

DM

**Gestão de Redundância em Redes de Transmissão**  
Análise de Soluções em SDH, DWDM  
e rede Backbone de fibra ótica  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Duarte Filipe Simões de Nóbrega e Sousa**  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

  
UNIVERSIDADE da MADEIRA  
*A Nossa Universidade*  
[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

setembro | 2025

**Gestão de Redundância em Redes de Transmissão**  
Análise de Soluções em SDH, DWDM  
e rede Backbone de fibra ótica  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Duarte Filipe Simões de Nóbrega e Sousa**  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO  
Alberto de Jesus Nascimento

## Resumo

Esta dissertação foi elaborada com o objetivo de obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Telecomunicações. O trabalho apresenta uma análise técnica da resiliência e redundância em redes de telecomunicações, com enfoque nas tecnologias SDH, DWDM e na infraestrutura de rede *backbone* em fibra ótica.

A investigação utiliza como caso de estudo o impacto do temporal de 20 de fevereiro de 2010 na ilha da Madeira, um evento que expôs fragilidades significativas na infraestrutura de telecomunicações do operador incumbente na região. São analisadas as falhas observadas, as estratégias de recuperação adotadas, e as soluções técnicas implementadas para reforçar a resiliência da rede.

O estudo destaca a importância do planeamento estratégico na implementação de soluções redundantes e apresenta recomendações para a evolução contínua das redes de telecomunicações, com foco na automação, monitorização e na adoção de arquiteturas mais flexíveis e robustas.

**Palavras-chave:** Redes de Telecomunicações, Resiliência, Redundância, SDH, MPLS, DWDM, Fibra Ótica.

## Abstract

This dissertation was prepared to fulfill the requirements for the Master's degree in Electrical Engineering – Telecommunications. The work presents a technical analysis of resilience and redundancy in telecommunications networks, with a particular focus on SDH and DWDM technologies and on the optical fiber *backbone* network infrastructure.

The research uses as a case study the impact of the February 20, 2010 storm on the island of Madeira, an event that exposed significant weaknesses in the telecommunications infrastructure of the incumbent operator in the region. The observed failures, the recovery strategies adopted, and the technical solutions implemented to enhance network resilience are analysed.

The study highlights the importance of strategic planning in the implementation of redundant solutions and presents recommendations for the continuous evolution of telecommunications networks, with an emphasis on automation, monitoring, and the adoption of more flexible and robust network architectures.

**Keywords:** Telecommunications Networks, Resilience, Redundancy, SDH, MPLS, DWDM, Fiber Optics.

## Agradecimentos

A realização deste trabalho representou um desafio enriquecedor, tanto a nível pessoal como profissional, levando-me a revisitar um período particularmente exigente e marcante da minha carreira. A análise técnica desenvolvida ao longo desta dissertação permitiu-me consolidar conhecimentos adquiridos ao longo dos anos e estruturar, numa perspetiva académica, temas com que tive contacto direto em contexto real.

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Doutor Alberto Jesus Nascimento, pelo apoio, disponibilidade e orientação ao longo de todo o processo. A sua experiência e sentido crítico foram importantes para a concretização deste trabalho.

Expresso igualmente o meu agradecimento aos membros do júri, Professor Doutor Tiago Hipkin Meireles e Professora Doutora Lina Maria Pestana Leão de Brito, pelas observações e recomendações apresentadas durante o processo de avaliação. Os seus contributos permitiram enriquecer e aperfeiçoar significativamente esta dissertação, reforçando a sua qualidade técnica e académica.

Aos colegas e amigos que, de diversas formas, contribuíram com sugestões, apoio técnico e incentivo moral, deixo o meu sincero reconhecimento.

Agradeço também às equipas técnicas com quem tive a oportunidade de colaborar ao longo dos anos, pelo conhecimento partilhado e pela experiência prática que serviu de base para a análise aqui desenvolvida.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, pelo apoio incondicional, paciência e motivação constantes — sem os quais este percurso não teria sido possível.

A todos, o meu profundo obrigado.

# Índice geral

<b>Resumo</b> .....	ii
<b>Abstract</b> .....	iii
<b>Agradecimentos</b> .....	iv
<b>Índice geral</b> .....	v
<b>Índice de Figuras</b> .....	vii
<b>Índice de tabelas</b> .....	ix
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	x
<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. Motivação Pessoal e Contexto .....	1
1.2. Breve Introdução ao Setor das Telecomunicações em Portugal .....	2
1.3. Evolução Histórica do Setor das Telecomunicações em Portugal .....	3
1.4. A Importância da Redundância em Redes de Telecomunicações .....	4
1.5. Objetivos do Trabalho .....	5
1.6. Organização do Relatório .....	5
<b>2. Caracterização da Rede de Telecomunicações na Madeira antes de 2010</b> .....	7
2.1. Contexto das Infraestruturas de Telecomunicações na Madeira .....	7
2.2. Estrutura da Rede de Transmissão .....	8
2.3. Principais Vulnerabilidades Identificadas .....	9
2.4. Justificação da Escolha do Caso de Estudo .....	9
<b>3. Estado da Arte em Resiliência e Redundância em Redes de Telecomunicações</b> .....	11
3.1. Conceitos Fundamentais: Redundância, Resiliência e Disponibilidade .....	11
3.2. Normas e Referências Internacionais .....	13
3.3. Modelos de Redundância e Topologias de Proteção .....	15
3.4. Estratégias Internacionais de Resiliência .....	16
3.5. Tecnologias Emergentes para Resiliência .....	19
3.6. Síntese e Integração com o Caso da Madeira .....	24
<b>4. Tecnologias de Rede em Telecomunicações</b> .....	26
4.1. SDH (Synchronous Digital Hierarchy) .....	26
4.2. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) .....	30
4.3. Rede de Transporte em Fibra Ótica .....	34
4.4. Rede ASDH na Madeira .....	37
<b>5. O Temporal de 20 de fevereiro de 2010: Impacto nas Telecomunicações</b> .....	45
5.1. Contextualização do Evento .....	45

5.2. Impacto nas Redes de Telecomunicações .....	50
5.3. Operações de Restauro e Soluções Transitórias .....	52
5.4. Reforço da Infraestrutura e Planeamento Pós-Crise.....	55
<b>6. Planeamento e Implementação de Redundância em Redes de Telecomunicações.....</b>	<b>58</b>
6.1. Princípios e Medidas de Reconstrução da Rede .....	58
6.2. Comparação: Rede Antes e Depois do Temporal de 2010.....	59
6.3. Estratégia de Planeamento da Redundância na Madeira.....	61
6.4. Implementação das Soluções de Redundância .....	64
6.5. Impacto e Resultados Obtidos .....	67
6.6. Lições Aprendidas e Recomendações Futuras.....	69
<b>7. Conclusões.....</b>	<b>71</b>
7.1. Síntese do Trabalho.....	71
7.2. Lições Aprendidas .....	72
7.3. Recomendações para o Futuro.....	73
<b>8. Referências .....</b>	<b>75</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Taxa de penetração de serviços de Telecomunicações.....	3
Figura 2 - SatCOLTs usados pela AT&T. ....	18
Figura 3 - Arquitetura SDN com controlo centralizado.....	19
Figura 4 - Comparação entre arquitetura tradicional e arquitetura SDN. ....	20
Figura 5 - Estrutura padrão ETSI-MANO da arquitetura NFV. ....	21
Figura 6 - Integração entre IA/ML, SDN e NFV numa rede inteligente [9][10]. ....	23
Figura 7 - Arquitetura SDN da rede Google B4.....	24
Figura 8 - Estrutura de multiplexagem SDH. Fonte [28]. ....	27
Figura 9 - Topologia da Rede SDH na Madeira. ....	29
Figura 10 - Topologia SDH de Acesso na Madeira. ....	30
Figura 11 - Diagrama do anel Continente-Açores-Madeira (CAM) em 2009. Fonte [30]. ....	31
Figura 12 - Sistema DWDM. ....	32
Figura 13 - Rede DWDM na Madeira. Fonte [31]. ....	33
Figura 14 - Anel Ótico da Madeira em 2011. Fonte [8]. ....	36
Figura 15 - Topologia simplificada da Rede ASDH na Madeira. Fonte [32]. ....	38
Figura 16 - Arquitetura do EMILO SNT. Fonte [32]. ....	39
Figura 17 - Arquitetura do EMILO S14 BOX. Fonte [32]. ....	40
Figura 18 - Arquitetura do EMILO S14 Expandido. Fonte [32]. ....	40
Figura 19 - Organização interna do EMILO X16. Fonte [32]. ....	41
Figura 20 - Interface de gestão local. Fonte [32]. ....	41
Figura 21 - Interface de gestão remota [32]. ....	42
Figura 22 - Interligação de diversas estruturas ASDH na Madeira.....	42
Figura 23 - Anel X16 Madeira Central. ....	43
Figura 24 - Anel de São Roque (Universidade da Madeira). ....	43
Figura 25 - Aspetos da aluvião de 20 de fevereiro de 2010 no Funchal. Fonte [1]. ....	46
Figura 26 - Aspetos da aluvião de 20 de fevereiro de 2010 no Funchal (2). Fonte [1]. ....	46
Figura 27 - Perfis longitudinais das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos. Fonte [1]. ....	47
Figura 28 - Distribuição espacial da precipitação acumulada durante o evento. Fonte [1]. ....	48
Figura 29 - Localização das bacias hidrográficas afetadas pelo evento. Fonte [1]. ....	49
Figura 30 - Imagem de satélite da pluma de sedimentos no mar após o evento. Fonte [1]. ....	50
Figura 31 - Armário multisserviços. Fonte [35]. ....	53
Figura 32 - Exemplo de caminhos redundantes (FO) no Funchal. Fonte [37]. ....	62
Figura 33 - Securitização de serviços com DWDM. Fonte [8]. ....	62
Figura 34 - Ampliação do anel ótico da Madeira. Fonte [8]. ....	63
Figura 35 - Soluções VSAT instaladas. Fonte [8]. ....	63
Figura 36 - Rede de monitorização de fibra na Madeira com recurso a tecnologia OTDR. Fonte [8]. ....	64

**Nota sobre as Figuras e material técnico:**

Algumas das Figuras e esquemas incluídos neste trabalho têm origem em documentação técnica interna da operadora PT/MEO, utilizada exclusivamente para fins académicos no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Telecomunicações da Universidade da Madeira.

Estas imagens e diagramas são reproduzidos com carácter ilustrativo e não comercial, respeitando as normas de confidencialidade técnica e de propriedade intelectual da entidade detentora.

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Níveis Tier (resumo). Fonte [24]. .....	14
Tabela 2 - Modelos de Redundância e Topologias de proteção (síntese do autor).....	16
Tabela 3 - Evolução das Infraestruturas de Telecomunicações da Madeira Antes e Após o Temporal de 2010 .....	60

## Lista de Acrónimos

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AGORA-NG	Plataforma de gestão remota da rede ASDH
AI	Artificial Intelligence
APS	Automatic Protection Switching
ASDH	Access Synchronous Digital Hierarchy
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BTS	Base Transceiver Station
CAM	Anel Ótico Continente-Açores-Madeira (Cabo submarino)
DLU	Digital Line Unit
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EoSDH	Ethernet over Synchronous Digital Hierarchy
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FH	Feixe Hertziano
FTTH	Fiber To The Home
GbE	Gigabit Ethernet
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GSM	Global System for Mobile Communications
HDSL	High-bit-rate Digital Subscriber Line
IA/ML	Inteligência Artificial / Machine Learning
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP/MPLS	Internet Protocol / Multiprotocol Label Switching
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network

LTE	Long Term Evolution
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MSP	Multiplex Section Protection
MTTR	Mean Time To Repair
NMS	Network Management System
ODF	Optical Distribution Frame
OLT	Optical Line Terminal
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDN	Software Defined Networking
SHDSL	Single-pair High-speed DSL
SNCP	Sub-Network Connection Protection
STM	Synchronous Transport Module
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
UPS	Uninterruptible Power Supply
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WAN	Wide Area Network
Web-TI	Plataforma de gestão local dos equipamentos EMILO
X16	Equipamento EMILO de elevada capacidade da rede ASDH

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação Pessoal e Contexto

A presente dissertação analisa a importância da resiliência e da redundância em redes de telecomunicações, com enfoque nas tecnologias SDH (Synchronous Digital Hierarchy), padronizada na recomendação ITU-T G.707, DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), definida na ITU-T G.694.1 e na infraestrutura de transporte em fibra ótica.

O estudo tem como caso de referência o impacto do temporal de 20 de fevereiro de 2010 na ilha da Madeira [1], um evento extremo que evidenciou fragilidades críticas na rede regional e motivou a implementação de medidas estruturais para reforço da continuidade dos serviços.

A relevância do tema decorre da crescente dependência das sociedades modernas de infraestruturas de telecomunicações robustas, capazes de garantir disponibilidade mesmo em cenários adversos. A análise desenvolvida nesta dissertação procura contribuir para o conhecimento técnico sobre mecanismos de redundância, apresentando soluções aplicadas num contexto real e discutindo a sua eficácia perante eventos disruptivos.

Para enquadrar esta análise no contexto das melhores práticas internacionais, é apresentada uma revisão do estado da arte em resiliência e redundância em redes de telecomunicações.

### **Delimitação do âmbito do estudo**

A análise desenvolvida nesta dissertação incide exclusivamente sobre a infraestrutura de telecomunicações do operador incumbente na Região Autónoma da Madeira à data dos acontecimentos analisados, a Portugal Telecom (atual MEO/Altice).

Embora existissem — e existam atualmente — outras redes de telecomunicações pertencentes a diferentes operadores, a escolha do operador incumbente justifica-se pelo seu papel estrutural na prestação de serviços críticos, pela extensão da sua infraestrutura de *backbone* e acesso, e pela disponibilidade de informação técnica detalhada que permitiu uma análise aprofundada e consistente.

Assim, sempre que ao longo do documento se faz referência à “rede de telecomunicações da Madeira”, tal designação deve ser entendida, no contexto deste trabalho, como a rede do operador incumbente.

## 1.2. Breve Introdução ao Setor das Telecomunicações em Portugal

O setor das telecomunicações em Portugal constitui um pilar essencial da economia e da coesão social, assegurando a conectividade entre cidadãos, empresas e instituições públicas.

Ao longo das últimas décadas, o país registou uma evolução tecnológica acentuada, passando de serviços de telefonia fixa (suportadas em cobre) para redes de fibra ótica de elevada capacidade e infraestruturas móveis de quinta geração (5G).

Esta transformação foi impulsionada pela modernização das infraestruturas e pela concorrência entre os principais operadores — MEO, NOS e Vodafone [2] — que têm promovido uma melhoria contínua da qualidade e da cobertura de serviço.

A rede nacional, sustentada por tecnologias como SDH, DWDM e GPON (Gigabit Passive Optical Network) [3], posiciona Portugal entre os países europeus com melhor desempenho em banda larga fixa e móvel, destacando-se pela elevada cobertura de fibra ótica e pelas velocidades médias de acesso superiores à média da União Europeia.

De acordo com o relatório “Indicadores de Banda Larga – 2023” da ANACOM [3], Portugal apresenta níveis de penetração e qualidade de serviço que o colocam entre os cinco países com melhor desempenho global, refletindo o impacto positivo da modernização contínua das suas infraestruturas de telecomunicações no desenvolvimento económico e digital.

A Figura 1 ilustra a taxa de penetração de serviços de Telecomunicações em Portugal.

