 2001::1:1
  Destination address: 2001:2::211:21ff:fec2:ee
Internet Protocol Version 6
  Version: 6
  Traffic class: 0x00
  Flowlabel: 0x00000
  Payload length: 1336
  Next header: UDP (0x11)
  Hop limit: 127
  Source address: 2001::3
  Destination address: 2001:1:1::2
User Datagram Protocol, Src Port: 1025 (1025), Dst Port: 1234 (1234)
Real-Time Transport Protocol
ISO/IEC 13818-1 PID=0x44 CC=10
ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=8
ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=9
ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=10
ISO/IEC 13818-1 PID=0x45 CC=11
ISO/IEC 13818-1 PID=0x1024 CC=15
ISO/IEC 13818-1 PID=0x1337 CC=1

```

Figura 6.40 – Captura de um pacote do *stream* encapsulado no túnel.

Estes testes serviram para observar e comprovar o sucesso da mobilidade de rede num cenário *wireless* “quase real”, tendo sido os objectivos atingidos com sucesso. Apresenta-se o cenário como um cenário “quase real” porque a movimentação da rede era feita alterando apenas o SSID da interface *wireless* do *router* móvel e não movendo realmente a rede como se pretendia.

No cenário *wireless* “real”, apresentado a seguir, em que a rede móvel realmente se move de um local/rede para outro, efectuaram-se testes utilizando o estabelecimento e manutenção de sessões SSH/TCP. Estes testes são apresentados na subsecção seguinte.

6.3.3.2. SSH/TCP

Neste segundo teste verificou-se que, apesar da rede móvel se mover de uma rede para outra, as sessões TCP dos nós da rede móvel com nós da Internet são efectivamente mantidas, sendo o protocolo NEMO, e neste caso a sua implementação NEPL, o responsável por fornecer os mecanismos que permitem a esta mobilidade ser transparente, tanto para os nós da rede móvel como para os nós da Internet que com aqueles comunicam. Para isso pretendia-se utilizar uma aplicação que comunicasse precisamente em TCP e que fosse de fácil utilização. Utilizou-se o

SSH pois é uma aplicação de simples utilização e que necessita de pouca ou nenhuma configuração. Como servidor utilizou-se o *router* de acesso da rede visitada, cujo sistema operativo, o Fedora Core 6, traz já um servidor de SSH instalado e activo por omissão (OpenSSH 4.3), e como cliente o nó da rede móvel com, por exemplo, a aplicação PuTTY [84]. Os testes realizados utilizando o SSH basearam-se no acesso do MNN ao servidor de SSH presente no AR.

Neste cenário ambos os APs, apesar de pertencerem a redes diferentes, partilham o mesmo SSID (“MIPv6/NEMO”). Desta forma, é possível ao *router* móvel mover-se transparentemente de uma rede para outra, pois inicialmente está associado ao AP da rede origem, mas quando detecta que o sinal do outro AP, com o mesmo SSID, é mais forte associa-se ao outro AP, mudando de rede transparentemente.

Após se ter o cenário configurado e operacional nas duas salas, e com a rede móvel na rede origem, estabeleceu-se uma sessão SSH entre o nó da rede móvel e o *router* de acesso da rede visitada (2001::2). De seguida executou-se o comando `find /` na consola SSH. Este comando produz um *output* contínuo com a listagem de todos os ficheiros e directorias do sistema, sendo bom para observar o momento do *handover*, pois deixa de se receber esse *output* durante breves instantes.

Moveu-se então a rede móvel para a rede visitada de forma a observar o comportamento da ligação durante e após o *handover*. Esta movimentação foi feita saindo da sala 2.2 com o *Tablet PC* que implementa o MR e o MNN, este último numa máquina virtual, com direcção à sala 2.7, onde se encontrava a rede visitada. Quando o *router* móvel detecta que o sinal do AP da sala 2.7 (AP2) é mais forte que o sinal do AP da sala 2.2 (AP1) efectua o *handover* ao nível da camada de ligação, associando-se ao novo AP. Ao se associar a este AP, começa a receber *Router Advertisements* do *router* de acesso, efectuando também o *handover* ao nível da camada de rede (IP). Durante este *handover*, a recepção do *output* do comando inserido na consola SSH é bloqueada durante uns momentos, percebendo-se que estava a acontecer o *handover*.

Como é óbvio, durante o *handover* perdem-se alguns pacotes; porém, como o TCP é orientado à ligação e garante a entrega de todos os pacotes, o servidor reenvia os pacotes que se perdem para o cliente, pelo que este não perde quaisquer dados da sessão SSH.

Após se ter verificado que o *output* do comando inserido na consola continuava sem problemas, após a breve interrupção, moveu-se a rede móvel de novo para a rede origem. Voltou a verificar-

se um bloqueio de breves segundos na recepção do *output* da sessão SSH, resultante do *handover* realizado para a rede origem, mas esse *output* voltava passado escassos momentos.

A Figura 6.41 apresenta o gráfico tempo/sequência desta sessão SSH entre o MNN e o AR, criado pelo Wireshark com base nos pacotes capturados na interface de saída do *router* móvel. Através da análise deste gráfico e da captura das mensagens NEMO trocadas, é possível identificar os momentos quase exactos em que acontecem os *handovers*. A própria figura apresenta uma explicação resumida dos diversos momentos de interesse desta captura, pelo que não se fará uma descrição exaustiva desta.

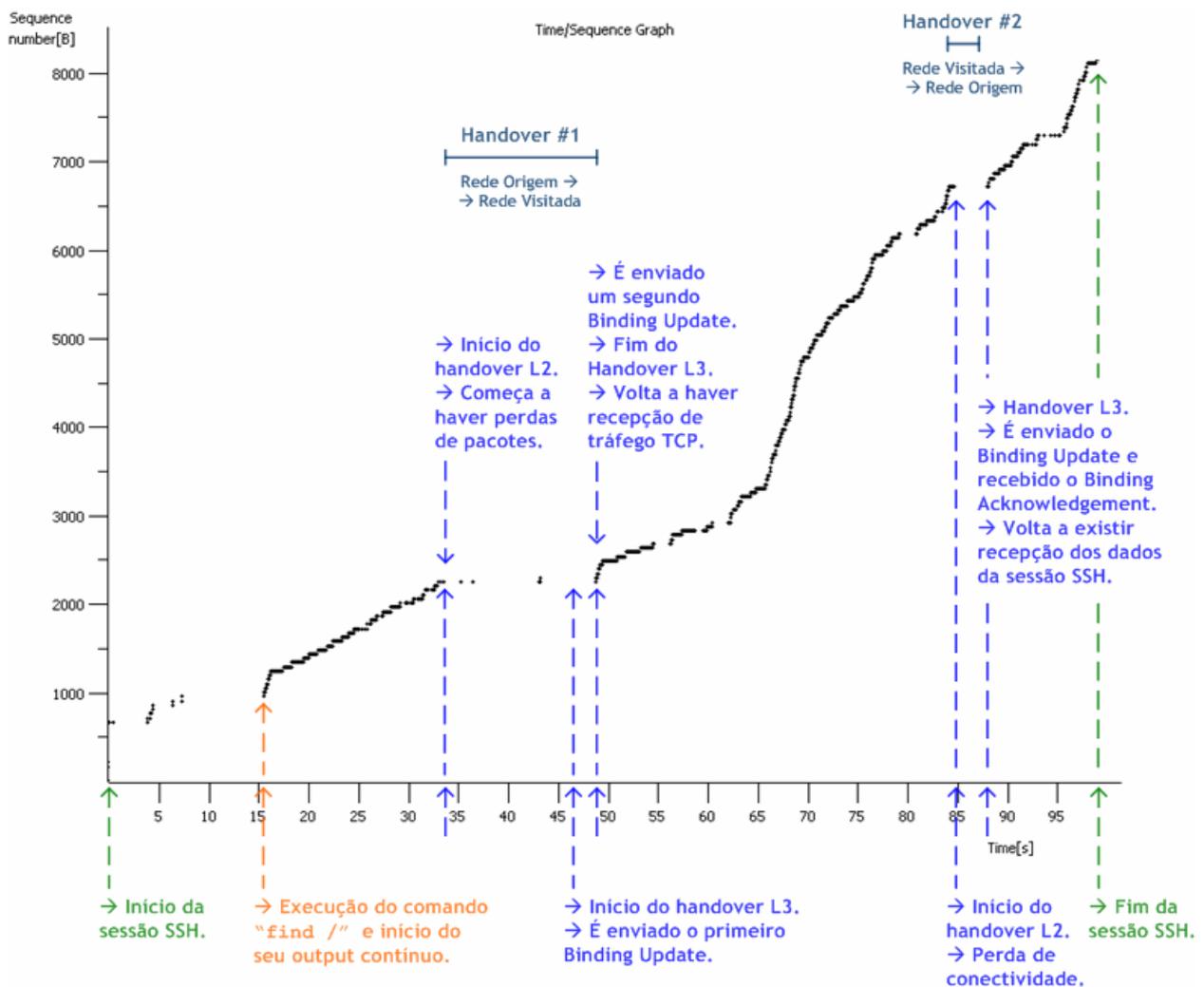


Figura 6.41 – Gráfico tempo/sequência da sessão SSH entre o MNN e o AR.

Destacam-se, no entanto, os dois momentos de *handover*, o do *handover* da rede móvel para a rede visitada (aproximadamente entre os 34 e os 49 segundos) e o do *handover* de “regresso a casa” da rede móvel, ou seja, o do *handover* da rede móvel para a rede origem