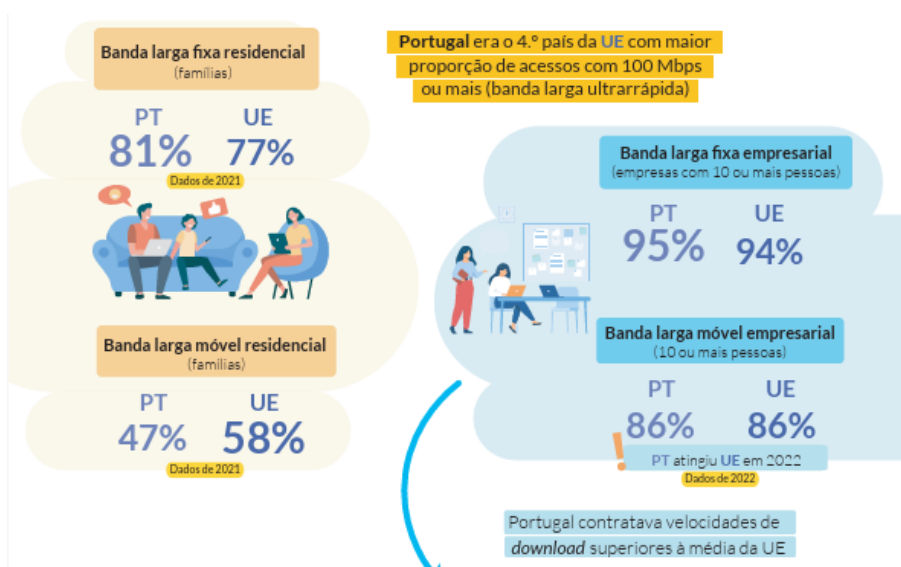


Figura 1 - Taxa de penetração de serviços de Telecomunicações

### 1.3. Evolução Histórica do Setor das Telecomunicações em Portugal

A história das telecomunicações em Portugal reflete uma trajetória de modernização contínua, paralela ao desenvolvimento económico e tecnológico do país.

Os principais marcos podem ser sintetizados da seguinte forma [4]:

- Final do século XIX – Introdução das primeiras redes de telefonia fixa, geridas pelos CTT (Correios, Telégrafos e Telefones), que marcaram o início da conectividade nacional;
- 1994 – Criação da Portugal Telecom (PT), resultante da fusão de várias entidades públicas, centralizando a gestão e a modernização das infraestruturas de comunicações;
- Década de 1990 – Lançamento da Internet comercial e expansão das redes móveis GSM 2G, democratizando o acesso às comunicações móveis;
- Anos 2000 e 2010 – Implementação de redes GPON e DWDM, que colocaram Portugal entre os líderes europeus em cobertura de fibra ótica;
- Cabos submarinos – Expansão e modernização das ligações internacionais, garantindo conectividade global e reforçando a importância estratégica de regiões ultraperiféricas, como a Madeira [5];

- Atualidade – Adoção do 5G e consolidação das redes de *backbone* nacionais, promovendo a digitalização da economia e a integração de serviços baseados em cloud e IoT.

Esta evolução posicionou Portugal na vanguarda europeia das telecomunicações, com infraestruturas modernas e fiáveis que sustentam o desenvolvimento social, económico e tecnológico do país.

## 1.4. A Importância da Redundância em Redes de Telecomunicações

A redundância é um fator determinante para a continuidade e fiabilidade das comunicações, garantindo que a falha de um componente ou de um percurso não comprometa a prestação do serviço.

Em redes de telecomunicações, a redundância traduz-se na existência de caminhos alternativos e mecanismos de proteção capazes de assegurar a comutação automática do tráfego em caso de falha.

Normas internacionais, como as recomendações da ITU- [6] e do IEEE [7], estabelecem requisitos de desempenho que impõem tempos de recuperação inferiores a 50 ms em redes SDH e DWDM, através de mecanismos como Automatic Protection Switching (APS) e Self-Healing Rings (SHR).

Estes princípios são essenciais para garantir a alta disponibilidade exigida em serviços críticos, tais como comunicações de emergência, redes hospitalares ou sistemas de segurança pública.

A ausência de estratégias de redundância adequadas pode originar falhas generalizadas e perdas de conectividade com impacto económico e social significativo.

Assim, a implementação de arquiteturas redundantes constitui uma prática de engenharia essencial e um indicador de maturidade tecnológica das infraestruturas de telecomunicações contemporâneas.

## 1.5. Objetivos do Trabalho

O principal objetivo desta dissertação é analisar as soluções de redundância em redes de telecomunicações, com particular incidência nas arquiteturas baseadas em SDH, DWDM e fibra ótica, e a sua aplicação à realidade da Região Autónoma da Madeira.

Os objetivos específicos são:

1. Analisar tecnicamente o impacto do temporal de 20 de fevereiro de 2010, identificando as principais falhas nas redes de telecomunicações regionais [1];
2. Explorar as medidas de reforço adotadas após o evento, com destaque para o planeamento e a implementação de sistemas redundantes [8];
3. Caracterizar as tecnologias envolvidas (SDH, DWDM, ASDH, fibra ótica) e os respetivos mecanismos de proteção [6];
4. Estudar as soluções de redundância implementadas na rede de *backbone*, nomeadamente o uso de DWDM em anel e a criação de percursos distintos para equipamentos de acesso (DSLAM, OLT);
5. Avaliar os resultados obtidos e propor recomendações de evolução futura, com enfoque na automação, na monitorização em tempo real e na adoção de arquiteturas inteligentes e resilientes [9][10][11].

Estes objetivos visam contribuir para a consolidação de boas práticas de engenharia de redes aplicadas a contextos insulares e de risco geográfico elevado.

## 1.6. Organização do Relatório

O presente relatório encontra-se estruturado em sete capítulos, organizados de forma a conduzir o leitor desde o enquadramento do problema até à análise das soluções adotadas e às conclusões finais.

O **Capítulo 1** introduz o tema, apresenta a motivação, os objetivos do trabalho, a metodologia adotada e a delimitação do âmbito do estudo.

O **Capítulo 2** procede à caracterização da rede de telecomunicações da Região Autónoma da Madeira até 2010, descrevendo a sua estrutura, tecnologias existentes e principais vulnerabilidades.

O **Capítulo 3** apresenta o estado da arte em resiliência e redundância em redes de telecomunicações, abordando conceitos fundamentais, normas internacionais, modelos de proteção e estratégias adotadas a nível internacional.

O **Capítulo 4** descreve as principais tecnologias de suporte à rede analisada, enquadrando o seu papel no funcionamento e na evolução das redes de telecomunicações.

O **Capítulo 5** analisa o impacto do temporal de 20 de fevereiro de 2010 nas infraestruturas de telecomunicações da Madeira, evidenciando as falhas e limitações da rede existente.

O **Capítulo 6** aborda o planeamento e a implementação das soluções de reforço da rede após o evento, incluindo a comparação entre a rede antes e depois do temporal, bem como a análise dos resultados obtidos.

Por fim, o **Capítulo 7** apresenta as conclusões do trabalho, as principais aprendizagens e recomendações para a evolução futura da rede.

## **2. Caracterização da Rede de Telecomunicações na Madeira antes de 2010**

### **2.1. Contexto das Infraestruturas de Telecomunicações na Madeira**

Até ao temporal de 20 de fevereiro de 2010, a rede de telecomunicações da Região Autónoma da Madeira apresentava uma arquitetura fortemente suportada em cobre, refletindo a evolução gradual do setor e as limitações de investimento típicas de infraestruturas insulares.

A prestação de serviços de voz e dados assentava predominantemente em tecnologias como HDSL (High-bit-rate Digital Subscriber Line) e SHDSL (Single-pair High-speed DSL) [12][13], utilizadas em ligações empresariais e para suporte à transmissão da rede móvel 2G e 3G.

No acesso residencial, a banda larga ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) era a tecnologia dominante, garantindo conectividade básica à Internet, mas com limitações de largura de banda e resiliência.

Estas soluções dependiam da rede de cobre, cuja extensão e idade constituíam fatores de vulnerabilidade, sobretudo em zonas rurais e de difícil acesso.

Embora já existissem cabos de fibra ótica na ilha, a sua utilização era restrita a ligações troncais entre infraestruturas do operador, servindo essencialmente para o suporte de circuitos SDH (Synchronous Digital Hierarchy) e uplinks de DSLAMs (Digital Subscriber Line Access Multiplexers).

A ausência de percursos redundantes e de diversidade física fazia com que qualquer rutura de cabo ou falha elétrica provocasse interrupções alargadas nos serviços.

A rede até 2010 pode ser caracterizada como uma infraestrutura funcional, mas vulnerável, concebida para responder às necessidades de tráfego da época, sem redundância robusta nem mecanismos automáticos de recuperação.

## 2.2. Estrutura da Rede de Transmissão

A rede de transmissão da Madeira, em 2010, apresentava uma estrutura híbrida, composta por tecnologias legadas em cobre e por segmentos emergentes em fibra ótica, com funções distintas dentro da arquitetura global.

Os principais componentes e respectivas funções podem ser resumidos da seguinte forma:

- SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – tecnologia base da rede de *backbone* regional e ligação ao continente, suportada por cabos submarinos e infraestruturas terrestres [14]. A rede SDH operava nos níveis STM-1, STM-4 e STM-16, interligando as principais centrais e garantindo transporte de voz e dados. No entanto, apresentava percursos únicos sem redundância física e sem proteção completa MSP/APS.
- Rede ASDH (Access SDH) – implementada apenas em alguns pontos estratégicos, de forma residual, recorrendo a equipamentos EMILO da PT Inovação [15]. Esta rede destinava-se à ligação de clientes empresariais e estações rádio-base, mas sem cobertura alargada.
- HDSL e SHDSL – tecnologias baseadas em cobre, amplamente utilizadas em ligações corporativas e na interligação de estações móveis. Garantiam continuidade de serviço, mas limitadas em capacidade e vulneráveis a falhas físicas [12][13].
- ADSL (Asymmetric DSL) – tecnologia dominante na oferta de banda larga residencial e SOHO (Small Office/Home Office), com velocidade limitada e dependência total da rede de cobre.
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – tecnologia ainda incipiente na Madeira, utilizada apenas em alguns troços de ligação ao continente e ao Porto Santo. A sua presença era muito limitada antes de 2010, sem cobertura regional nem estrutura em anel [16].

Esta rede apresentava uma arquitetura fortemente hierarquizada e com múltiplos pontos únicos de falha, resultando em baixa resiliência. As redundâncias existentes eram pontuais e manuais, exigindo intervenção humana para redirecionar o tráfego em caso de falha.

## 2.3. Principais Vulnerabilidades Identificadas

A análise das condições da rede até 2010 revelou diversas fragilidades estruturais e operacionais, que contribuíram para o colapso parcial das comunicações durante o temporal de fevereiro:

- Percursos únicos de fibra ótica, sem diversidade geográfica, atravessando zonas de risco elevado (ribeiras e encostas instáveis);
- Ausência parcial de redundância energética, com centrais e armários dependentes da rede elétrica pública;
- Topologias com pontos únicos de falha, sobretudo nas zonas urbanas de maior densidade;
- Monitorização limitada, devido à inexistência de sistemas OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) e registos incompletos no cadastro de infraestrutura [17];
- Dependência excessiva de tecnologias legadas (HDSL, SHDSL, ADSL), com fraca escalabilidade e baixa tolerância a falhas;
- Cobertura restrita de fibra ótica, insuficiente para garantir trajetos alternativos ou suportar crescimento de tráfego.

Estas limitações criavam uma infraestrutura vulnerável a fenómenos naturais severos e a falhas múltiplas simultâneas — uma realidade que o temporal de 2010 veio evidenciar de forma dramática.

## 2.4. Justificação da Escolha do Caso de Estudo

O evento extremo de 20 de fevereiro de 2010 expôs de forma particularmente clara as fragilidades estruturais da rede de telecomunicações existente na Região Autónoma da Madeira, tornando este contexto um caso de estudo relevante para a análise da resiliência e redundância em redes de transmissão. Este temporal constituiu um dos episódios meteorológicos mais severos da história recente da região, com impactos significativos em múltiplas infraestruturas críticas, incluindo as comunicações.

A magnitude do impacto revelou limitações estruturais importantes na rede então existente, tanto ao nível da proteção física como da arquitetura tecnológica. A dependência de percursos únicos, a reduzida diversificação geográfica e a limitada capacidade de resposta a falhas de grande escala contribuíram para a interrupção prolongada de serviços essenciais, evidenciando a vulnerabilidade da infraestrutura face a eventos extremos.

Antes do processo de reconstrução, a travessia de cabos em zonas críticas, nomeadamente em ribeiras, era frequentemente realizada de forma exposta, recorrendo à fixação direta nas paredes das margens ou em estruturas existentes. Esta solução, herdada de fases anteriores de expansão da rede, apresentava reduzida proteção física e uma elevada suscetibilidade a fenómenos naturais adversos, constituindo um fator adicional de risco para a continuidade do serviço.

Neste enquadramento, o caso da Madeira assume particular relevância enquanto objeto de estudo, na medida em que permite analisar, de forma concreta, o comportamento de uma rede de telecomunicações sujeita a um evento extremo, bem como identificar as limitações estruturais e organizacionais que condicionavam a sua resiliência. A análise deste contexto fornece, assim, uma base sólida para a reflexão sobre princípios de redundância, robustez e planeamento em infraestruturas críticas de comunicações.

Em síntese, a rede de telecomunicações existente na Madeira até 2010 apresentava fragilidades estruturais significativas, decorrentes da limitada diversificação de percursos, da exposição física de componentes críticos e da ausência de mecanismos robustos de redundância, tornando-a particularmente vulnerável a eventos extremos, como o ocorrido em fevereiro de 2010.

### **3. Estado da Arte em Resiliência e Redundância em Redes de Telecomunicações**

A resiliência e a redundância constituem pilares fundamentais no planeamento e na operação de redes de telecomunicações modernas, assegurando a continuidade dos serviços mesmo perante falhas técnicas, erros humanos ou catástrofes naturais.

Estes conceitos adquirem uma importância acrescida em contextos geograficamente isolados e orograficamente complexos, como é o caso da Região Autónoma da Madeira, onde a diversidade física e a acessibilidade às infraestruturas são limitadas.

Este capítulo apresenta uma revisão crítica do estado da arte relativo às principais normas internacionais, modelos de redundância, topologias de proteção e tecnologias emergentes aplicadas à resiliência de redes de telecomunicações.

Por fim, é feita a integração destes conceitos com a realidade da rede madeirense, permitindo estabelecer a ligação entre a teoria e as soluções implementadas após o temporal de 2010.

#### **3.1. Conceitos Fundamentais: Redundância, Resiliência e Disponibilidade**

A redundância e a resiliência constituem princípios fundamentais na conceção de infraestruturas críticas de telecomunicações. Tal como exposto no Capítulo 4, estes conceitos possuem enquadramento normativo e são amplamente abordados em referências internacionais [18][12].

No âmbito aplicado deste capítulo, a redundância corresponde à disponibilização de percursos, equipamentos ou fontes de energia alternativas, capazes de assegurar a continuidade do serviço perante a falha de um elemento principal [18]. Já a resiliência traduz a capacidade da rede para se adaptar rapidamente a falhas, recuperando o serviço com impacto mínimo para os utilizadores, recorrendo a mecanismos automáticos de comutação, reencaminhamento e monitorização [12].

Estes princípios materializam-se em diferentes níveis da infraestrutura:

- **Físico:** diversificação de percursos de fibra ótica, proteção mecânica e redundância energética;
- **Lógico:** implementação de protocolos de proteção (APS, MSP, SNCP, FRR);
- **Funcional:** segregação e priorização de serviços críticos;
- **Operacional:** monitorização contínua e gestão centralizada via NMS/OTDR [8].

Esta abordagem multidimensional constitui a base para compreender a reconstrução da rede madeirense.

### **Modelos Comuns de Proteção e Redundância em Redes**

Existem vários modelos utilizados para garantir a redundância em redes de telecomunicações, entre os quais se destacam:

- **Topologia em Anel:** Os nós da rede estão interligados de forma circular, permitindo que o tráfego circule em ambos os sentidos. Em caso de falha num dos segmentos, a comunicação segue o caminho alternativo. Esta é uma das estratégias mais comuns em SDH e DWDM;
- **Topologia em Malha:** Cada nó da rede tem múltiplas conexões alternativas, proporcionando elevada redundância e minimizando pontos únicos de falha. É muito utilizada em redes de grande escala e redes IP/MPLS;
- **Redundância Ponto-a-Ponto:** Consiste na criação de ligações dedicadas e independentes para ligações críticas, garantindo um backup direto em caso de falha do trajeto principal. Este modelo é frequentemente utilizado em redes de transmissão para infraestruturas empresariais, como por exemplo governamentais ou financeiras.

A escolha do modelo de redundância [18][12] depende da criticidade da rede, custos de implementação e requisitos de recuperação de falhas.