(aproximadamente entre os 85 e os 88 segundos). Estes momentos de *handover* e respectivos tempos podem ser identificados observando as listas de pacotes capturados na interface de saída do *router* móvel, apresentadas nas figuras abaixo, Figura 6.42 e Figura 6.43.

Na Figura 6.42 pode ver-se uma lista de pacotes capturados pelo Wireshark no teste anterior, aquando do *handover* da rede móvel para a rede visitada, na qual se pode verificar que o primeiro *Binding Update* do *handover* da rede móvel para a rede visitada foi enviado pelo *router* móvel, já na rede visitada pois já possuía o seu *care-of address*, por volta dos 46,7 segundos, conforme também se ilustra na figura anterior. Por volta dos 48,2 segundos foi enviado um novo *Binding Update*, porque por alguma razão o registo não tinha sido efectuado com o primeiro, recomeçando de seguida o *router* móvel a receber o tráfego TCP (da sessão SSH em curso) com destino ao nó da rede móvel.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
11880	43.316060000	2001:1:1::2	2001::2	TCP	54994 > 22 [ACK] Seq=2288 Ack=1464992 win=32144 Len=0
11881	43.316621000	2001:1:1::2	2001::2	TCP	54994 > 22 [ACK] Seq=2288 Ack=1466400 win=32144 Len=0
11882	46.681385000	2001:2::211:21ff:fec2:eae	2001:1::1	NEMO	Binding Update
11883	48.185748000	2001:2::211:21ff:fec2:eae	2001:1::1	NEMO	Binding Update
11884	48.845624000	2001:1:1::2	2001::2	SSH	[TCP Retransmission] Encrypted request packet len=48
11885	48.853905000	2001::2	2001:1:1::2	SSH	Encrypted response packet len=1368

Figura 6.42 – Pacotes capturados aquando do *handover* da rede móvel para a rede visitada.

Na Figura 6.43 pode ver-se uma lista de pacotes capturados, aquando do *handover* da rede móvel para a rede origem. Nesta captura pode verificar-se que os últimos pacotes TCP foram recebidos e enviados pelo *router* móvel por volta dos 84,8 segundos, sendo isto um indicativo da perda de conectividade ao nível da camada de ligação, devido ao *handover* de um AP para outro. Este momento está assinalado na Figura 6.41. Pouco depois, após o *handover* ao nível da camada de ligação ter sido efectuado, por volta dos 88 segundos, pode observar-se o envio de um *Binding Update* por parte do *router* móvel para o *home agent*, respondendo este com um *Binding Acknowledgement* confirmando anulação do registo daquele. A comunicação TCP e SSH é retomada logo de seguida.

No. -	Time	Source	Destination	Protocol	Info
29911	84.790849000	2001::2	2001:1:1::2	SSH	Encrypted response packet len=80
29912	84.790916000	2001:1:1::2	2001::2	TCP	54994 > 22 [ACK] Seq=6704 Ack=5206256 win=32144 Len=0
29913	87.967857000	2001:1:1::2	2001:1::1	NEMO	Binding Update
29914	88.034449000	2001:1:1::1	2001:1::2	NEMO	Binding Acknowledgement
29915	88.093631000	2001::2	2001:1:1::2	SSH	Encrypted response packet len=464
29916	88.093687000	2001:1:1::2	2001::2	TCP	54994 > 22 [ACK] Seq=6704 Ack=5206720 win=32144 Len=0

Figura 6.43 – Pacotes capturados aquando do *handover* da rede móvel para a rede origem.

Refira-se que, analisando o gráfico da Figura 6.41, se pode verificar que realmente não há perda de dados da sessão SSH, pois não existe discrepância entre o número de sequência dos últimos

pacotes enviados antes dos *handovers* e o número de sequência dos pacotes enviados após os *handovers*. Apesar de poderem existir elevadas perdas de pacotes (dependendo do tempo de *handover*), o TCP garante o reenvio desses pacotes perdidos, pelo que na realidade não se perdem quaisquer dados da aplicação. Este teste permite concluir que, caso se efectuasse a transferência de um ficheiro entre o AR e o MNN durante o *handover*, o receptor não perderia qualquer *byte* do ficheiro, pois, mesmo havendo perda de conectividade momentânea, o NEMO garante a manutenção das sessões em curso e o TCP garante a entrega de todos os pacotes enviados.

Estes testes, através da utilização de uma sessão SSH entre o nó da rede móvel e o *router* de acesso da rede visitada, permitiram verificar e comprovar o sucesso da mobilidade de rede num cenário *wireless* real, nomeadamente a manutenção de sessões TCP e de aplicação. Neste cenário existia mobilidade efectiva da rede móvel, pois a localização desta era realmente alterada de um ponto para outro. Ao se alterar a localização da rede móvel, estava também a alterar-se o ponto de acesso através do qual a rede móvel acedia à Internet, e consequentemente a rede de acesso. Foi possível verificar que, após os *handovers*, o cliente de SSH do nó da rede móvel conseguia com sucesso continuar a comunicar com o servidor de SSH presente no *router* de acesso.

7. Conclusão

À medida que mais e mais dispositivos portáteis vão tendo capacidade de aceder à Internet, a necessidade de mobilidade de redes inteiras é notória. A Mobilidade IPv6 actual permite a um único dispositivo móvel alterar o seu ponto de ligação à Internet sem se perderem as sessões das camadas de transporte e superiores, mas esta não permite a mobilidade de redes como um todo. A Mobilidade de Rede (NEMO) é uma extensão à Mobilidade IPv6 actual que permite a um *router* móvel actuar como agente de mobilidade em prol de uma rede inteira de dispositivos IPv6, que se movem como um todo. O IETF definiu este protocolo como o Protocolo de Suporte Básico de Mobilidade de Rede (NEMO) [30].

Neste projecto estudou-se e testou-se os desenvolvimentos do grupo de trabalho NEMO do IETF, demonstrando e comprovando o funcionamento do protocolo NEMO, através de testes básicos de mobilidade de rede, utilizando a implementação disponível para Linux, a NEPL. Neste sentido, após o estudo inicial da tecnologia e a análise do estado da arte, no domínio da Mobilidade de Rede em IPv6, implementaram-se cenários de teste nos quais se realizaram testes conclusivos acerca da utilização da mobilidade de rede em cenários reais.

Durante a implementação dos cenários surgiram diversos problemas, nomeadamente aquando da instalação e utilização das implementações do protocolo no Linux e no BSD, o que demonstra ainda uma certa imaturidade da tecnologia e, principalmente, das suas implementações. Apesar dos problemas encontrados, a instalação da implementação NEPL no Linux foi realizada com sucesso. Em relação à instalação da SHISA no BSD não se pode dizer o mesmo pois não se conseguiu terminar com sucesso a sua instalação, não tendo sido, assim, possível a sua utilização. Por este motivo, os testes de interoperabilidade, entre as duas implementações, que inicialmente se esperavam efectuar também não foram possíveis.

Durante o início dos testes, deparou-se com diversos problemas no funcionamento da implementação NEPL, pelo que se pode afirmar seguramente que ainda é um pouco prematuro

utilizar esta aplicação em ambientes reais e de produção. A aplicação apresenta alguns *bugs* e comportamentos estranhos e difíceis de identificar, mesmo pelos responsáveis pelo seu desenvolvimento (por exemplo, o problema do não envio dos *Binding Acknowledgements* por parte do *home agent* em resposta aos *Binding Updates* do *router* móvel). Apesar de tudo, após a resolução de alguns problemas, e o contorno de outros, a utilização desta implementação do protocolo NEMO revelou-se, no geral, positiva. É de salientar que os seus responsáveis têm feito um bom trabalho na tentativa de desenvolver uma implementação de referência que poderá vir a servir de base a outras implementações, mesmo comerciais.

Os resultados dos testes efectuados, apesar dos problemas encontrados, revelaram um elevado grau de sucesso, tendo-se verificado e comprovado o funcionamento da mobilidade de rede na manutenção de sessões de nós de uma rede móvel com nós da Internet, em cenários com e sem fios.

De fora deste projecto, e ainda no âmbito da Mobilidade de Rede em IPv6, ficaram o estudo e implementação de soluções de *multihoming* e de optimização de rotas, e o estudo e análise dos diversos tipos e modelos de redes origem. Qualquer um destes temas poderá ser abordado em trabalhos futuros, existindo já algum trabalho desenvolvido nestas áreas pela comunidade científica.

Destaca-se que, apesar de existir já bastante trabalho desenvolvido no âmbito da Mobilidade de Rede em IPv6, não existe assim tanta gente a trabalhar nesta área. Crê-se que em Portugal este tenha sido um dos primeiros projectos a explorar a temática da Mobilidade de Rede em IPv6, mais concretamente o protocolo NEMO. Projectos como este, mesmo sendo apenas de testes e não desenvolvendo nada de novo, dão sempre um grande contributo para o desenvolvimento e melhoramento da tecnologia e, principalmente, das implementações existentes, ajudando por vezes a detectar problemas e a apresentar soluções, quanto mais não seja, devido às dúvidas que colocam e aos problemas que apresentam.

Conforme se pode observar pela actividade do grupo de trabalho NEMO do IETF, principalmente pelas últimas actualizações aos Internet-Drafts publicados pelo grupo, a tecnologia está em movimento e em constante desenvolvimento. Neste contexto, a especificação e normalização são um passo muito importante no desenvolvimento da tecnologia. No entanto, ainda há muito trabalho a desenvolver até que a tecnologia esteja apta a ser utilizada a larga escala, e prova disso são os inúmeros Drafts relacionados com o protocolo NEMO publicados pela comunidade científica.

Apesar da relativa novidade desta tecnologia e da imaturidade que as suas implementações ainda revelam, é possível verificar que esta é uma tecnologia com bastante potencialidade para um futuro assente na mobilidade efectiva de redes inteiras de dispositivos, quer seja em ambientes *wired* ou *wireless*. Acredita-se que esta tecnologia e as suas implementações possa atingir um patamar de maturidade e estabilidade elevado o suficiente que lhe permitirá fazer parte do nosso quotidiano num futuro não muito longínquo. Nessa altura, a Mobilidade de Rede em IPv6, em conjunto com Mobilidade IPv6, será uma solução de mobilidade transparente, completa, segura e fiável, sendo a sua utilidade inquestionável.

Referências

Todos os *links* apresentados nestas referências foram acedidos com sucesso entre Outubro de 2006 e Fevereiro de 2007.

Livros

- [1] SOLIMAN, H. – *Mobile IPv6: Mobility in a Wireless Internet*, Addison-Wesley, ISBN 0201788977, 2004.
- [2] POPOVICIU, C. P.; LEVY-ABEGNOLI, E.; GROSSETETE, P. – *Deploying IPv6 Networks*, Cisco Press, ISBN 1587052105, 2006.

Relatórios Técnicos

- [3] SERAFIM, D.; SANTOS, V. – *IPv6@ESTG-Leiria: Instalação de uma Rede Piloto*, ESTG-Leiria, Julho de 2005, http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/instalacao/IPv6@ESTG-Leiria_PilotoIPv6_Relatorio_Final.pdf.
- [4] AMADO, T. – *IPv6@ESTG-Leiria: Testes de Mobilidade IPv6*, ESTG-Leiria, Fevereiro de 2006, http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/mobilidade/IPv6@ESTG-Leiria_MIPv6_Relatorio_Final.pdf.
- [5] GRÁCIO, N.; SEBASTIÃO, N. – *IPv6@ESTG-Leiria: Mobilidade IPv6 – Estudo das variantes de handover*, ESTG-Leiria, Trabalho em curso, Fevereiro de 2007.
- [6] KUNTZ, R. – *NEMO Basic Support implementation tests at the 6th IPv6 TAHI Interoperability Test Event*, Fevereiro de 2005, <http://www.nautilus6.org/doc/tc-nemo-tahi-interop-20050207-KuntzR.txt>.