### **Exemplos de Falhas Evitáveis com Redundância**

A ausência de redundância pode resultar em falhas severas na rede. Alguns exemplos comuns incluem:

- **Rutura de um cabo de fibra ótica sem trajeto alternativo:** Causa uma interrupção total do serviço naquela ligação. Falhas de fibra sem redundância aumentam o tempo médio de recuperação (MTTR) significativamente;
- **Falha de energia em centrais/estações sem backup:** Pode deixar milhares de utilizadores sem acesso a comunicações. O uso de geradores de emergência e baterias pode reduzir significativamente o tempo de indisponibilidade;
- **Colapso de uma infraestrutura sem redundância física (ex: estações-base móveis):** Resulta na perda de cobertura total na área afetada. A redundância com microcélulas temporárias ou redes móveis emergenciais pode minimizar este impacto.

A implementação de estratégias de redundância permite prevenir e mitigar estes impactos, assegurando continuidade operacional mesmo em condições adversas.

## 3.2. Normas e Referências Internacionais

A resiliência de rede é definida pela norma ITU-T X.805 [19] como a capacidade de um sistema de comunicações manter os serviços operacionais dentro de parâmetros aceitáveis, mesmo após falhas ou condições externas adversas.

Esta norma estabelece uma arquitetura de segurança ponta a ponta, identificando camadas funcionais (acesso, transporte, controlo e gestão) e zonas críticas de vulnerabilidade.

Complementarmente, a NIST SP 800-34 Rev.1 [20] reforça a importância da continuidade operacional em infraestruturas críticas, recomendando a redundância física, o isolamento lógico, o backup energético e a realização periódica de testes de recuperação.

A ISO/IEC 27031 [21] fornece diretrizes para a preparação e resposta a incidentes nas TIC, enquanto a ISO 22301 [22] define os princípios da gestão da continuidade do negócio (Business Continuity Management Systems – BCMS).

A nível tecnológico, as normas IEEE 802.1Qci e 802.1CB [7] introduzem mecanismos de filtragem de tráfego e replicação de quadros para fiabilidade, sendo amplamente aplicadas em redes Ethernet industriais e IP/MPLS.

Nos ambientes virtualizados, o documento ETSI GS NFV-REL 001 [23] especifica requisitos de resiliência em funções de rede virtualizadas (VNFs), incluindo replicação de processos, *failover* automático e gestão de estado distribuída.

Estas normas são adotadas globalmente por operadores Tier 1 e entidades gestoras de infraestruturas críticas, constituindo a base normativa para os planos de continuidade operacional (BCP) e para a engenharia de redundância de rede.

Em complemento, o Uptime Institute [24] define a classificação Tier I a IV para data centers, avaliando o grau de redundância, disponibilidade e tolerância a falhas. A Tabela 1 resume as principais características de cada nível.

Tier	Definição básica	Uptime esperado	Redundância	Exemplo típico
<b>Tier I</b>	Infraestrutura básica, sem redundância	~99.67% (28h/ano de falha)	Nenhuma	PME com servidor único
<b>Tier II</b>	Componentes redundantes (gerador, UPS, etc.)	~99.75% (22h/ano)	Parcial	Data center regional
<b>Tier III</b>	Permite manutenção sem interrupção	~99.98% (1.6h/ano)	N+1 completa	Operadoras, bancos, grandes empresas
<b>Tier IV</b>	Tolerante a falhas simultâneas	~99.995% (26min/ano)	2N (total)	Infraestruturas críticas (ex: saúde, defesa, governo)

Tabela 1 - Níveis Tier (resumo). Fonte [24].

Estas referências internacionais servem de base ao desenvolvimento das políticas de resiliência e redundância aplicadas em redes de telecomunicações de elevada disponibilidade.

### 3.3. Modelos de Redundância e Topologias de Proteção

A arquitetura da rede tem um papel determinante na sua capacidade de recuperação e continuidade operacional.

As topologias e modelos de redundância mais utilizados baseiam-se em princípios de duplicação de caminhos, comutação automática e diversidade física, permitindo que o tráfego seja redirecionado em caso de falha.

Os principais modelos são:

- **Anel com APS (Automatic Protection Switching):** Utilizado em redes SDH e DWDM, garante comutação automática bidirecional (BLSR) em menos de 50 ms após falha;
- **Malha com Fast Reroute (FRR):** Usada em IP/MPLS com protocolos como RSVP-TE ou Segment Routing (SR-MPLS), oferecendo recuperação ultrarrápida;
- **Ponto-a-Ponto 1+1 ou 1:1:** Com caminhos duplicados ou em espera, aplicados em serviços críticos e interligações sensíveis.

Para além da redundância física, a redundância lógica é assegurada através de protocolos como [7]:

- **Spanning Tree Protocol (STP)** e suas variantes (RSTP, MSTP) – Para prevenção de loops com failover automático;
- **Link Aggregation Control Protocol (LACP)** – Combina múltiplos links físicos em um só canal lógico com balanceamento de carga e tolerância a falhas;
- **Bidirectional Forwarding Detection (BFD)** – Para deteção rápida de falhas em redes IP/MPLS.

Do ponto de vista lógico, técnicas como STP/RSTP/MSTP, LACP e BFD são essenciais para prevenção de loops, agregação de links e deteção rápida de falhas.

A tabela seguinte apresenta uma síntese dos principais modelos de redundância e respetivas características, com base em documentação técnica e na experiência operacional do autor.

Modelo	Tipo	Tempo de recuperação	Custo relativo	Complexidade	Aplicação típica
Anel SDH com APS (BLSR)	Físico	< 50 ms	Médio	Média	Redes de transporte metropolitanas
Malha MPLS com FRR	Lógico	< 50 ms (com RSVP-TE)	Elevado	Alta	Backbone IP/MPLS de operadoras Tier 1
1+1 Ponto-a-Ponto	Físico	Instantâneo	Alto	Baixa	Sites críticos (data centers, hospitais)
STP / RSTP / MSTP	Lógico	1–10 s (RSTP)	Baixo	Baixa	Redes Ethernet empresariais
LACP + BFD	Lógico	< 1 s	Médio	Média	Agregação de links Ethernet

Tabela 2 - Modelos de Redundância e Topologias de proteção (síntese do autor).

Estes modelos permitem reduzir significativamente o tempo médio de falha (MTTR) e aumentar a disponibilidade global da rede.

### 3.4. Estratégias Internacionais de Resiliência

A nível internacional, diversos operadores aplicam estratégias multifacetadas para garantir a continuidade dos serviços de telecomunicações.

Entre os exemplos mais relevantes destacam-se a NTT (Japão), a AT&T (EUA) e a BT (Reino Unido). Estes operadores aplicam abordagens multifacetadas para garantir a continuidade operacional. Algumas práticas recorrentes incluem:

- Criação de zonas de risco geográfico: separação física e lógica das infraestruturas por zonas sísmicas, de inundação ou industriais;
- Energia redundante: com UPS independentes e grupos geradores automáticos a diesel com autonomia superior a 72h;
- Redes híbridas de backup: combinando fibra ótica, rádio e VSAT para redundância complementar;
- Data Centers Tier III/IV: que garantem redundância total em alimentação, conectividade e climatização.

Em redes de emergência ou apoio à monitorização remota, alguns operadores complementam a resiliência com tecnologias como **LoRaWAN** (Long Range Wide Area Network). LoRaWAN é um protocolo de comunicação sem fios de longo alcance e baixo consumo energético, utilizado para dispositivos IoT e sensores. Embora não substitua redes de telecomunicações tradicionais, pode fornecer uma camada adicional de redundância para alerta precoce, monitorização ambiental ou deteção de falhas em infraestruturas, sobretudo em zonas remotas.

Diversos operadores globais têm adotado abordagens multifacetadas para garantir a continuidade dos serviços em situações críticas.

No Japão, a NTT implementou uma estratégia de resiliência em várias camadas após o sismo e tsunami de 2011 [25]. Esta abordagem incluiu a criação de uma rede com quatro níveis redundantes de comunicação:

- Fibra ótica, com rotas físicas diversificadas entre regiões;
- Ligações rádio de micro-ondas para redundância de médio alcance em caso de falha da fibra;
- Redes móveis 4G/5G redundantes, com prioridade para serviços de emergência;
- VSATs automáticos (Very Small Aperture Terminal), utilizados para garantir conectividade mínima mesmo em zonas isoladas ou com falhas energéticas prolongadas.

Além disso, a NTT desenvolveu centros de comando móveis, alimentados por geradores diesel, e adotou práticas de segmentação geográfica e isolamento físico de equipamentos críticos, com controlo remoto e failover automático entre regiões.

Nos Estados Unidos, a AT&T recorre a unidades móveis conhecidas como SatCOLTs (*Satellite Cell on Light Truck*) [26], que são veículos equipados com torres telescópicas, antenas parabólicas e geradores próprios. Estas unidades funcionam como estações base móveis, capazes de restabelecer comunicações celulares de forma autónoma através de ligação por satélite, sendo frequentemente utilizadas em catástrofes naturais, falhas de rede alargadas ou eventos de grande escala. A AT&T mantém uma frota operacional destas unidades, testadas regularmente em exercícios de resposta a emergências, como parte da sua infraestrutura de continuidade de serviço. A Figura 2 apresenta uma imagem destes veículos.



Figura 2 - SatCOLTs usados pela AT&T.

No Reino Unido, a BT adotou uma abordagem centrada na segmentação geográfica e resiliência automatizada. As infraestruturas de *backbone* são divididas por zonas de risco, com capacidade de reencaminhamento automático em tempo real, baseada em protocolos de reencaminhamento rápido e análise contínua do estado da rede. A BT utiliza também sistemas de alarme em cascata, que permitem detetar falhas e ativar respostas sequenciais, como comutação de rotas, alocação de largura de banda adicional e isolamento de segmentos afetados. Em data centers e centrais principais, a BT mantém infraestruturas Tier III e IV, com múltiplos caminhos de alimentação elétrica, conectividade e climatização [27]. Além disso, são realizados testes regulares de recuperação de desastre (DR drills) e simulações de falhas com participação de equipas técnicas regionais.

Estas práticas internacionais demonstram a importância de abordagens multitecnológicas e planificadas — um princípio também observado, ainda que de forma mais localizada, no reforço da infraestrutura na Madeira após 2010.

Na Madeira, algumas destas medidas foram implementadas em escala regional após 2010, nomeadamente:

- uso de VSAT e ligações rádio (Feixe Hertziano) como redundância;
- backup energético reforçado em centrais e estações;
- monitorização remota com sistemas OTDR e NMS.

Embora a dimensão e recursos sejam mais limitados, o modelo madeirense segue os mesmos princípios estruturais de engenharia de resiliência aplicados a nível global.

### 3.5. Tecnologias Emergentes para Resiliência

A crescente complexidade das redes e a convergência entre serviços IP, óticos e móveis exigem abordagens inovadoras de gestão.

Três tecnologias emergentes destacam-se neste contexto: SDN (Software-Defined Networking), NFV (Network Function Virtualization) e Inteligência Artificial/Machine Learning (IA/ML).

Estas abordagens são vistas como o futuro da resiliência de redes, sendo já consideradas para evoluções futuras da infraestrutura madeirense.

#### **SDN (Software-Defined Networking)**

O conceito de SDN baseia-se na separação entre o plano de controlo e o plano de dados, permitindo uma gestão centralizada da rede através de controladores inteligentes.

Em caso de falha, os controladores SDN (como ONOS ou Cisco ACI) podem reconfigurar rotas e fluxos em tempo real, garantindo continuidade de serviço com latência mínima [9].

A título de exemplo, podemos indicar a Cisco ACI, Juniper Contrail, ONOS Controller.

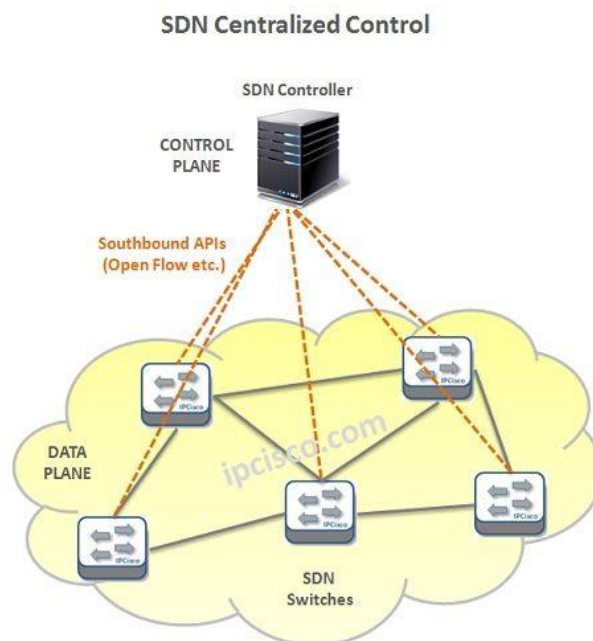


Figura 3 - Arquitetura SDN com controlo centralizado.

A figura 3 ilustra a arquitetura típica SDN com controlo centralizado, onde o controlador define políticas e caminhos de tráfego de forma dinâmica.

Esta separação de planos possibilita orquestração automatizada, monitorização contínua e adaptação proativa a falhas [9].

Numa arquitetura de rede tradicional, as funções de controlo e de encaminhamento do tráfego encontram-se integradas nos próprios equipamentos de rede, sendo a configuração e a gestão realizadas de forma distribuída e, muitas vezes, manual. Em contraste, numa abordagem baseada em Software Defined Networking (SDN), o plano de controlo é desacoplado do plano de dados, sendo centralizado num controlador lógico, o que permite uma gestão mais flexível, programável e dinâmica da rede, bem como uma adaptação mais rápida a alterações de tráfego e a eventos de falha.

Para melhor ilustrar as implicações desta separação de planos, a Figura seguinte apresenta uma comparação entre a arquitetura tradicional das redes e a abordagem baseada em Software Defined Networking (SDN), destacando as principais diferenças ao nível da gestão e controlo do tráfego.

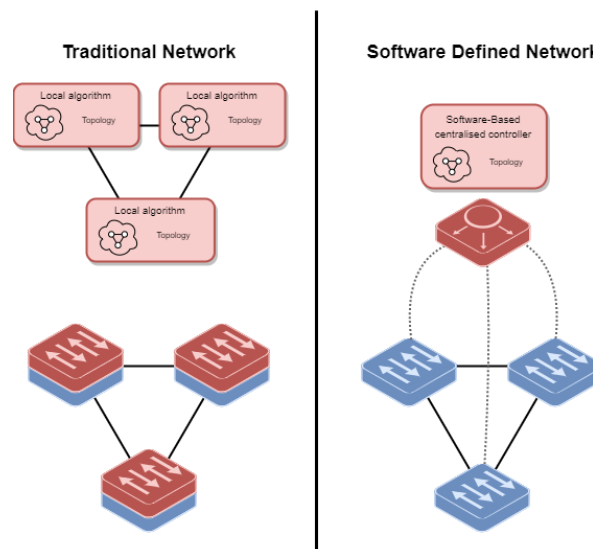


Figura 4 - Comparação entre arquitetura tradicional e arquitetura SDN.

Na arquitetura tradicional, as funções de controlo e de encaminhamento do tráfego encontram-se integradas nos próprios equipamentos de rede, sendo a configuração distribuída, estática e fortemente dependente de intervenção manual.

Em contraste, a arquitetura SDN separa o plano de controlo do plano de dados, centralizando as decisões num controlador lógico. Esta separação permite uma gestão programável da rede, com maior flexibilidade, visibilidade global e capacidade de reconfiguração dinâmica dos fluxos de tráfego. Do ponto de vista da resiliência, esta abordagem facilita o reencaminhamento automático em caso de falha e a adaptação rápida a alterações de carga ou indisponibilidade de ligações, reduzindo o impacto operacional de incidentes na infraestrutura.

### NFV (Network Function Virtualization)

NFV substitui equipamentos físicos (ex: firewalls, routers BGP) por funções virtualizadas (VNFs) alojadas em servidores genéricos. Isso permite instanciar rapidamente funções noutras nós em caso de falha, com replicação e sincronização dinâmica de estado. Plataformas como VMWare NSX e OpenStack são amplamente utilizadas.

A arquitetura de referência mais amplamente adotada para NFV é definida pelo grupo ETSI-MANO, que estabelece a separação entre a infraestrutura, as funções virtualizadas e os sistemas de orquestração.