Documentos Diversos

- [7] MOCERI, P. – *Enabling Network Mobility: A Survey of NEMO*, Washington University in St. Louis, Abril de 2006, http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/network_mobility/index.html.
- [8] KUNTZ, R. – *NEPL (NEMO Platform for Linux) HOWTO, Version 1.7*, Nautilus6 Project, 30 de Junho de 2006, <http://www.nautilus6.org/doc/nepl-howto/>.
- [9] SHIMA, K. – *SHISA How To, Version 1.17*, KAME Project, 24 de Janeiro de 2006, <http://www.kame.net/newsletter/20050707/>.
- [10] *SHISA README and INSTALLATION*, WIDE Project, 9 de Dezembro de 2004, <http://www.mobileip.jp/shisa-readme.pdf>.
- [11] SAATHOFF, F. – *A short overview of the SHISA MIPv6 stack*, Dezembro de 2005, http://www.feedface.com/howto/SHISA_Overview.pdf.
- [12] *Cisco Aironet 350 Series Bridge Software Configuration Guide*, Cisco Systems, Inc., 2003, http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps460/c2001/ccmigration_09186a008010254a.pdf.

Artigos

- [13] SERAFIM, D.; SANTOS, V.; ANTUNES, M.; VEIGA, N. – *IPv6@ESTG-Leiria: Instalação de uma Rede Piloto*, 3.^a Conferência de Engenharias “Engenharia'2005 - Desenvolvimento e Inovação”, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Novembro de 2005, http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/instalacao/IPv6@ESTG-Leiria_PilotoIPv6_Artigo_ConfEng2005.pdf.
- [14] BERNARDOS, C.; OLIVA, A.; CALDERÓN, M.; HUGO, D.; KAHLE, H. – *NEMO: Network Mobility. Bringing ubiquity to the Internet access*, IEEE INFOCOM 2006 Demonstration, Barcelona, Espanha, Abril de 2006, http://www.ieee-infocom.org/Posters/1568980112_NEMO%20Network%20Mobility.pdf.
- [15] BERNARDOS, C.; SOTO, I.; CALDERÓN, M.; HUGO, D.; RIOU, E. – *NEMO: Network Mobility in IPv6*, UPGRADE – The European Journal for the Informatics Professional, Vol. VI, N.º 2, ISSN 1684-5285, Abril de 2005, <http://www.upgrade-cepis.org/issues/2005/2/up6-2Bernardos.pdf>.

-
- [16] ERNST, T.; KUNTZ, R.; LEIBER, F. – *A Live Light-Weight IPv6 Demonstration Platform for ITS Usages*, 3rd 5th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Brest, França, Junho de 2005, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20050627-ITST-eBicycle-TErnst.pdf>.
- [17] PERERA, E.; SIVARAMAN, V.; SENEVIRATNE, A. – *Survey on Network Mobility Support*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Abril de 2004, <http://www.ee.unsw.edu.au/~vijay/pubs/jrnl/mc2r04.doc>.
- [18] MONTAVONT, N.; ERNST, T.; NOEL, T. – *Multihoming in Nested Mobile Networking*, SAINT (IPv6 Technology and Deployment), Tóquio, Japão, Janeiro de 2004, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20040126-NEMO-NestedMultihoming-NMontavont.pdf>.
- [19] ERNST, T. – *E-Wheelchair: A Communication System Based on IPv6 and NEMO*, 2nd International Conference on Smart Homes and Health Telematics (ICOST), Singapura, Setembro de 2004, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20040915-ICOST-NEMO-WheelChair-TErnst.pdf>.
- [20] ERNST, T.; UEHARA, K. – *Connecting Automobiles to the Internet*, ITST Workshop, Novembro de 2002, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20021101-ITST-NEMO-ITS-TErnst.pdf>.
- [21] PAIK, E.; CHO, H.; ERNST, T.; CHOI, Y. – *Load Sharing and Session Preservation with Multiple Mobile Routers for Large Scale Network Mobility*, 18th International Conference on Advanced Information Networking and Application (AINA'04), IEEE, 2004, <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9028/28652/01283942.pdf>.

Apresentações

- [22] ERNST, T. – *IPv6 Network Mobility (NEMO) for ITS*, 3rd 5th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Brest, França, Junho de 2005, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20050627-ITST-eBicycle-TErnst-slides.pdf>.
- [23] ERNST, T. – *Status of the IETF NEMO Working Group and NEMO Basic Support Usages*, CNGI – China Next Generation Internet, Pequim, China, Fevereiro de 2005, <http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc/20050226-NEMO-CNGI-TErnst.pdf>.

- [24] ERNST, T. – *Network Mobility*, First French Asian Workshop on Next Generation Internet, Sophia Antipolis, França, Setembro de 2004, http://www-sop.inria.fr/planete/fawngi/slides/t3_4_ernst.pdf.

Request for Comments (RFCs)

- [25] DEERING, S.; HINDEN, R. – *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, RFC 2460, Dezembro de 1998, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc2460.txt>.
- [26] PERKINS, C., Ed. – *IP Mobility Support for IPv4*, RFC 3344, Agosto de 2002, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3344.txt>.
- [27] MANNER, J., Ed.; KOJO, M., Ed. – *Mobility Related Terminology*, RFC 3753, Junho de 2004, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3753.txt>.
- [28] JOHNSON, D.; PERKINS, C.; ARKKO, J. – *Mobility Support in IPv6*, RFC 3775, Junho de 2004, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3775.txt>.
- [29] ARKKO, J.; DEVARAPALLI, V.; DUPONT, F. – *Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling Between Mobile Nodes and Home Agents*, RFC 3776, Junho de 2004, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3776.txt>.
- [30] DEVARAPALLI, V.; WAKIKAWA, R.; PETRESCU, A.; THUBERT, P. – *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*, RFC 3963, Janeiro de 2005, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3963.txt>.
- [31] CHAKRABARTI, S.; NORDMARK, E. – *Extension to Sockets API for Mobile IPv6*, RFC 4584, Julho de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc4584.txt>.

Internet-Drafts (I-Ds)

- [32] MOMOSE, T.; SHIMA, K.; TUOMINEN, A. – *The application interface to exchange mobility information with Mobility subsystem (Mobility Socket, AF_MOBILITY)*, I-D draft-momose-mip6-mipsoc-00, Expirado, Junho de 2005, <http://tools.ietf.org/id/draft-momose-mip6-mipsoc-00.txt>.
- [33] WAKIKAWA, R.; ERNST, T.; NAGAMI, K. – *Multiple Care-of Addresses Registration*, I-D draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05, Expirado, Fevereiro de 2006, <http://tools.ietf.org/id/draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05.txt>.

-
- [34] THUBERT, P.; WAKIKAWA, R.; DEVARAPALLI, V. – *NEMO Home Network models*, I-D *draft-ietf-nemo-home-network-models-06*, Trabalho em curso, Fevereiro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-home-network-models-06.txt>.
- [35] WAKIKAWA, R.; ERNST, T.; NAGAMI, K. – *Multiple Care-of Addresses Registration*, I-D *draft-ietf-monami6-multiplecoa-00*, Trabalho em curso, Junho de 2006, <http://tools.ietf.org/wg/monami6/draft-ietf-monami6-multiplecoa/draft-ietf-monami6-multiplecoa-00.txt>.
- [36] LEUNG, K.; DOMMETY, G.; NARAYANAN, V.; PETRESCU, A. – *IPv4 Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*, I-D *draft-ietf-nemo-v4-base-01*, Expirado, Junho de 2006, <http://tools.ietf.org/wg/nemo/draft-ietf-nemo-v4-base/draft-ietf-nemo-v4-base-01.txt>.
- [37] NG, C.; THUBERT, P.; WATARI, M.; ZHAO, F. – *Network Mobility Route Optimization Problem Statement*, I-D *draft-ietf-nemo-ro-problem-statement-03*, Trabalho em curso, Setembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-ro-problem-statement-03.txt>.
- [38] NG, C.; ZHAO, F.; WATARI, M.; THUBERT, P. – *Network Mobility Route Optimization Solution Space Analysis*, I-D *draft-ietf-nemo-ro-space-analysis-03*, Trabalho em curso, Setembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-ro-space-analysis-03.txt>.
- [39] DROMS, R.; THUBERT, P. – *DHCPv6 Prefix Delegation for NEMO*, I-D *draft-ietf-nemo-dhcpv6-pd-02*, Trabalho em curso, Setembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-dhcpv6-pd-02.txt>.
- [40] GUNDAVELLI, S.; KEENI, G.; KOIDE, K.; NAGAMI, K. – *NEMO Management Information Base*, I-D *draft-ietf-nemo-mib-02*, Trabalho em curso, Outubro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-mib-02.txt>.
- [41] ERNST, T. – *Network Mobility Support Goals and Requirements*, I-D *draft-ietf-nemo-requirements-06*, Trabalho em curso, Novembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-requirements-06.txt>.
-

- [42] ERNST, T.; LACH, H-Y. – *Network Mobility Support Terminology*, I-D draft-ietf-nemo-terminology-06, Trabalho em curso, Novembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-terminology-06.txt>.
- [43] KNIVETON, T.; THUBERT, P. – *Mobile Network Prefix Delegation*, I-D draft-ietf-nemo-prefix-delegation-01, Trabalho em curso, Novembro de 2006, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-prefix-delegation-01.txt>.
- [44] NG, C.; PAIK, E.; ERNST, T.; BAGNULO, M. – *Analysis of Multihoming in Network Mobility Support*, I-D draft-ietf-nemo-multihoming-issues-07, Trabalho em curso, Fevereiro de 2007, <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/internet-drafts/draft-ietf-nemo-multihoming-issues-07.txt>.

Outras Normas

- [45] *Guidelines For 64-Bit Global Identifier (EUI-64) Registration Authority*, IEEE, 1998, <http://standards.ieee.org/regauth/oui/tutorials/EUI64.html>.
- [46] *Internet Protocol version 6 Address Space*, IANA, 27 de Fevereiro de 2006, <http://www.iana.org/assignments/ipv6-address-space>.

Websites

- [47] IPv6@ESTG-Leiria, <http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/>.
- [48] IETF Home Page, <http://www.ietf.org/>.
- [49] Active IETF Working Groups, <http://www.ietf.org/html.charters/wg-dir.html>.
- [50] Mobility for IPv4 (mip4) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/mip4-charter.html>.
- [51] Mobility for IPv6 (mip6) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/mip6-charter.html>.
- [52] Mobility for IP: Performance, Signaling and Handoff Optimization (mipshop) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/mipshop-charter.html>.
- [53] Mobile Nodes and Multiple Interfaces in IPv6 (monami6) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/monami6-charter.html>.
- [54] Network Mobility (nemo) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/nemo-charter.html>.
- [55] Nemo Status Pages, <http://tools.ietf.org/wg/nemo/>.

-
- [56] Mobile Ad-hoc Networks (manet) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [57] RFC-Editor Webpage, <http://www.rfc-editor.org/>.
- [58] WIDE PROJECT Home Page, <http://www.wide.ad.jp/>.
- [59] Nautilus6 Project Overview – Deployment of the Mobile Internet, <http://www.nautilus6.org/>.
- [60] The KAME project, <http://www.kame.net/>.
- [61] TAHI Project, <http://www.tahi.org/>.
- [62] GO-Core, <http://www.tcs.hut.fi/Research/Mobility/go-core.shtml>.
- [63] USAGI Project – Linux IPv6 Development Project, <http://www.linux-ipv6.org/>.
- [64] SHISA, <http://www.mobileip.jp/>.
- [65] SFCMIP – Mobile IPv6 implementation, <http://www.wakikawa.net/Research/contents/mip6.html>.
- [66] Mobile IPv6 for Linux, <http://www.mobile-ipv6.org/>.
- [67] MIPL Mobile IPv6 – Download, <http://www.mobile-ipv6.org/software/>.
- [68] Nautilus6 – Network Protocol Implementation, <http://www.nautilus6.org/implementation/index.php>.
- [69] ATLANTIS: NEMO Basic Support Implementation, <http://www.nautilus6.org/implementation/atlantis.html>.
- [70] 6th TAHI IPv6 Interoperability Test Event, <http://www.tahi.org/inop/6thinterop.html>.