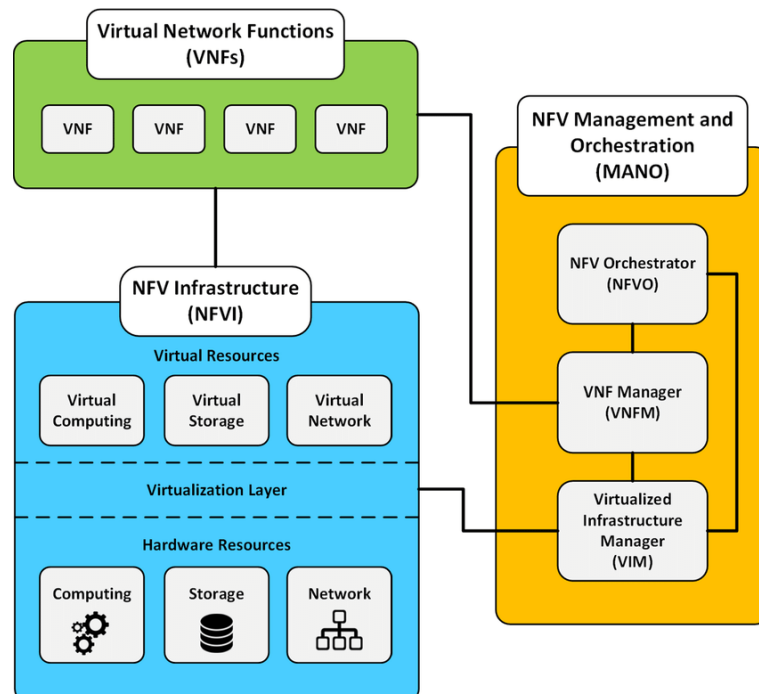


Figura 5 - Estrutura padrão ETSI-MANO da arquitetura NFV.

A figura 5 apresenta a arquitetura de referência ETSI-MANO [10], amplamente adotada para a implementação de Network Function Virtualization (NFV). Esta arquitetura organiza-se em três blocos principais: a infraestrutura física e virtual (NFVI), as funções de rede virtualizadas (VNFs) e a camada de gestão e orquestração (MANO).

O componente MANO é responsável pela orquestração dos recursos, gestão do ciclo de vida das VNFs e controlo da infraestrutura virtualizada. Esta separação funcional permite que serviços de rede tradicionalmente implementados em hardware dedicado sejam instanciados, replicados ou migrados dinamicamente em ambientes virtualizados.

Do ponto de vista da resiliência, a NFV permite uma recuperação mais rápida perante falhas, através da reinstanciação automática de funções e da redistribuição de serviços, contribuindo para arquiteturas mais flexíveis, escaláveis e tolerantes a falhas, alinhadas com os requisitos das redes de telecomunicações modernas.

### **Inteligência Artificial e Machine Learning (AI/ML)**

A aplicação de Inteligência Artificial (IA) na gestão de redes tem um potencial disruptivo e transformador. As principais aplicações incluem:

- **Deteção de anomalias** (ex: falhas ou degradações progressivas);
- **Previsão de falhas** através de modelos de *time-series forecasting*;
- **Autocorreção de rotas** com sistemas *self-healing* baseados em algoritmos preditivos;
- **Otimização de tráfego em tempo real**, como demonstrado pelo sistema Google B4 [11].

Empresas como **Google, Juniper, Nokia e Huawei** já integram IA nos seus sistemas de gestão de rede (NMS), permitindo decisões automáticas com base em análise de dados em tempo real. A integração de IA com SDN/NFV é hoje uma das principais linhas de desenvolvimento de redes resilientes de próxima geração (Next-Gen Networks) [9][11].

A Figura seguinte apresenta a forma como os componentes SDN, NFV e Inteligência Artificial se interligam numa arquitetura moderna de rede. A IA/ML atua como camada de supervisão e decisão inteligente, analisando dados em tempo real para apoiar o controlador

SDN. Este, por sua vez, orquestra funções de rede virtuais (VNFs) através de uma camada de infraestrutura flexível e programável.

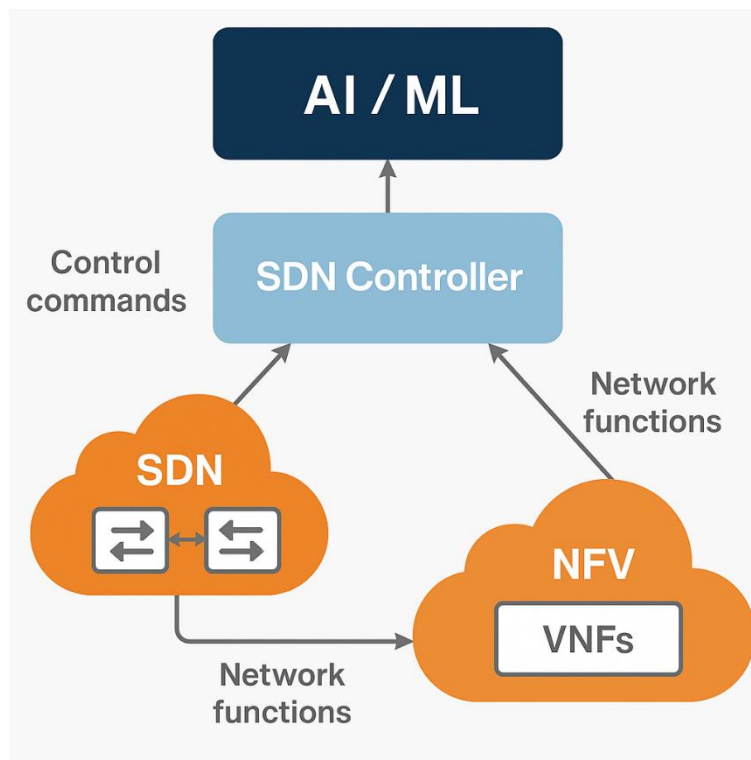


Figura 6 - Integração entre IA/ML, SDN e NFV numa rede inteligente [9][10].

Um dos exemplos mais reconhecidos de aplicação de **SDN para otimização de tráfego em tempo real** é o sistema **Google B4** [11]. Esta rede WAN privada interliga data centers da Google a nível global e foi uma das primeiras a operar com base numa arquitetura totalmente definida por software. O B4 utiliza **controladores centralizados**, que têm uma visão global da rede e são capazes de reconfigurar os caminhos dos fluxos de tráfego com base em critérios de prioridade, congestionamento ou falha de ligação. Esta abordagem permite alcançar uma utilização extremamente eficiente da largura de banda — frequentemente próxima de 100% — ao mesmo tempo que assegura **resiliência operacional e reencaminhamento automático**. A arquitetura da B4 combina segmentação lógica da rede com balanceamento de carga dinâmico, permitindo que os controladores ajustem a alocação de largura de banda com base em prioridades e tráfego em tempo real. A Google utiliza o controlador Orion para orquestração centralizada, aplicando políticas de reencaminhamento quase instantâneas quando deteta degradações ou falhas nas ligações principais. Este modelo de SDN é considerado uma das primeiras implementações globais em escala de data center

interconnects (DCIs), otimizando a utilização da largura de banda até 95–100%, mantendo resiliência a nível de *backbone*.

A Figura abaixo apresenta uma representação esquemática da arquitetura B4, destacando a separação entre o plano de controlo e o plano de dados, a utilização de protocolos como o OpenFlow e os pontos de presença nos diversos data centers.

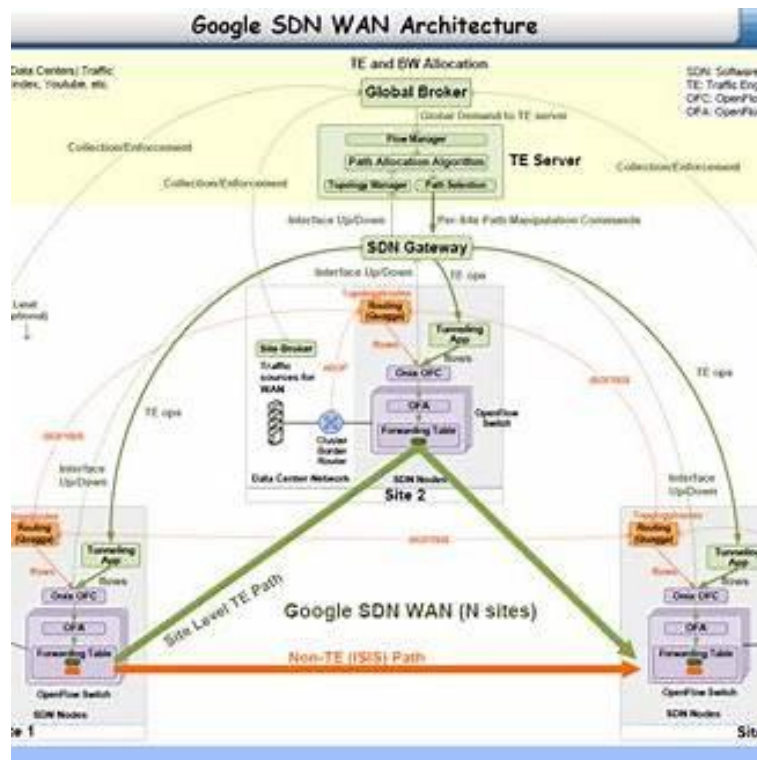


Figura 7 - Arquitetura SDN da rede Google B4.

### 3.6. Síntese e Integração com o Caso da Madeira

A análise do estado da arte demonstra que as melhores práticas internacionais em resiliência de redes combinam estratégias de redundância física, lógica e energética, suportadas por tecnologias emergentes de gestão inteligente.

Ao comparar estas abordagens com a realidade da Madeira, constata-se que várias medidas implementadas após 2010 seguem princípios semelhantes:

- topologias em anel SDH e DWDM com proteção automática;

- gestão centralizada via NMS (AGORA-NG, Web-TI);
- integração de redundância rádio e VSAT;
- segregação de serviços críticos e reforço energético.

Estas ações evidenciam um alinhamento progressivo com os padrões internacionais, embora persistam oportunidades de evolução através da adoção de soluções SDN/NFV e de sistemas de monitorização baseados em IA/ML.

Se um evento com características semelhantes ocorresse nos dias de hoje, os princípios orientadores da resposta técnica manter-se-iam essencialmente os mesmos, nomeadamente a necessidade de diversificação de percursos, eliminação de pontos únicos de falha e reforço da capacidade de recuperação da rede. No entanto, a maturidade tecnológica atualmente disponível permitiria uma resposta mais rápida, automatizada e flexível, suportada por arquiteturas baseadas em SDN/NFV, mecanismos avançados de monitorização em tempo real e maior integração entre camadas de controlo e operação. Assim, embora os objetivos de resiliência e redundância fossem equivalentes, as soluções concretas adotadas beneficiariam de um maior grau de automação, escalabilidade e inteligência operacional.

### **Conclusão do Capítulo 3**

O estudo das normas, modelos e tecnologias apresentados confirma que a resiliência e a redundância são elementos indispensáveis para a sustentabilidade das infraestruturas de telecomunicações.

O caso da Madeira, analisado à luz do estado da arte, revela uma aproximação gradual às boas práticas internacionais, tendo evoluído de uma rede reativa para uma rede estruturada, monitorizada e com redundância em múltiplas camadas.

Nos capítulos seguintes, será detalhado como estas estratégias foram operacionalizadas na prática durante e após o temporal de 2010, analisando as ações técnicas, os resultados obtidos e as lições aprendidas.

## 4. Tecnologias de Rede em Telecomunicações

As redes de telecomunicações modernas baseiam-se em arquiteturas e tecnologias que permitem a transmissão de grandes volumes de dados com elevada fiabilidade, escalabilidade e disponibilidade.

Este capítulo apresenta uma análise das principais tecnologias que constituem o núcleo das infraestruturas de transmissão na Região Autónoma da Madeira — SDH (Synchronous Digital Hierarchy), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), rede de transporte em fibra ótica e ASDH (Access SDH) — destacando as suas características, vantagens e papel na evolução pós-temporal de 2010.

As tecnologias descritas neste capítulo são apresentadas com base em recomendações da ITU-T e em literatura técnica de referência na área das redes de telecomunicações [14][16][19].

### 4.1. SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

A Hierarquia Digital Síncrona (SDH) é um padrão de transmissão ótica desenvolvido para substituir a Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH), que apresentava limitações na multiplexagem e sincronização dos sinais digitais. O SDH foi padronizado pela International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) na recomendação G.707 [28].

Este padrão possibilita a transmissão eficiente de múltiplos tipos de tráfego, incluindo Ethernet over SDH (EoSDH), ATM (Asynchronous Transfer Mode) e MPLS (Multiprotocol Label Switching) [29], tornando-se essencial para redes de telecomunicações modernas.

A principal inovação do SDH reside na multiplexagem síncrona, que simplifica a extração e inserção de sinais sem necessidade de demultiplexagem completa, reduzindo a latência e aumentando a eficiência da transmissão.

#### **Arquitetura e Estrutura de Quadros**

A transmissão SDH ocorre em quadros hierárquicos denominados STM-N (Synchronous Transport Module - Level N), onde N define a taxa de transmissão. As velocidades mais comuns, conforme ilustrado na Figura 8, incluem:

- STM-1 (155.52 Mbps);
- STM-4 (622.08 Mbps);
- STM-16 (2.5 Gbps);
- STM-64 (10 Gbps).

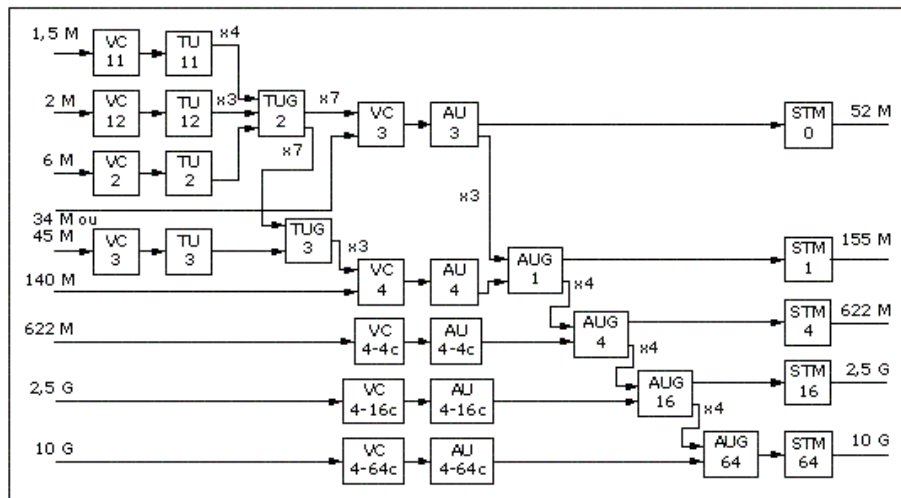


Figura 8 - Estrutura de multiplexação SDH. Fonte [28].

Cada quadro/trama SDH é composto por três áreas principais:

1. Overhead de Seção (Seção de Cabeçalhos) – Contém informações de gestão da rede, sincronização e alarmes;
2. Carga Útil (Payload) – Espaço destinado ao transporte dos dados;
3. Bit de Justificação – Utilizado para alinhar sinais com pequenas variações na frequência de relógio.

A modularidade do SDH permite a extração e inserção de sinais individuais sem necessidade de demultiplexação completa, o que reduz a latência e simplifica a operação da rede.

## Mecanismos de Proteção e Redundância

Uma das principais vantagens do SDH é a existência nativa de mecanismos de proteção, que garantem tempos de recuperação inferiores a 50 ms em caso de falha [28]:

- Automatic Protection Switching (APS): comutação automática entre percursos redundantes;
- Multiplex Section Protection (MSP): proteção ao nível da multiplexagem;
- Sub-Network Connection Protection (SNCP): proteção ponto-a-ponto entre nós;
- Self-Healing Rings: topologia em anel que permite reencaminhamento automático do tráfego.

Estes mecanismos tornaram o SDH a base das redes de transporte críticas durante mais de duas décadas.

## SDH na Madeira

Na Madeira, a infraestrutura SDH foi concebida para fornecer uma rede de transmissão robusta e escalável, permitindo o transporte eficiente de voz, dados e vídeo. Esta rede foi estruturada em duas camadas principais:

- **SDH Core** (Rede de *Backbone* SDH)

A rede Core SDH interligava os principais pontos estratégicos da Madeira e estabelecia conectividade com o continente e os Açores através do Anel Ótico da Madeira (AOM) e do Anel Continente-Açores-Madeira (CAM). As suas características principais são:

- Utilização de STM-16 (2,5 Gbps) e STM-64 (10 Gbps) para interligações entre centrais principais.
- Implementação de proteção MSP (Multiplex Section Protection) para garantir redundância.
- Integração com a rede DWDM, permitindo a multiplexagem de vários comprimentos de onda para aumento da capacidade de transmissão.

A Figura seguinte ilustra a rede SDH na Madeira.





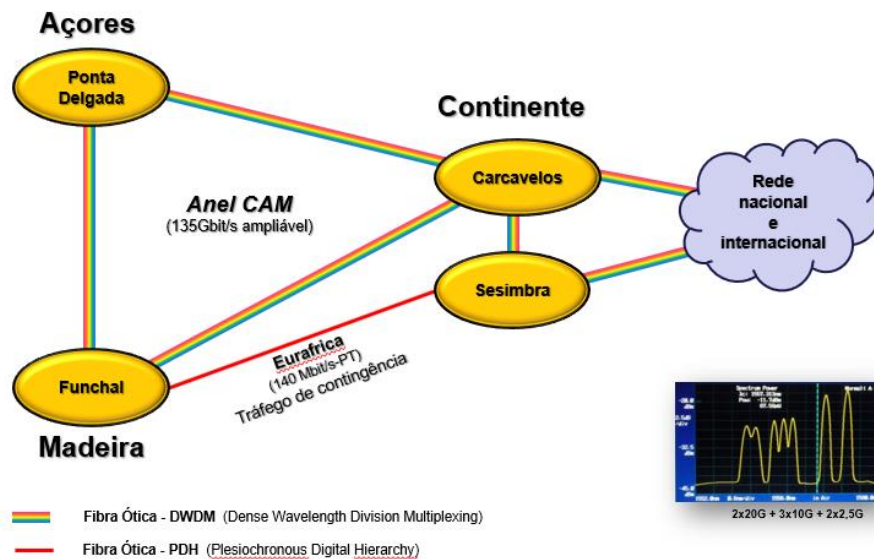


Figura 11 - Diagrama do anel Continente-Açores-Madeira (CAM) em 2009. Fonte [30].

## Princípio de Funcionamento

O funcionamento do DWDM baseia-se em três etapas fundamentais:

1. Multiplexagem: os diferentes fluxos de dados são convertidos em sinais óticos de comprimentos de onda distintos por meio de *transponders*;
2. Transmissão: os sinais multiplexados percorrem a mesma fibra ótica, mantendo-se separados no domínio espectral;
3. Demultiplexagem: no destino, os sinais são separados por um *demultiplexador ótico* e encaminhados para os respectivos circuitos.

Esta técnica permite atingir taxas elevadas de transmissão, da ordem das centenas de gigabits por segundo por canal ótico, otimizando o uso da infraestrutura e reduzindo significativamente o custo por bit transmitido [16].

A Figura abaixo (12) ilustra o princípio básico do funcionamento do DWDM:



Figura 12 - Sistema DWDM.

### Vantagens do DWDM

O DWDM tornou-se essencial para redes de telecomunicações devido aos seguintes benefícios [16]:

- **Aumento Exponencial da Capacidade** – Permite centenas de canais na mesma fibra, otimizando o uso da infraestrutura existente;
- **Redundância e Proteção** – Implementação de redes resilientes, com capacidade de comutação automática em caso de falha;
- **Escalabilidade** – Expansão da rede sem necessidade de mudanças significativas na infraestrutura física;
- **Baixo Custo Operacional** – Maximiza o aproveitamento da fibra existente, reduzindo a necessidade de novas implementações;
- **Compatibilidade com Tecnologias Existentes** – Pode ser integrado a redes SDH, MPLS e Ethernet, permitindo a migração gradual para novas infraestruturas.

### Aplicação Prática do DWDM

O DWDM é amplamente utilizado em redes de telecomunicações de alta capacidade, especialmente nos seguintes cenários:

- **Interligação de Data Centers** – Utilizado para transporte de tráfego de alta velocidade entre infraestruturas de armazenamento e processamento de dados;

- **Infraestruturas de *Backbone*** – Implementado em redes nacionais e internacionais para transporte de dados de longa distância;
- **Expansão da Capacidade da Rede** – Facilita a adição de novos serviços sem necessidade de implantação de novas fibras óticas;
- **Telecomunicações Submarinas** – Aplicado em cabos submarinos para conexões entre continentes, permitindo tráfego de alta densidade.

## DWDM na Madeira

Até 2010, o DWDM encontrava-se numa fase embrionária e sem grande cobertura regional, limitando-se a troços de interligação com o continente e segmentos de *backbone* restritos.

A reconstrução pós-temporal proporcionou os recursos e a visão estratégica necessários para expandir o DWDM em anel em toda a ilha, criando o Anel Ótico da Madeira (AOM) [31][8].

Este anel interliga as principais centrais/estações do operador, assegurando redundância física e reencaminhamento automático do tráfego.

A rede DWDM passou a constituir o suporte fundamental da infraestrutura regional, integrando os sistemas SDH e GPON e permitindo a gestão centralizada do tráfego de voz, dados e vídeo com alta disponibilidade e baixa latência, conforme ilustrado na Figura 13.

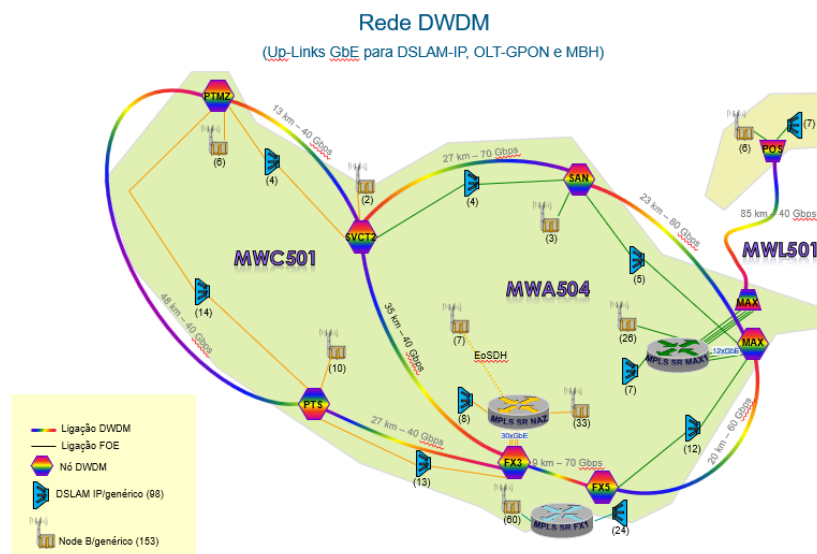


Figura 13 - Rede DWDM na Madeira. Fonte [31].

Os principais benefícios obtidos foram:

- **Proteção contra falhas de infraestrutura** – O anel DWDM permitiu encaminhamento (*routing*) dinâmico do tráfego em caso de falha de uma das ligações principais;
- **Maximização de utilização da fibra instalada** – A implementação de soluções DWDM na ilha da Madeira possibilitou a introdução de diversidade espacial e tecnológica nos uplinks dos equipamentos DSLAM (rede ADSL) ou OLT (rede GPON): Um dos *uplinks* era encaminhado em fibra “escura” até uma estação principal (Funchal) e o outro era securizado, via rede DWDM;
- **Aumento da largura de banda** – Suporte para serviços de Internet, voz e TV com alta qualidade e menor latência;
- **Integração com Redes de Acesso** – Facilitou a expansão da fibra ótica até às residências (FTTH), melhorando os serviços de banda larga na região.

### 4.3. Rede de Transporte em Fibra Ótica

A fibra ótica é o meio físico que sustenta as redes de telecomunicações modernas, permitindo transmissões a velocidades extremamente elevadas e com baixíssima atenuação. Na Madeira, a rede de transporte em fibra ótica representa a espinha dorsal da infraestrutura de telecomunicações, interligando todas as camadas de rede — SDH, DWDM e IP/MPLS.

#### **Componentes da Infraestrutura:**

Os principais elementos da rede de transporte em fibra ótica incluem:

- **Cabos de Fibra Ótica:** Compostos por múltiplas fibras monomodo, utilizados em configurações aéreas (até 144 fibras) ou subterrâneas em condutas (até 288 fibras), dependendo do tipo de via e da proteção requerida;
- **ODF (*Optical Distribution Frame*):** Estruturas utilizadas para a organização e terminação das fibras em estações e armários de telecomunicações, com conectores do tipo E2000 (SC/APC), entre outros;

- Sistema de Monitorização OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer): Tecnologia de monitorização remota usada para identificar ruturas, atenuações ou degradações de sinal na fibra ótica [17];
- Cadastro de Infraestruturas: Sistema de documentação da localização, percurso e características dos cabos, essencial para manutenção e expansão eficiente da rede [17].

A existência de um cadastro atualizado e de um sistema de monitorização eficaz permite, do ponto de vista operacional, uma gestão mais proativa da infraestrutura, contribuindo para a redução do tempo de indisponibilidade e para a melhoria da capacidade de resposta a falhas.

### **Importância do Cadastro na Manutenção da Rede**

A gestão eficaz do cadastro da rede de transporte em fibra ótica é um fator determinante para a fiabilidade da infraestrutura e a rapidez de resposta em situações de falha. Um cadastro bem estruturado e atualizado permite:

- Localização rápida de falhas: em caso de ruturas ou degradação da fibra, facilita o planeamento da intervenção técnica;
- Manutenção preventiva otimizada: reduz o tempo de indisponibilidade da rede e melhora a gestão de recursos;
- Planeamento eficiente de novas ligações: elimina a necessidade de levantamentos físicos exaustivos e permite a criação de percursos com diversidade física, essencial para garantir redundância.

A conjugação entre o cadastro e sistemas de monitorização como o OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) possibilita, na prática operacional, uma abordagem mais proativa à gestão da rede, com impacto positivo na continuidade do serviço e na resiliência operacional.

### **Evolução da Rede Ótica na Madeira**

Até 2010, a fibra ótica estava limitada a ligações troncais entre centrais, com poucos percursos redundantes e cobertura restrita.



Este diagrama (Figura 14) ilustra a estrutura do AOM, mostrando como os principais pontos de rede na Madeira são interligados através de fibra ótica.

## 2. Ligações de Transporte Secundárias

Além do *backbone* principal, a rede de transporte inclui ligações secundárias que permitem a conectividade de acessos empresariais, sites da rede móvel, armários de telecomunicações e redes de distribuição de dados. Os seus principais componentes são:

- Ligações ponto-a-ponto em fibra ótica para suportar serviços de alta capacidade;
- Interligações entre DSLAMs, OLTs GPON e estações rádio (rede móvel);
- Expansão da fibra ótica para cobertura de áreas suburbanas e remotas.

## Conclusão

A rede de transporte em fibra ótica é a infraestrutura fundamental sobre a qual assentam as redes de telecomunicações modernas. Embora seja uma rede passiva, a sua gestão e manutenção adequadas são cruciais para garantir a estabilidade e resiliência das redes de transmissão.

Esta modernização elevou a fiabilidade e a capacidade da rede, permitindo ofertas comerciais de gigabit e suporte de tráfego de quinta geração (5G).

## 4.4. Rede ASDH na Madeira

### Introdução à ASDH (Access Synchronous Digital Hierarchy)

A ASDH (Access SDH) é uma extensão da tecnologia SDH, desenvolvida para proporcionar flexibilidade e escalabilidade na rede de acesso, através da utilização de equipamentos modulares e de baixo consumo.

Na Madeira, a expansão da ASDH após 2010 foi fundamental para estender a redundância e a resiliência até ao nível do cliente empresarial. A Figura 15 ilustra os principais nós da rede ASDH na Madeira.

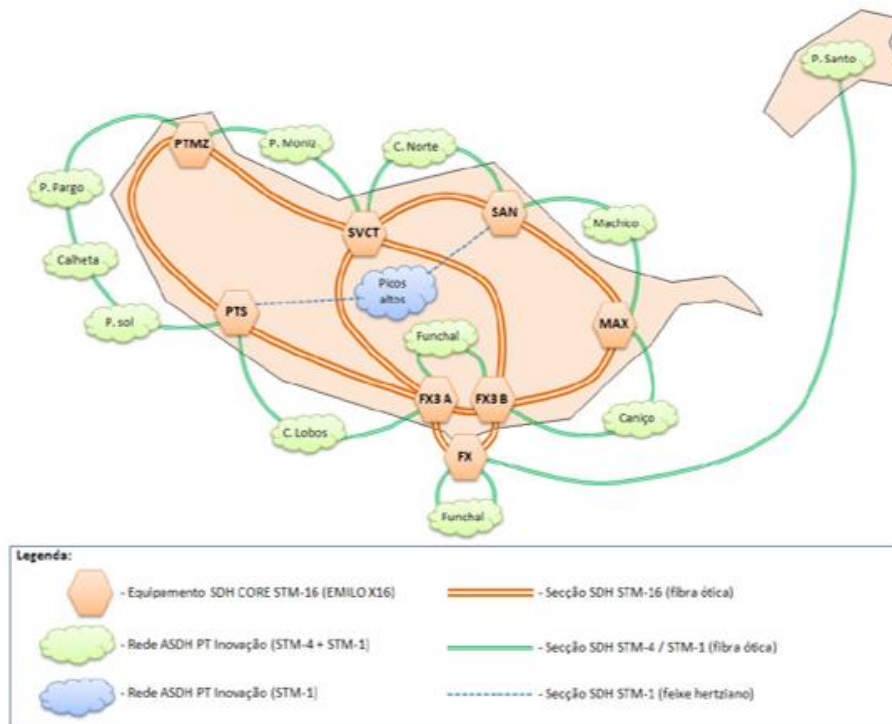


Figura 15 - Topologia simplificada da Rede ASDH na Madeira. Fonte [32].

## Equipamentos EMILO da PT Inovação

A rede ASDH foi construída com base em equipamentos EMILO desenvolvidos pela PT Inovação [15].

Estes equipamentos (SNT, S14, S14E, X16) suportam interfaces E1, E3, Ethernet e STM-N, permitindo:

- Agregação de tráfego de voz e dados;
- Configuração em topologias ponto-a-ponto, estrela ou anel;
- Gestão local e remota através das plataformas Web-TI e AGORA-NG [24].

A modularidade, acessibilidade e fiabilidade destes sistemas permitiram expandir a rede de acesso com redundância SNCP e MSP, garantindo continuidade de serviço mesmo em caso de falha parcial.

## EMILO SNT

O EMILO SNT (Figura 16) é um equipamento modular otimizado para a agregação eficiente de tráfego SDH e Ethernet, garantindo conectividade redundante e escalável. As suas características principais são:

- Suporte para STM-1 (155 Mbps).
- Interfaces de acesso: E1, E3, SHDSL, Ethernet (FE, GbE).
- Modularidade: ConFiguração flexível para operação em ponto a ponto ou anel.
- Gestão local via Web-TI e gestão remota via AGORA-NG.



Figura 16 - Arquitetura do EMILO SNT. Fonte [32].

## EMILO S14 e S14E

Os equipamentos EMILO S14 (Figura 17) e S14E (Figura 18) foram amplamente utilizados na Madeira para expansão da rede ASDH, permitindo ligações redundantes e suporte a vários tipos de tráfego. As suas principais características são:

- Suporte para STM-1, STM-4 e STM-16.
- Possibilidade de configuração em anel, estrela ou ponto a ponto.
- Quatro slots para interfaces tributárias (S14) ou oito slots (S14 EXP).
- Modularidade elevada, permitindo a inserção de placas adicionais.



Figura 17 - Arquitetura do EMILO S14 BOX. Fonte [32].