- [71] Cisco IOS IPv6 Configuration Library – Implementing Mobile IPv6 [Cisco IOS Software Releases 12.3 Mainline] – Cisco Systems, http://www.cisco.com/en/US/products/sw/iosswrel/ps5187/products_configuration_guide_chapter09186a00804160bf.html.
- [72] Standards Supported in Cisco IOS Software Releases 12.4 and 12.2S [Cisco IOS Software Releases 12.4 Mainline] – Cisco Systems, http://www.cisco.com/en/US/products/ps6350/prod_bulletin0900aecd802eaa4f.html.
- [73] Mobile IPv6 Research Group – Microsoft, <http://research.microsoft.com/mobileipv6/>.
-

- [74] Mobile IPv6 for Darwin (Mac OS X),
<http://www.momose.org/macintosh/macosx/mip6.html>.
- [75] IPv6 Ready Logo Program, <http://www.ipv6ready.org/>.
- [76] InternetCAR Project, <http://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR/>.
- [77] OverDRiVE Project, http://www.comnets.rwth-aachen.de/~o_drive/index.html.
- [78] eMOTION (Network in Motion), <http://ocean.cse.unsw.edu.au/emotion/overview.html>.
- [79] Nautilus6 – Demo Testbed – E-Bike, <http://www.nautilus6.org/demo/ebike.php>.
- [80] E-Bicycle Demonstration – Tour de France, July 2006,
<http://demo.nautilus6.org/demos/200607-tourdefrance.php>.
- [81] CVIS Project, <http://www.cvisproject.org/>.
- [82] IPv6 Car project [IPv6 Car] – IST Event 2004 | EUROPA,
http://europa.eu.int/information_society/istevent/2004/cf/viewexhibdetail.cfm?exhib_id=488.
- [83] MIPv6 Tester, <http://www.bullopenSource.org/mipv6/tester.php>.
- [84] PuTTY, <http://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/>.
- [85] The Network Simulator – ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [86] MobiWan: NS-2 extensions to study mobility in Wide-Area IPv6 Networks,
<http://www.inrialpes.fr/planete/mobiwan/>.
- [87] The Wireless Network Simulator SimulX, <http://simulx.u-strasbg.fr/>.
- [88] OMNeT++ Community Site, <http://www.omnetpp.org/>.
- [89] TWiki . Simulation . WebHome,
<http://ctieware.eng.monash.edu.au/twiki/bin/view/Simulation/WebHome>.
- [90] Thierry Ernst – Network Simulators – Known Simulators,
<http://www.sfc.wide.ad.jp/~ernst/doc-simul/node1.html>.
- [91] SimulX Wiki – Home Page, <http://wikinet.u-strasbg.fr/~simulx/>.
- [92] VLC media player, <http://www.videolan.org/vlc/>.
- [93] IPv6 for Microsoft Windows: Frequently Asked Questions – Microsoft TechNet,
<http://www.microsoft.com/technet/network/ipv6/ipv6faq.msp>.

-
- [94] Changes to IPv6 in Windows Vista and Windows Server "Longhorn": The Cable Guy, October 2005 – Microsoft TechNet,
<http://www.microsoft.com/technet/community/columns/cableguy/cg1005.mspx>.
- [95] Configuring IPv6 with Windows Vista, The Cable Guy, May 2006 – Microsoft TechNet,
<http://www.microsoft.com/technet/community/columns/cableguy/cg0506.mspx>.
- [96] NEMO – MingSoft, http://www.mmnetlab.csie.ncku.edu.tw/research_reg/nemo/.

Notícias:

- [97] *United to offer Web in the air*, Reuters, CNNMoney.com, 6 de Junho de 2005,
http://money.cnn.com/2005/06/06/technology/personaltech/united_wifi/.
- [98] *News @ Cisco: The Race is On as Cisco Systems and Renault Win Murai Award for Innovative Mobile IPv6 e-Vehicle*, Cisco Systems, Inc., 20 de Outubro de 2003,
http://newsroom.cisco.com/dlls/ts_102003.html.

Anexo A. Características dos Equipamentos Utilizados

Neste anexo apresentam-se as características dos equipamentos utilizados nos cenários de teste implementados.

A.1. Equipamentos do Cenário 1 – Wired

Nesta secção são apresentadas as características dos equipamentos utilizados no primeiro cenário implementado, Tabela A.1.

Equipamento / Máquina Física	Descrição	CPU	RAM	Interfaces de Rede
HA	Intel Pentium 4	3.00 GHz	512 MB	<i>eth1</i> : Intel PRO/100+ PCI Adapter, 100 Mbps <i>eth2</i> : Intel PRO/1000 CT Network Adapter, 1Gbps
MR	Intel Pentium 4	3.00 GHz	512 MB	<i>eth0</i> : Intel PRO/1000 CT Network Adapter, 1Gbps
AR	Intel Pentium III	450 MHz	256 MB	<i>eth0</i> : SMC2-1211TX, 100 Mbps <i>eth2</i> : SMC2-1211TX, 100 Mbps
<i>Switch</i>	Cisco Catalyst 2950 Series	n.d.	n.d.	12 × 100 Mbps

Tabela A.1 – Características dos equipamentos utilizados no Cenário 1 – *Wired*.

A.2. Equipamentos do Cenário 2 – Wireless

Nesta secção são apresentadas as características dos novos equipamentos utilizados no segundo cenário implementado, Tabela A.2.

Equipamento / Máquina Física	Descrição	CPU	RAM	Interfaces de Rede
MR	Toshiba Portégé M200, Intel Pentium M	1.8 GHz	1 GB	<i>eth1</i> : Cisco Aironet 350 Series Wireless LAN Adapter, 802.11b PCCard, 11 Mbps
APs	Cisco Aironet 350 Series Wireless Access Point	n.d.	n.d.	11 Mbps

Tabela A.2 – Características dos equipamentos utilizados no Cenário 2 – *Wireless*.

Anexo B. Configurações dos Cenários de Teste

Neste anexo apresentam-se as configurações dos diversos cenários de teste, nomeadamente os diversos *scripts* de configuração e inicialização utilizados e os ficheiros de configuração das aplicações *radvd* e *nemod*.

B.1. Configurações do Cenário 1 – Wired

Nesta secção são apresentadas as configurações relativas ao Cenário 1 – *Wired*.

B.1.1. AR – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Access Router (AR) - Startup script
# ~/nemo/ar-start.sh

# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding

# Configuracao e activacao das interfaces de acordo com o cenario
EGRESSO=eth0
INGRESSO=eth2
ifconfig $EGRESSO up
ifconfig $EGRESSO inet6 add 2001::2/64
ifconfig $INGRESSO up
ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:2::1/64

# Configuracao de rotas de encaminhamento
route add -A inet6 2001:1::/32 gw 2001::1 $EGRESSO

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
```

```
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf
```

```
# EOF
```