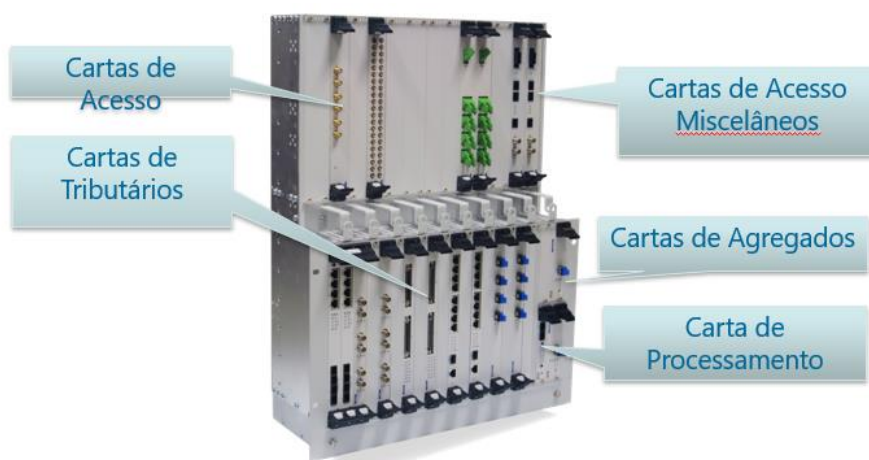


Figura 18 - Arquitetura do EMILO S14 Expandido. Fonte [32].

## EMILO X16

O EMILO X16 (Figura 19) foi um dos equipamentos mais robustos da rede ASDH na Madeira, concebido para suportar tráfego de alta capacidade. As suas características principais são:

- Escalabilidade até 40 Gbps (256 STM-1);
- Granularidade Virtual Container level 12 (VC-12), VC3, VC-4;
- Suporte para múltiplos anéis ASDH e SDH.
- Proteção de percurso através de SNCP e MSP [22].
- Interfaces STM-N desde 155Mb/s até 2,5Gb/s;
- Gestão centralizada via AGORA-NG.

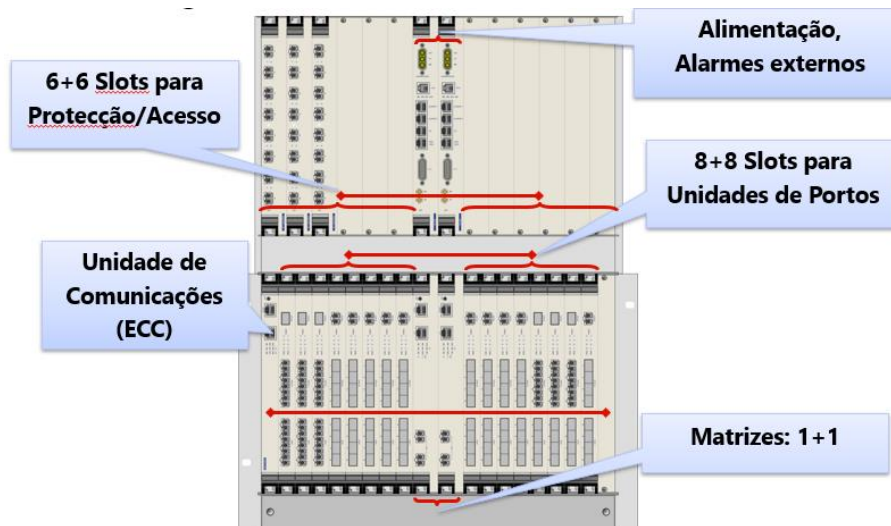


Figura 19 - Organização interna do EMILO X16. Fonte [32].

### Sistemas de Gestão da Rede ASDH

Para garantir a monitorização e configuração eficiente dos equipamentos EMILO, a PT utilizou duas plataformas principais [32]:

- Web-TI → Gestão e operação local dos equipamentos via browser, conforme ilustrado na Figura 20.



Figura 20 - Interface de gestão local. Fonte [32].

- AGORA-NG → Gestão remota (NMS), provisão de circuitos e alarmística, conforme ilustrado na Figura 21.

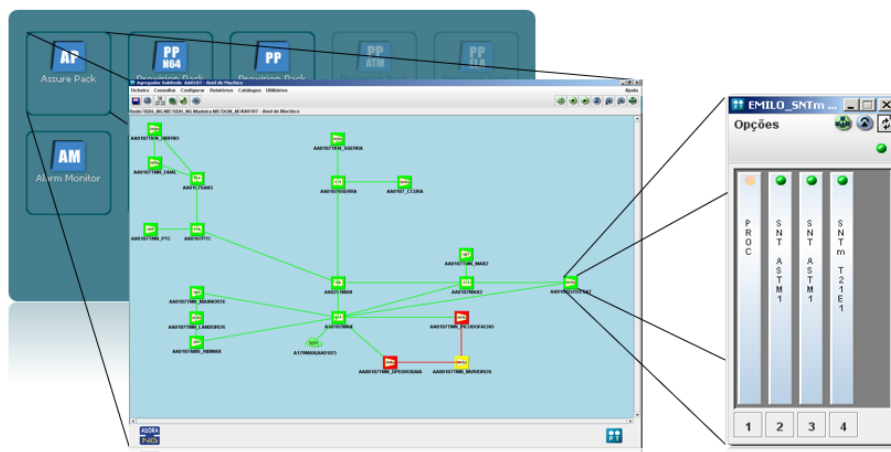


Figura 21 - Interface de gestão remota [32].

## Conclusão

A implementação da rede ASDH com os equipamentos EMILO foi uma das medidas mais importantes para melhorar a redundância e resiliência da infraestrutura de telecomunicações na Madeira. Graças à sua modularidade e escalabilidade, a ASDH possibilitou ligações seguras e de alta disponibilidade, assegurando a continuidade dos serviços mesmo após eventos críticos, como o temporal de 2010.

Após 2010, a ASDH passou de uma implementação experimental para uma infraestrutura de acesso essencial, ligando empresas, serviços públicos e estações móveis à rede de *backbone* ótico.

A expansão da ASDH acompanhou a instalação da nova fibra e permitiu maior cobertura geográfica e diversidade tecnológica, consolidando a transição da Madeira para uma rede de telecomunicações totalmente baseada em fibra ótica, conforme ilustrado nas Figuras 22, 23 e 24.

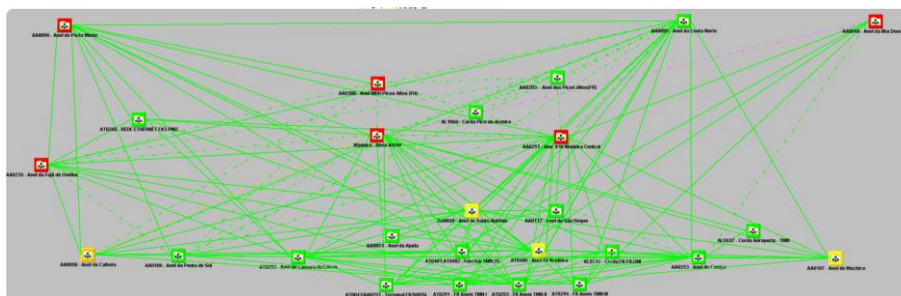


Figura 22 - Interligação de diversas estruturas ASDH na Madeira.

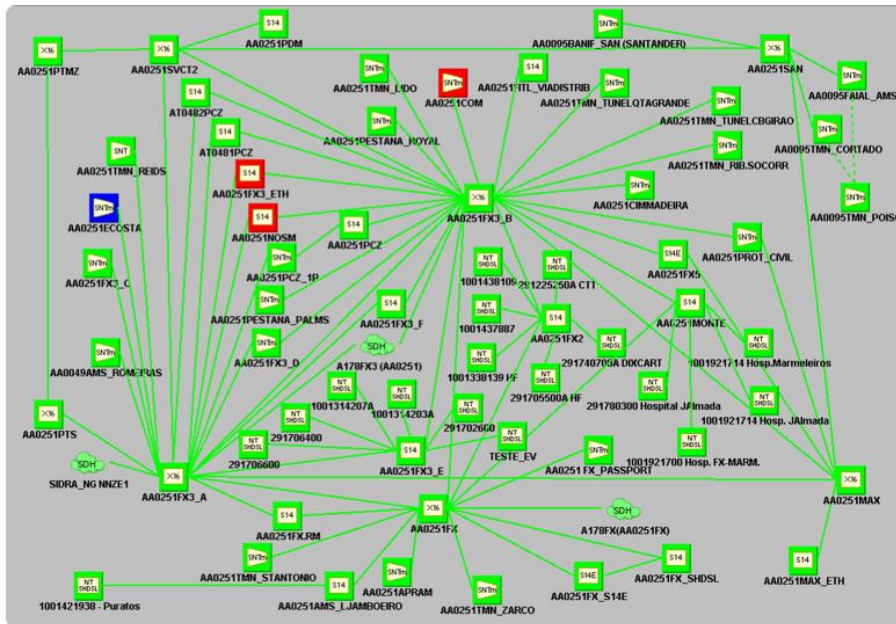


Figura 23 - Anel X16 Madeira Central.



Figura 24 - Anel de São Roque (Universidade da Madeira).

## Conclusão do Capítulo 4

A análise das tecnologias apresentadas neste capítulo demonstra a evolução significativa da arquitetura de telecomunicações da Madeira após o temporal de 2010. A integração das soluções SDH, DWDM, fibra ótica e ASDH criou uma infraestrutura coesa, escalável e altamente resiliente.

Enquanto o SDH garantiu a base de transporte síncrono, o DWDM multiplicou a capacidade de transmissão, e a fibra ótica forneceu o suporte físico necessário para a modernização.

A ASDH, por sua vez, estendeu a redundância até à periferia da rede, permitindo a continuidade operacional mesmo em cenários de falha.

Os conceitos, modelos e tecnologias apresentados neste capítulo fornecem o enquadramento técnico necessário para a análise do comportamento de redes de telecomunicações em cenários de falha extrema. No capítulo seguinte, estes princípios são confrontados com o caso concreto do temporal de 20 de fevereiro de 2010 na Região Autónoma da Madeira, permitindo avaliar o impacto real de um evento extremo sobre uma infraestrutura com as características descritas.

## 5. O Temporal de 20 de fevereiro de 2010: Impacto nas Telecomunicações

O temporal de 20 de fevereiro de 2010 constitui um dos eventos meteorológicos mais severos alguma vez registados na Região Autónoma da Madeira.

Este episódio extremo provocou chuvas torrenciais, aluviões e deslizamentos de terra que devastaram zonas urbanas e infraestruturas vitais, afetando de forma profunda a rede de telecomunicações regional.

O presente capítulo analisa o impacto técnico e operacional deste evento sobre as redes de telecomunicações, descrevendo os danos observados, as limitações das infraestruturas existentes e as soluções transitórias implementadas para o restauro dos serviços.

A análise é complementada com dados técnicos e relatórios operacionais que documentam a resposta das equipas no terreno e as lições extraídas do processo de recuperação.

### 5.1. Contextualização do Evento

O evento de 20 de fevereiro de 2010 constituiu uma das ocorrências meteorológicas mais severas da história recente da Madeira [1]. Uma depressão atlântica gerou, segundo o relatório do IPMA [33] chuvas torrenciais e ventos fortes, resultando em aluviões intensos que afetaram sobretudo os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. O evento causou 51 vítimas mortais, 250 feridos e mais de 600 desalojados, além de prejuízos materiais superiores a 1.000 milhões de euros. O evento foi também alvo de análise multidisciplinar, integrando contributos de académicos, engenheiros e entidades regionais. O eBook editado pela Associação Portuguesa de Riscos [34] reforça a importância da memória coletiva e da aprendizagem com o passado, destacando medidas estruturais e não estruturais que visam aumentar a resiliência da Região Autónoma da Madeira

A cidade do Funchal foi uma das mais afetadas, com ribeiras a transbordar, arrastando carros, pontes e edifícios inteiros. A força das águas destruiu estradas, causando o colapso de infraestruturas fundamentais. As Figuras 25 e 26 ilustram a severidade do evento.



*Figura 25 - Aspetos da aluvião de 20 de fevereiro de 2010 no Funchal. Fonte [1].*



*Figura 26 - Aspetos da aluvião de 20 de fevereiro de 2010 no Funchal (2). Fonte [1].*

## **Fatores Geológicos e Climáticos**

A Madeira apresenta um relevo extremamente acidentado, com altitudes superiores a 1.800 metros e declives muito acentuados. A sua rede hidrográfica é composta por ribeiras de regime intermitente e torrencial, que descem de forma abrupta das montanhas para o mar. Durante períodos de precipitação intensa, estas ribeiras transformam-se em canais de

escoamento rápido, transportando grandes quantidades de material sólido (pedras, troncos e lama), aumentando significativamente o seu poder destrutivo [1].

A Figura 27 mostra os (elevados) perfis longitudinais das ribeiras em análise no Funchal e da ribeira dos socorridos, em Câmara de Lobos.

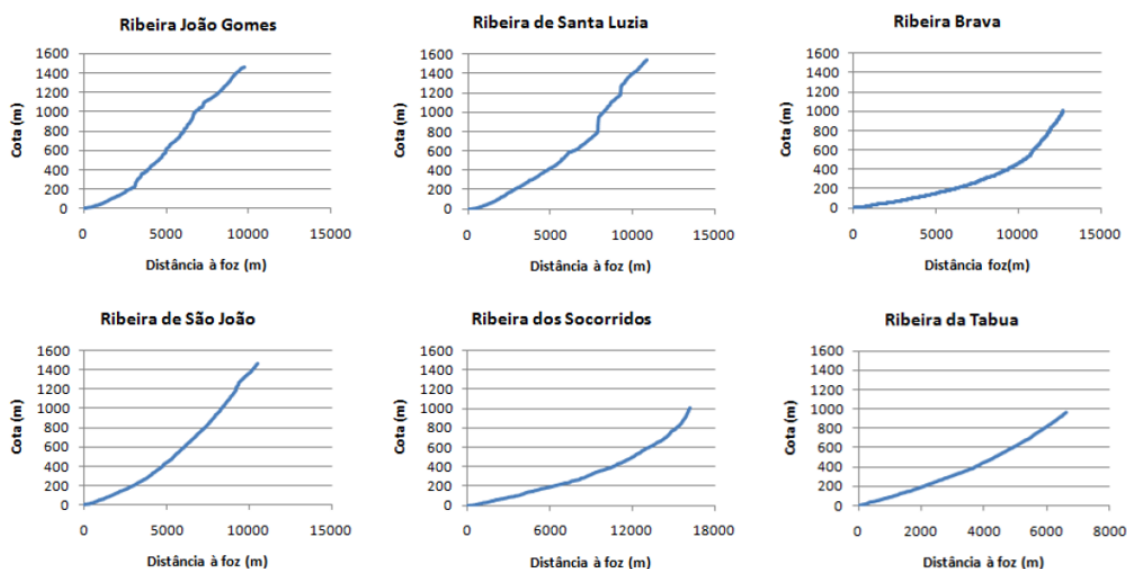


Figura 27 - Perfis longitudinais das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos. Fonte [1].

A ocupação urbana em zonas ribeirinhas também contribuiu para o agravamento dos impactos do temporal, pois muitas infraestruturas foram construídas em áreas de risco elevado, sujeitas a cheias rápidas e deslizamentos de terras.

### Dados Meteorológicos e Intensidade da Precipitação

O evento ocorreu após um período prolongado de chuvas, que saturou os solos e reduziu a capacidade de absorção da água. O temporal teve início às 05h00 da manhã e intensificou-se entre as 08h00 e as 13h00, atingindo valores extremos de precipitação:

- 100 mm em 1 hora nas áreas mais afetadas (o equivalente a um mês de chuva em Lisboa);
- Mais de 400 mm de chuva acumulada em 24 horas em algumas zonas de altitude;
- Fluxos de água superiores a 600 m<sup>3</sup>/s nas ribeiras do Funchal e da Ribeira Brava.

A precipitação intensa teve variação espacial significativa, com algumas áreas recebendo mais do dobro da quantidade de chuva registada noutras zonas próximas, como mostra a Figura 28.