B.1.2. AR – Ficheiro de Configuração do radvd

```
# Access Router (AR) - radvd.conf
# ~/nemo/radvd.conf

# eth2 é a interface de ingresso (Visited Network)
interface eth2
{
    AdvSendAdvert on;
    MinRtrAdvInterval 0.03;
    MaxRtrAdvInterval 0.07;
    AdvIntervalOpt on;

    prefix 2001:2::1/64
    {
        AdvRouterAddr on;
        AdvOnLink on;
        AdvAutonomous on;
    };
};

# EOF
```

B.1.3. HA – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Home Agent (HA) - Startup script
# ~/nemo/ha-start.sh

# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding

# Configuracao e activacao das interfaces de acordo com o cenario
INGRESSO=eth1
EGRESSO=eth2
ifconfig $INGRESSO up
ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:1::1/64
ifconfig $EGRESSO up
```

```
ifconfig $EGRESSO inet6 add 2001::1/64

# Configuracao de rotas de encaminhamento
MR_LINKLOCAL_ADDR=fe80::211:11ff:fe24:5e54
route add -A inet6 2001:1:1::/64 gw $MR_LINKLOCAL_ADDR $INGRESSO
route add -A inet6 2001:2::/64 gw 2001::2 $EGRESSO

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf

# Execucao do daemon NEMO
/usr/local/sbin/nemod -c nemo/nemod.conf

# EOF
```

B.1.4. HA – Ficheiro de Configuração do nemod

```
# Home Agent (HA) - nemod.conf
# ~/nemo/nemod.conf

# Tipo de nó NEMO (CN, HA ou MN)
NodeConfig HA;
# Nível de debug (superior a 0 indica que haverá debug)
DebugLevel 10;
# Home agent suporta routers móveis
HaAcceptMobRtr enabled;

# Trafego é automaticamente encaminhado pelo tunel pelo MR para o HA
OptimisticHandoff enabled;

# Não é feita otimização de rotas, porque também ainda não é suportada
DoRouteOptimizationMN disabled;
DoRouteOptimizationCN disabled;

# eth1 é a interface ligada ao home link
Interface "eth1";

# Configuração dos prefixos servidos pelo HA (i.e., home link e MNP)
HaServedPrefix 2001:1::/64;
# Mobile router com o endereço 2001:1::2 pode fazer binding do prefixo
# indicado entre (), o resto é negado
BindingAclPolicy 2001:1::2 (2001:1:1::/64) allow;
DefaultBindingAclPolicy deny;
```

```
# Configurações IPsec - implementação NEMO sem IPsec até ao momento
UseMnHaIPsec disabled;
KeyMngMobCapability disabled;

# EOF
```

B.1.5. HA – Ficheiro de Configuração do radvd

```
# Home Agent (HA) - radvd.conf
# ~/nemo/radvd.conf

# eth1 é a interface de ingresso (Home Network)
interface eth1
{
    AdvSendAdvert on;
    MinRtrAdvInterval 0.03;
    MaxRtrAdvInterval 0.07;
    AdvIntervalOpt on;
    AdvHomeAgentFlag on;
    AdvHomeAgentInfo on;
    HomeAgentLifetime 1800;
    HomeAgentPreference 10;
    AdvMobRtrSupportFlag on;

    prefix 2001:1::1/64
    {
        AdvRouterAddr on;
        AdvOnLink on;
        AdvAutonomous on;
    };
};

# EOF
```

B.1.6. MR – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Mobile Router (MR) - Startup script
# ~/nemo/mr-start.sh

# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding
```

```
# Configuracao e activacao das interfaces de acordo com o cenario
INGRESSO=vmnet1
EGRESSO=eth0
ifconfig $INGRESSO up
ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:1:1::1/64
ifconfig $EGRESSO up
# Na interface de egresso não se configura nenhum endereço, o nemo trata disso.

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf

# Execucao do daemon NEMO
/usr/local/sbin/nemod -c nemo/nemod.conf

# EOF
```

B.1.7. MR – Ficheiro de Configuração do nemo

```
# Mobile Router (MR) - nemo.conf
# ~/nemo/nemod.conf

# Tipo de nó NEMO (CN, HA ou MN)
NodeConfig MN;
# Nível de debug (superior a 0 indica que haverá debug)
DebugLevel 10;
# Não é feita optimização de rotas, porque também ainda não é suportada
DoRouteOptimizationCN disabled;
DoRouteOptimizationMN disabled;
# BAcks para os CNs desactivados
UseCnBuAck disabled;

# Usar o modo de operação explicito (disabled usa modo implicito)
MobRtrUseExplicitMode enabled;

# Binding Lifetime, por exemplo 60 segundos
MnMaxHaBindingLife 60;

# Trafego e automaticamente encaminhado pelo tunel pelo MR para o HA
OptimisticHandoff enabled;

# eth0 é a interface de egresso
Interface "eth0" {
    MnIfPreference 1;
```

```
}

MnHomeLink "eth0" {
    IsMobRtr enabled;
    HomeAgentAddress 2001:1::1;
    HomeAddress 2001:1::2/64 (2001:1:1::/64);
}

# Configurações IPsec - implementação NEMO sem IPsec até ao momento
UseMnHaIPsec disabled;
KeyMngMobCapability disabled;

# EOF
```

B.1.8. MR – Ficheiro de Configuração do radvd

```
# Mobile Router (MR) - radvd.conf
# ~/nemo/radvd.conf

# vmnet1 é a interface de ingresso
interface vmnet1
{
    AdvSendAdvert on;
    MinRtrAdvInterval 1;
    MaxRtrAdvInterval 3;
    AdvIntervalOpt on;

    prefix 2001:1:1::1/64
    {
        AdvRouterAddr on;
        AdvOnLink on;
        AdvAutonomous on;
        AdvPreferredLifetime 60;
        AdvValidLifetime 120;
    };
};

# EOF
```

B.1.9. MNN – Script de Configuração e Inicialização

```
rem # Mobile Network Node (MNN) - Startup script
rem # ~/nemo/mnn-start.bat
```

```
@echo off

rem # Instalacao do IPv6 e reset das suas configuracoes
netsh interface ipv6 install
netsh interface ipv6 reset

rem # Configuracao da interface
netsh interface ipv6 add address interface="Local Area Connection" address=2001:1:1::2

rem # EOF
```

B.1.10. CN – Script de Configuração e Inicialização

```
rem # Correspondent Node (CN) - Startup script
rem # ~/nemo/cn-start.txt

@echo off

rem # Instalacao do IPv6 e reset das suas configuracoes
netsh interface ipv6 install
netsh interface ipv6 reset

rem # Configuracao da interface de rede
netsh interface ipv6 add address interface="Local Area Connection" address=2001::3

rem # Configuracao de rotas de encaminhamento
netsh interface ipv6 add route prefix=2001:1::/64 interface="Local Area Connection"
metric=0 nexthop=2001::1
netsh interface ipv6 add route prefix=2001:1:1::/64 interface="Local Area Connection"
metric=0 nexthop=2001::1
netsh interface ipv6 add route prefix=2001:2::/64 interface="Local Area Connection"
metric=0 nexthop=2001::2

rem # EOF
```


B.2. Configurações do Cenário 2 – Wireless

Nesta secção são apresentadas as configurações relativas ao Cenário 2 – *Wireless*.