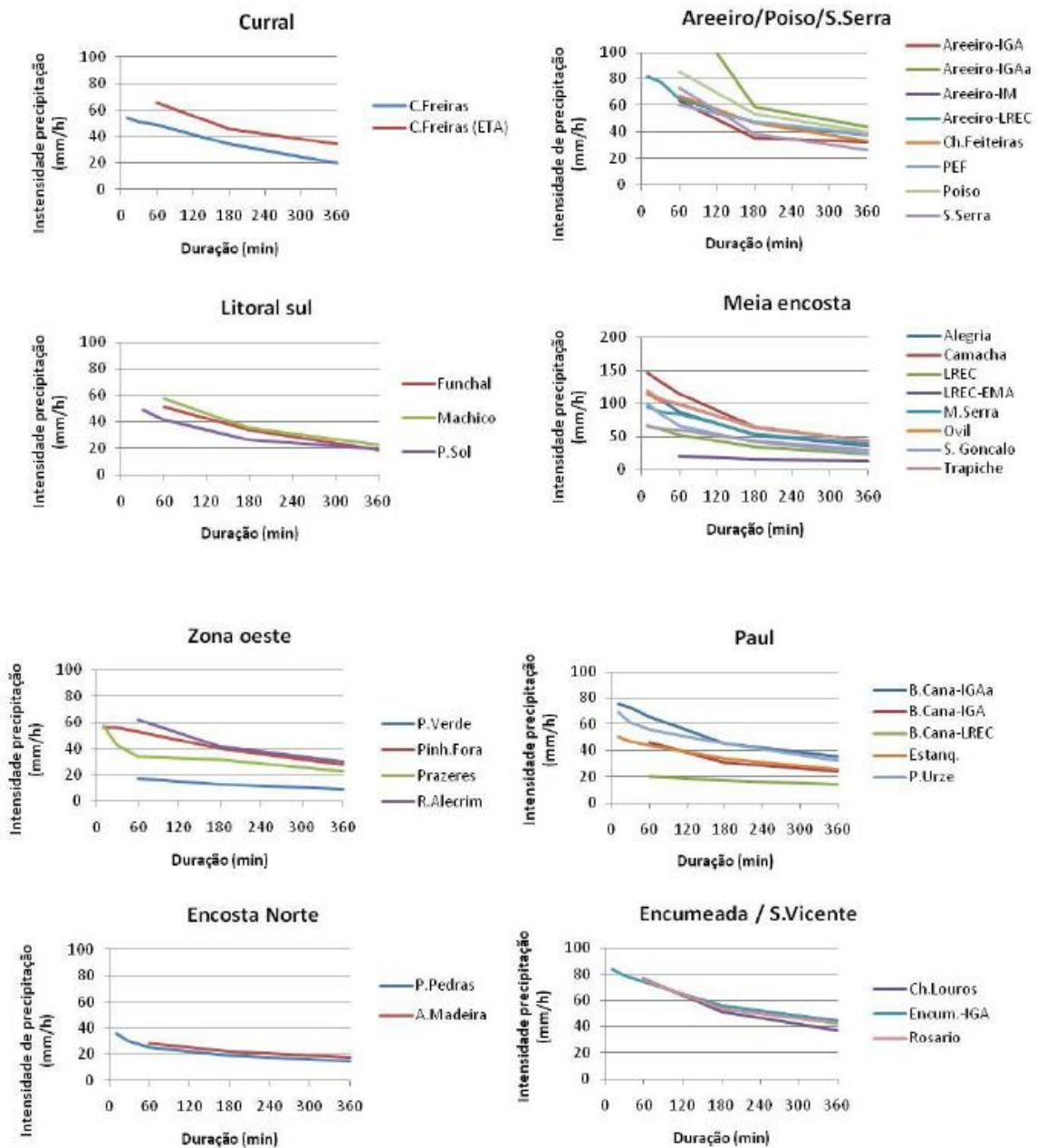


Figura 28 - Distribuição espacial da precipitação acumulada durante o evento. Fonte [1].

A Figura 28 evidencia a elevada variabilidade espacial da precipitação durante o evento de 20 de fevereiro de 2010, observando-se diferenças significativas tanto na intensidade como na duração da chuva entre zonas geográficas relativamente próximas. Destacam-se

áreas onde a intensidade de precipitação se manteve elevada durante períodos mais prolongados, contrastando com outras regiões onde se verificou uma diminuição mais rápida, o que contribuiu para a ocorrência localizada de cheias e movimentos de vertente.

### Bacias Hidrográficas Mais Afetadas

As principais ribeiras afetadas foram:

- Ribeira de João Gomes (Funchal)
- Ribeira de Santa Luzia (Funchal)
- Ribeira de São João (Funchal)
- Ribeira Brava

Estes cursos de água registaram fluxos extremamente elevados, com cheias repentinas que arrastaram edifícios, veículos e infraestruturas. A Figura 29 ilustra a localização das bacias hidrográficas mais afetadas pelo evento.

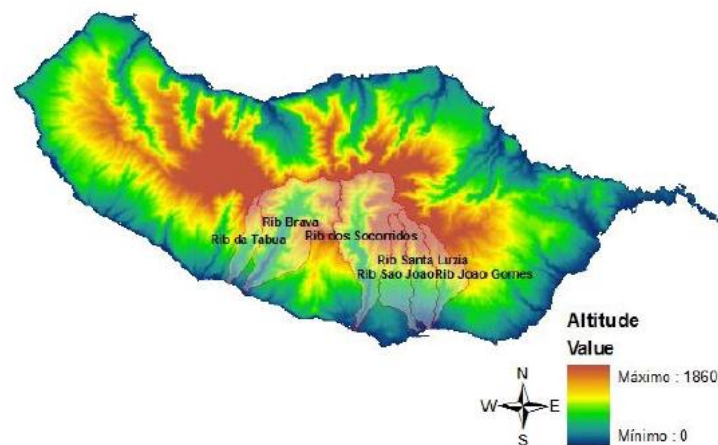


Figura 29 - Localização das bacias hidrográficas afetadas pelo evento. Fonte [1].

Os caudais de ponta registados foram extraordinários, com valores estimados entre 130 m<sup>3</sup>/s e 663 m<sup>3</sup>/s, o que superou largamente a capacidade normal destas ribeiras.

Os efeitos do evento extremo estenderam-se para além dos impactos hidrológicos, afetando de forma significativa diversas infraestruturas críticas da ilha. A análise detalhada do impacto nas redes de telecomunicações é apresentada na secção 5.2.

A destruição das estradas e pontes dificultou ainda mais o acesso das equipas técnicas às infraestruturas afetadas, atrasando os trabalhos de restauro das telecomunicações.

O impacto visual da destruição da aluvião pode ser observado através da imagem de satélite da pluma de sedimentos no mar, evidenciando o arrastamento de detritos das ribeiras para o oceano, conforme mostra a Figura 30.



*Figura 30 - Imagem de satélite da pluma de sedimentos no mar após o evento. Fonte [1].*

## 5.2. Impacto nas Redes de Telecomunicações

O temporal de 20 de fevereiro de 2010 provocou danos severos nas infraestruturas de telecomunicações da Madeira. As chuvas intensas, aluviões e deslizamentos de terra afetaram gravemente vários elementos da rede, resultando na interrupção de serviços essenciais e revelando fragilidades estruturais em diversas áreas da ilha.

O impacto pode ser analisado em três dimensões principais: danos físicos à infraestrutura, constrangimentos operacionais às equipas técnicas, e ações corretivas implementadas posteriormente.

## Danos Físicos na Infraestrutura

O evento causou múltiplas ruturas e falhas ao longo da rede de transmissão e acesso [8]. Entre os danos registados destacam-se:

- **Ruturas em cabos de fibra ótica**, provocadas por deslizamentos de terra, destruíram ligações críticas entre centrais, nomeadamente nos eixos Funchal–Ribeira Brava e Funchal–Machico;
- **Inundações em centrais e falhas elétricas** comprometeram o funcionamento normal dos equipamentos de transmissão, incluindo SDH e DWDM;
- **Colapso de infraestruturas de suporte**, como armários de rua, estações e torres, devido à destruição de vias e estruturas de acesso;
- **Percursos redundantes falharam em algumas zonas** devido à destruição simultânea de múltiplos caminhos físicos, evidenciando a dependência excessiva de certas rotas.

Estes danos resultaram na interrupção dos serviços de voz, dados e comunicações móveis, afetando residências, empresas e instituições públicas, incluindo serviços de emergência e centros de saúde [34].

## Impacto Operacional e Resposta das Equipas Técnicas

As condições no terreno impuseram sérias limitações às equipas técnicas encarregues de restaurar os serviços:

- **Acesso condicionado**: muitas áreas permaneceram isoladas por vários dias, o que dificultou a avaliação e intervenção nas infraestruturas afetadas;
- **Falta de redundância operacional**: a falha de trajetos redundantes obrigou ao redirecionamento manual de tráfego em redes SDH e DWDM, sobrecarregando os circuitos ainda operacionais;
- **Problemas de energia e combustível**: a indisponibilidade de eletricidade e dificuldades no abastecimento de geradores dificultaram a reposição imediata de serviços críticos;
- **Necessidade de coordenação com autoridades locais**: as intervenções tiveram de ser articuladas com entidades como a Proteção Civil e autarquias, em contexto de emergência alargada.

Apesar dos desafios, a reposição progressiva da rede foi possível com ações prioritárias centradas nas comunicações de emergência, centros de saúde, forças de segurança e infraestruturas críticas.

### **Medidas Corretivas e Melhorias Implementadas**

Após a fase inicial de resposta, foram desenvolvidas várias medidas corretivas com o objetivo de reforçar a rede e prevenir impactos semelhantes em eventos futuros. Entre as principais iniciativas destacam-se:

- **Construção de novas rotas alternativas de fibra ótica**, com vista à diversificação dos percursos físicos e redução de pontos únicos de falha;
- **Expansão da rede DWDM**, permitindo comutação automática de tráfego e maior resiliência da rede de *backbone*;
- **Reforço da alimentação de energia**, com instalação de baterias de maior autonomia, geradores fixos e planos de abastecimento prioritário de combustível;
- **Integração de redundâncias via rádio (FH)** e comunicações por satélite (VSAT), particularmente em zonas com acessos críticos;
- **Melhoria dos sistemas de monitorização**, com recurso a OTDR para deteção precoce de falhas e implementação de cadastro digital atualizado da rede.

Estas medidas contribuíram para a criação de uma infraestrutura mais robusta, com maior capacidade de resposta a eventos extremos e menor vulnerabilidade a falhas generalizadas.

### **5.3. Operações de Restauro e Soluções Transitórias**

Face à gravidade dos danos causados pelo temporal de 20 de fevereiro de 2010, foi necessário implementar rapidamente soluções transitórias para restabelecer os serviços de telecomunicações em diversas zonas afetadas da ilha da Madeira [8][32]. O restauro das comunicações foi considerado prioritário, sobretudo nos locais onde estavam instalados

serviços críticos como centros de saúde, forças de segurança, proteção civil e câmaras municipais.

### Soluções de Emergência

Uma das abordagens mais eficazes foi a instalação de armários multisserviço em locais estratégicos. Esta solução, apresentada na Figura 31, permitiu uma rápida reposição de serviços de voz e dados, mitigando os efeitos da destruição parcial ou total das redes de cobre e das infraestruturas de acesso existentes.



*Figura 31 - Armário multisserviços. Fonte [35].*

Cada armário multisserviço incluía:

- **DLU** (Digital Line Unit) para comutação e gestão de chamadas telefónicas;
- **DSLAM** (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) para acesso à Internet por ADSL;
- **Baterias internas**, garantindo autonomia energética temporária;
- **Ligação por fibra ótica**, sempre que possível com percursos redundantes [8].

A integração com a rede ASDH permitiu manter conectividade com centrais principais, assegurando a continuidade dos serviços básicos em áreas críticas [32]. A instalação destes armários envolveu uma forte coordenação técnica e logística, dado o estado degradado das vias e o difícil acesso a algumas localizações.

A instalação destes armários mitigou o impacto da falha da rede de acesso, enquanto prosseguiram as obras de recuperação e reestruturação da rede GPON. Esta solução contribuiu para a rápida reposição de comunicações essenciais, como serviços de emergência e de saúde.

### **Impacto na Rede SIRESP e Comunicação de Emergência**

As redes críticas, como o SIRESP (Sistema Integrado de Redes de Emergência e Segurança de Portugal), também foram fortemente afetadas. Esta infraestrutura dependia, em grande parte, da rede da PT/MEO, o que significava que uma falha na rede principal resultava na falha do SIRESP.

Ambas as redes coabitavam nas mesmas estações PT/MEO/TMN, partilhando recursos essenciais como alimentação elétrica e transmissão de dados. Embora a BTS (Base Transceiver Station) do SIRESP fosse independente (Motorola), a falha dos restantes componentes da infraestrutura resultava na indisponibilidade do serviço.

### **Aprendizagens Operacionais**

As aprendizagens operacionais apresentadas nesta secção resultam da análise qualitativa do caso de estudo em apreço e da experiência profissional do autor no contexto da gestão e operação de redes de telecomunicações. O cenário vivido em 2010 reforçou a necessidade de:

- Planeamento de soluções modulares de emergência;
- Topologias flexíveis e rapidamente implementáveis;
- Redundância energética e de transmissão;
- Integração de mecanismos de resposta rápida em planos de contingência;
- Realização de simulacros de forma a testar as alterações implementadas.

As operações realizadas durante esta fase de resposta permitiram estabilizar os serviços essenciais numa janela temporal crítica e forneceram dados valiosos para o redesenho posterior da rede de telecomunicações da Madeira.

## 5.4. Reforço da Infraestrutura e Planeamento Pós-Crise

As estratégias de reforço da rede descritas nesta secção encontram-se alinhadas com princípios de resiliência e redundância amplamente referidos em normas e boas práticas internacionais, nomeadamente no que respeita à diversificação de percursos, à eliminação de pontos únicos de falha e à capacidade de recuperação perante eventos disruptivos, conforme preconizado em normas e referenciais internacionais de continuidade e resiliência de redes de telecomunicações [19][21][22].

Após a estabilização dos serviços essenciais durante a fase crítica de resposta ao temporal de 20 de fevereiro de 2010, foi desencadeado um processo estruturado de revisão e reforço da infraestrutura de telecomunicações na Madeira. Este processo teve como objetivo mitigar as fragilidades evidenciadas pela catástrofe e preparar a rede para futuras situações de risco, através da implementação de soluções de redundância e resiliência em várias camadas da arquitetura.

### Estratégias de Reforço Implementadas

As medidas adotadas incidiram em múltiplas vertentes da infraestrutura, destacando-se:

- **Construção de novas rotas de fibra ótica**, com trajetos fisicamente distintos, reduzindo pontos únicos de falha e assegurando a continuidade dos serviços mesmo em caso de rutura de um dos percursos;
- **Criação de um Anel DWDM ao redor da ilha**, com múltiplos nós óticos e integração com os principais pontos da rede. Esta estrutura permitiu garantir a continuidade do tráfego entre DSLAMs, OLTs e centrais, mesmo em cenários de falha parcial;
- **Reforço da rede SDH**, com revisão completa dos caminhos dos circuitos e validação da redundância física das ligações, através da segregação de percursos e da análise topológica da infraestrutura existente;

- **Segregação de serviços críticos**, como comunicações hospitalares, forças de segurança e proteção civil, assegurando que os mesmos tivessem acesso a rotas redundantes, com diversidade física e energética;
- **Instalação de soluções VSAT**, como recurso de última linha em situações de isolamento, aplicadas a câmaras municipais, esquadras, corporações de bombeiros e centros de saúde [1][29];
- **Reforço dos sistemas de gestão e monitorização remota**, com a introdução de tecnologias OTDR e NMS avançadas, permitindo deteção precoce de falhas, gestão preventiva e resposta proativa em caso de degradação de qualidade [18][28].

### **Planeamento e Integração com Infraestruturas Locais**

O reforço da infraestrutura foi planeado em articulação com entidades regionais e locais, nomeadamente no alinhamento com o plano de expansão da rede rodoviária expresso. Esta integração permitiu a instalação de cabos de fibra ótica em condutas mais seguras e protegidas, minimizando a exposição a deslizamentos e eventos climáticos extremos.

A modernização da rede também foi projetada para acompanhar a evolução tecnológica futura, nomeadamente a transição para GPON, o crescimento das redes móveis e o aumento da procura por serviços de elevada largura de banda.

Esta integração infraestrutural revelou-se estratégica para garantir maior segurança física à rede, aproveitando obras de construção civil em curso e otimizando recursos técnicos e financeiros.