B.2.1. AR – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Access Router (AR) - Startup script
# ~/nemo/ar-start.sh

# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding

# Configuração do túnel e configuracao e activacao das interfaces de
# acordo com o cenario
TUNEL=eth0
EGRESSO=sit1
INGRESSO=eth2
ifconfig $TUNEL inet add 192.168.231.206 netmask 255.255.255.192
route -A inet add default gw 192.168.231.254 $TUNEL
ip tunnel add $EGRESSO mode sit local 192.168.231.206 remote 192.168.231.77
ifconfig $EGRESSO up
ifconfig $EGRESSO inet6 add 2001::2/64
ifconfig $INGRESSO up
ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:2::1/64

# Configuracao de rotas de encaminhamento
route add -A inet6 2001:1::/32 gw 2001::1 $EGRESSO

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf

# EOF
```

B.2.2. HA – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Home Agent (HA) - Startup script
# ~/nemo/ha-start.sh
```

```
# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding

# Configuracao do tunel e configuracao e activacao das interfaces de
# acordo com o cenario
INGRESSO=eth1
TUNEL=eth2
EGRESSO=sit1
ifconfig $TUNEL inet add 192.168.231.77 netmask 255.255.255.192
route -A inet add default gw 192.168.231.126 $TUNEL
ip tunnel add $EGRESSO mode sit local 192.168.231.77 remote 192.168.231.206
ifconfig $INGRESSO up
ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:1::1/64
ifconfig $EGRESSO up
ifconfig $EGRESSO inet6 add 2001::1/64

# Configuracao de rotas de encaminhamento
MR_LINKLOCAL_ADDR=fe80::211:21ff:fec2:eae
route add -A inet6 2001:1:1::/64 gw $MR_LINKLOCAL_ADDR $INGRESSO
route add -A inet6 2001:2::/64 gw 2001::2 $EGRESSO

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf

# Execucao do daemon NEMO
/usr/local/sbin/nemod -c nemo/nemod.conf

# EOF
```

B.2.3. MR – Script de Configuração e Inicialização

```
#!/bin/bash
# Mobile Router (MR) - Startup script
# ~/nemo/mr-start.sh

# Negacao da aceitacao de RAs, e activacao de encaminhamento
echo 0 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/accept_ra
echo 1 > /proc/sys/net/ipv6/conf/all/forwarding

# Configuracao e activacao das interfaces de acordo com o cenario
INGRESSO=vmnet1
EGRESSO=eth1
ifconfig $INGRESSO up
```

```

ifconfig $INGRESSO inet6 add 2001:1:1::1/64
ifconfig $EGRESSO up
# Na interface de egresso não se configura nenhum endereço, o nemod trata disso.
iwconfig $EGRESSO essid "MIPv6/NEMO"

# Execucao do daemon de Routers Advertisements
/usr/sbin/radvd -C nemo/radvd.conf

# Execucao do daemon NEMO
/usr/local/sbin/nemod -c nemo/nemod.conf

# EOF

```

B.2.4. MR – Ficheiro de Configuração do nemod

```

# Mobile Router (MR) - nemod.conf
# ~/nemo/nemod.conf

# Tipo de nó NEMO (CN, HA ou MN)
NodeConfig MN;
# Nível de debug (superior a 0 indica que haverá debug)
DebugLevel 10;
# Não é feita optimização de rotas, porque também ainda não é suportada
DoRouteOptimizationCN disabled;
DoRouteOptimizationMN disabled;
# BAcKS para os CNs desactivados
UseCnBuAck disabled;

# Usar o modo de operação explícito (disabled usa modo implícito)
MobRtrUseExplicitMode enabled;

# Binding Lifetime, por exemplo 60 segundos
MnMaxHaBindingLife 60;

# Trafego e automaticamente encaminhado pelo tunel pelo MR para o HA
OptimisticHandoff enabled;

# eth1 é a interface de egresso
Interface "eth1" {
    MnIfPreference 1;
}

MnHomeLink "eth1" {
    IsMobRtr enabled;
}

```

```
HomeAgentAddress 2001:1::1;
HomeAddress 2001:1::2/64 (2001:1:1::/64);
}

# Configurações IPsec - implementação NEMO sem IPsec até ao momento
UseMnHaIPsec disabled;
KeyMngMobCapability disabled;

# EOF
```

Anexo C. Patch para o código da NEPL (por Romain Kuntz)

Neste anexo apresenta-se o código do *patch*, produzido pelo responsável pela aplicação NEPL do grupo de trabalho Nautilus6, Romain Kuntz, para corrigir o *bug* do código fonte da aplicação NEPL que impossibilitava o *router* móvel de encaminhar com sucesso o tráfego da rede móvel para a Internet, quando a rede móvel se encontrava na rede origem. O nome do ficheiro do *patch* é *nemo-0.2-homenet-fix-20070109.diff*.

```
--- nemo-0.2-old/src/movement.c 2006-02-24 07:53:24.000000000 +0900
+++ nemo-0.2/src/movement.c 2007-01-09 14:41:13.000000000 +0900
@@ -185,6 +185,9 @@

    route_del(rtr->ifindex, RT_TABLE_MAIN, 0,
              &in6addr_any, 0, &in6addr_any, 0, &rtr->lladdr);
+
+   route_del(rtr->ifindex, RT6_TABLE_MIP6, 0,
+             &in6addr_any, 0, &in6addr_any, 0, &rtr->lladdr);
}
list_for_each_safe(l, n, &rtr->prefixes) {
    struct prefix_list_entry *p;
@@ -1236,6 +1239,11 @@
    route_add(rtr->ifindex, RT_TABLE_MAIN, RTPROT_RA,
             RTM_F_DEFAULT|RTM_F_ADDRCONF, 1024,
             &in6addr_any, 0, &in6addr_any, 0, &rtr->lladdr);
+
+ // Default route for the packet coming from the Mobile Network
+ route_add(rtr->ifindex, RT6_TABLE_MIP6, RTPROT_MIP,
+           0, IP6_RT_PRIO_MIP6_FWD,
+           &in6addr_any, 0, &in6addr_any, 0, &rtr->lladdr);

list_for_each(list, &rtr->prefixes) {
    struct prefix_list_entry *p;
```


Anexo D. Nota acerca de Marcas Registradas

Todas as marcas e nomes de produtos mencionados neste documento são marcas comerciais registradas (®) ou marcas comerciais (™) dos seus respectivos proprietários.

IPv6@ESTG-Leiria



<http://www.ipv6.estg.ipleiria.pt/>