### **Resultados Obtidos**

A análise qualitativa das medidas implementadas, no contexto do caso de estudo analisado, permite identificar um conjunto de resultados operacionais relevantes, observados ao nível da robustez e da capacidade de resposta da infraestrutura de telecomunicações. Em particular, destacam-se:

- Redução da vulnerabilidade da infraestrutura face a falhas físicas e ambientais, decorrente da eliminação de pontos únicos de falha e da diversificação de percursos;

- Aumento da disponibilidade de serviços críticos em cenários de emergência, suportado por arquiteturas redundantes e mecanismos de proteção;
- Melhoria da capacidade de deteção e recuperação de falhas, refletida numa resposta operacional mais célere a incidentes;
- Criação de uma base estrutural favorável à evolução tecnológica da rede regional, permitindo a integração progressiva de novas soluções.

## **Conclusão do Capítulo 5**

O temporal de 20 de fevereiro de 2010 constituiu um ponto de viragem na história das telecomunicações da Madeira.

A destruição das infraestruturas revelou de forma inequívoca as limitações da rede pré-existente e a ausência de mecanismos de redundância adequados.

A resposta ao desastre, marcada por improvisação técnica, colaboração interinstitucional e inovação, culminou num processo de reconstrução orientado para o reforço da resiliência e da fiabilidade da rede.

A partir deste evento, a rede regional evoluiu de uma estrutura vulnerável e centralizada para uma infraestrutura moderna, descentralizada e redundante, alinhada com os padrões internacionais de engenharia de redes.

Nos capítulos seguintes, serão analisados o planeamento detalhado e a implementação técnica das soluções de redundância, bem como os resultados obtidos após a modernização.

## 6. Planeamento e Implementação de Redundância em Redes de Telecomunicações

A criação de mecanismos eficazes de redundância e resiliência é essencial para garantir a continuidade dos serviços de telecomunicações, sobretudo em contextos insulares sujeitos a riscos ambientais significativos, como a Região Autónoma da Madeira.

Após o temporal de 20 de fevereiro de 2010, tornou-se evidente a necessidade de reavaliar a arquitetura existente, identificar vulnerabilidades estruturais e implementar soluções robustas baseadas em princípios de engenharia consagrados [35][12].

Este capítulo descreve o processo de planeamento e implementação das medidas de redundância aplicadas na rede regional, destacando o contributo técnico das tecnologias utilizadas e o impacto observado após a reconstrução da infraestrutura.

Apesar da inexistência de dados quantitativos consolidados — resultante da natureza interna e confidencial de parte dos relatórios técnicos da operadora — a análise baseia-se em evidências qualitativas, documentação técnica e testemunhos recolhidos junto de equipas operacionais, permitindo identificar as principais melhorias estruturais e funcionais alcançadas.

### 6.1. Princípios e Medidas de Reconstrução da Rede

Na sequência do evento de 20 de fevereiro de 2010, a reconstrução da rede de telecomunicações na Madeira foi orientada por um conjunto de princípios técnicos e estratégicos destinados a reforçar a resiliência, a redundância e a capacidade de resposta da infraestrutura. Neste contexto, foram implementadas diversas medidas estruturais, que se sintetizam de seguida.

- Substituição da rede de cobre por fibra ótica, eliminando as limitações de largura de banda e de fiabilidade das tecnologias HDSL, SHDSL e ADSL [12][13];
- Expansão da rede DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) [16], criando um anel ótico de *backbone* regional com redundância geográfica e diversidade tecnológica [31][8];

- Crescimento da rede ASDH (Access Synchronous Digital Hierarchy) [15], viabilizado pela nova infraestrutura de fibra, permitindo ligações síncronas e de elevada disponibilidade para clientes empresariais e estações rádio-base;
- Introdução da tecnologia GPON (Gigabit Passive Optical Network) [36], assegurando ligação direta em fibra ótica até ao cliente (FTTH), o que aumentou exponencialmente a capacidade e a qualidade do serviço;
- Implementação de redundância energética, através da instalação de UPS, geradores e sistemas de alimentação autónomos, assegurando continuidade operacional durante falhas elétricas;
- Modernização dos sistemas de monitorização e gestão, com adoção de plataformas NMS (Network Management System) e tecnologia OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) [17][37], permitindo deteção e localização imediata de falhas;
- Integração das novas infraestruturas com a rede rodoviária regional, aproveitando condutas subterrâneas e novas vias para garantir maior proteção física dos cabos e acessibilidade técnica para manutenção.

## 6.2. Comparação: Rede Antes e Depois do Temporal de 2010

A tabela 3 sintetiza a evolução estrutural e tecnológica da rede de telecomunicações da Madeira antes e após o temporal de 2010, evidenciando as transformações mais significativas em termos de infraestrutura, tecnologia e resiliência.

Elemento / Tecnologia	Situação Antes de 2010	Situação Após Reforço Pós-Temporal
Tecnologia de acesso	HDSL, SHDSL, ADSL (rede de cobre predominante)	Fibra ótica (FTTH/GPON em expansão)
Rede de <i>backbone</i>	SDH com percursos únicos, sem redundância automática	SDH/DWDM em anel, com redundância física e lógica - APS / MSP
Rede de acesso SDH (ASDH)	Implementação residual (alguns nós EMILO)	Expansão generalizada, com anéis redundantes e integração empresarial
DWDM	Implementação incipiente, cobertura limitada	Anel DWDM completo interligando toda a ilha
Redundância física	Muito reduzida, percursos únicos e sem diversidade	Diversidade geográfica e física garantida
Energia	Dependência exclusiva da rede elétrica pública	UPS, geradores e autonomia reforçada

Monitorização e gestão	Cadastro incompleto, ausência de OTDR	Gestão centralizada via NMS e deteção automática de falhas (OTDR)
Capacidade de acesso	Limitada a Mbps sobre cobre	Largura de banda em Gbps sobre fibra ótica

*Tabela 3 - Evolução das Infraestruturas de Telecomunicações da Madeira Antes e Após o Temporal de 2010*

Esta comparação evidencia uma mudança de paradigma: de uma rede reativa e limitada, para uma infraestrutura mais robusta e resiliente, com maior capacidade de resposta a falhas.

### **Em resumo**

A análise desenvolvida permitiu caracterizar o estado técnico da rede de telecomunicações da Madeira antes do temporal de 2010 e compreender o impacto estrutural que o evento teve na sua transformação.

Antes do temporal, a rede apresentava baixa redundância, forte dependência de cobre e vulnerabilidade física acentuada.

Após o evento, emergiu uma infraestrutura moderna, baseada em fibra ótica, com suporte DWDM e mecanismos de resiliência integrados, representando uma evolução tecnológica e estratégica significativa.

O caso da Madeira demonstra, assim, como uma crise pode ser convertida numa oportunidade de modernização, conduzindo à criação de uma rede regional com níveis de desempenho, disponibilidade e redundância compatíveis com as melhores práticas internacionais.

Nos capítulos seguintes, serão detalhadas as tecnologias de rede envolvidas (SDH, DWDM, ASDH e fibra ótica) e o modo como estas foram aplicadas na reconstrução e modernização das telecomunicações da região.

## 6.3. Estratégia de Planeamento da Redundância na Madeira

Dando seguimento à análise do reforço infraestrutural apresentada no capítulo anterior, esta secção detalha a estratégia de planeamento adotada especificamente para a criação de redundância técnica na rede.

O temporal de 20 de fevereiro de 2010 evidenciou vulnerabilidades significativas na infraestrutura de telecomunicações da Madeira. Muitas ligações críticas foram interrompidas devido à falta de caminhos redundantes, comprometendo serviços essenciais como emergências, comunicações governamentais e redes empresariais.

Esta secção apresenta as estratégias de planeamento adotadas para aumentar a robustez da rede de telecomunicações da Madeira, assegurando continuidade operacional mesmo em situações de catástrofe.

### Identificação de Pontos Críticos

Após o temporal, realizou-se uma análise exaustiva para identificar os principais pontos de falha na infraestrutura da PT/MEO [8]. Os critérios utilizados para esta avaliação incluíram:

- **Infraestruturas de telecomunicações afetadas:** Estações-base e centrais críticas sem redundância;
- **Áreas com falhas severas:** Regiões que sofreram ruturas de fibra ótica e conseqüente isolamento funcional;
- **Dependência de infraestruturas de terceiros:** Necessidade de autonomia da rede da PT/MEO em relação a outras entidades.

A análise permitiu estabelecer um conjunto de prioridades para mitigação de falhas futuras.

### Principais Estratégias Adotadas

Com base nos pontos críticos identificados, foram delineadas as seguintes estratégias de reforço da infraestrutura:

- **Criação de caminhos alternativos de fibra ótica** – Implementação de novos percursos redundantes, conforme ilustrado na Figura 32, garantindo que qualquer falha crítica pudesse ser contornada por um trajeto secundário [8][31];



Figura 32 - Exemplo de caminhos redundantes (FO) no Funchal. Fonte [37].

- **Expansão da rede DWDM** – Adoção de novos nós óticos, conforme ilustrado na Figura 33, para aumentar a capacidade e resiliência da infraestrutura de transporte;

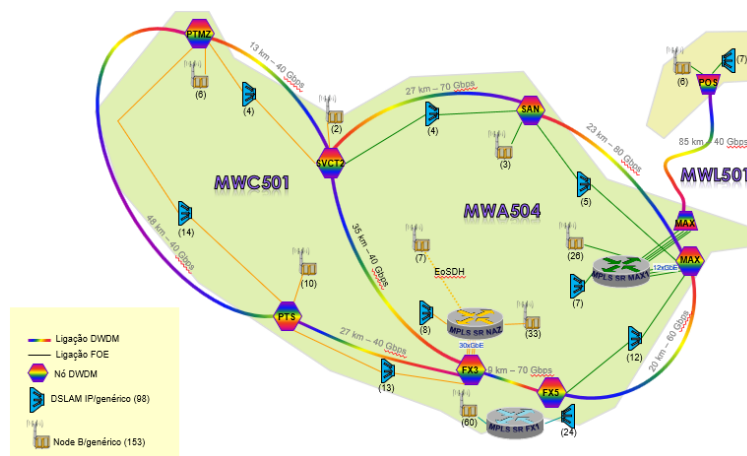


Figura 33 - Securização de serviços com DWDM. Fonte [8].

- **Criação do Anel Ótico da Madeira** – Desenvolvimento de um anel de fibras óticas ao redor da ilha da Madeira, ilustrado na Figura 34, utilizando cabo em conduta (mais seguro) na rede rodoviária expresso. Esta abordagem permitiu estabelecer uma ligação redundante em anel ao longo da ilha, sendo gradualmente ampliada em alinhamento com o plano de expansão rodoviário do Governo Regional;



Figura 34 - Ampliação do anel ótico da Madeira. Fonte [8].

- **Securização da Rede SDH** – Realização de uma análise exaustiva de todos os troços da rede SDH, garantindo percursos **fisicamente distintos** entre todos os nós e equipamentos. Foi conduzido um estudo detalhado sobre os caminhos dos circuitos, assegurando que a redundância da SDH não utilizasse o mesmo percurso, reduzindo o risco de falhas simultâneas;
- **Segregação de serviços críticos** – Implementação de ligações redundantes (diversidade espacial) para serviços essenciais, como hospitais e forças de segurança;
- **Instalação de soluções VSAT** – Instalação de telefones por satélite nas Câmaras municipais, esquadras de polícia, bombeiros, proteção civil e serviços de saúde. A Figura 35 ilustra os locais de instalação destes equipamentos;



Figura 35 - Soluções VSAT instaladas. Fonte [8].



críticos e das estratégias delineadas, foram implementadas medidas concretas que aumentaram significativamente a resiliência da rede.

Este capítulo detalha as principais soluções técnicas implementadas, os desafios enfrentados durante a sua execução e os impactos dessas melhorias na rede de telecomunicações da região. Esta abordagem é consistente com estudos de resiliência em infraestruturas críticas, onde a avaliação qualitativa é frequentemente utilizada quando dados operacionais detalhados não são publicamente acessíveis [20][22].

### **Execução das Medidas de Redundância**

A implementação das soluções de redundância seguiu um plano estruturado, dividido nas seguintes ações principais:

- **Construção de Novos Percursos de Fibra Ótica** – Foram instalados novos troços de fibra ótica para criar redundância nas ligações críticas. Este trabalho incluiu a instalação de cabos subterrâneos em condutas protegidas e a utilização de percursos alternativos para minimizar o risco de falhas simultâneas [31];
- **Expansão da Rede DWDM** – A ampliação da rede de multiplexagem densa por divisão de comprimento de onda (**DWDM**) permitiu aumentar a capacidade de transmissão e garantir que o tráfego pudesse ser desviado automaticamente em caso de falha num das ligações principais [8];
- **Implementação do Anel Ótico da Madeira** – A construção de um anel ótico ao redor da ilha foi uma das soluções mais estratégicas, garantindo que as ligações de telecomunicações tivessem sempre um caminho alternativo em caso de rutura. Este anel foi sendo progressivamente expandido conforme a rede rodoviária expresso ia sendo desenvolvida;
- **Reconfiguração da Rede SDH** – Foi realizada uma revisão detalhada das ligações SDH e ASDH existentes para assegurar que a redundância dos circuitos não utilizasse percursos comuns, garantindo assim que as falhas afetassem o menor número possível de serviços [32];
- **Implementação de Sistemas de Monitorização Proativa** – Foram introduzidos novos sistemas de gestão e monitorização de rede (**NMS - Network Management**

Systems) que permitiram uma deteção precoce de falhas e a rápida ativação de mecanismos de recuperação automática;

### **Desafios na Implementação**

Embora vários dos constrangimentos associados à implementação das medidas de redundância tenham sido referidos ao longo dos capítulos anteriores, importa nesta secção sintetizar os principais desafios transversais identificados durante o processo de planeamento, execução e operação das soluções adotadas, numa perspetiva integrada.

- **Condicionantes geográficas** – A orografia acidentada da Madeira dificultou a instalação de novos percursos de fibra, exigindo soluções criativas para garantir a proteção e acessibilidade da infraestrutura;
- **Coordenação com entidades externas** – A expansão da rede DWDM e do anel ótico exigiu colaboração com diversas entidades, incluindo o Governo Regional, autarquias e fornecedores de infraestrutura;
- **Manutenção da continuidade dos serviços** – Durante a implementação das melhorias, o planeamento da implementação procurou assegurar que as alterações não comprometessem os serviços em produção, exigindo uma transição cuidadosamente planeada e executada;
- **Investimento e alocação de recursos** – A implementação das soluções exigiu um investimento significativo, requerendo a definição de prioridades de intervenção com base na criticidade da infraestrutura com base no impacto e criticidade das infraestruturas envolvidas.

### **Resultados e Impacto das Melhorias**

A execução destas soluções resultou num aumento significativo da resiliência da rede de telecomunicações na Madeira, trazendo benefícios tangíveis como:

- **Redução do tempo médio de reparação (MTTR) em falhas críticas** – A introdução de percursos redundantes e da rede DWDM permitiu a recuperação automática do serviço em caso de falha de uma ligação principal;

- **Melhoria da disponibilidade dos serviços de telecomunicações** – O reforço das infraestruturas reduziu drasticamente as interrupções de serviço, garantindo maior estabilidade mesmo em condições adversas;
- **Maior segurança das infraestruturas de telecomunicações** – A implementação de condutas subterrâneas e a segregação de circuitos reduziram a vulnerabilidade da rede a eventos naturais extremos;
- **Melhoria da capacidade de resposta a emergências** – A modernização dos sistemas de monitorização permitiu uma deteção e resposta mais rápidas a falhas, reduzindo o impacto para utilizadores finais e serviços críticos;

## Conclusão

A implementação das soluções de redundância foi um passo essencial para fortalecer a infraestrutura de telecomunicações da Madeira. Este trabalho permitiu dotar a rede regional de um novo nível de robustez, fiabilidade e capacidade de resposta a incidentes críticos e garantir a continuidade dos serviços essenciais mesmo em cenários de crise. No próximo capítulo, será feita uma análise dos resultados obtidos e das lições aprendidas com a implementação destas soluções.

## 6.5. Impacto e Resultados Obtidos

A inexistência de dados quantitativos consolidados impede uma avaliação estatística rigorosa das melhorias obtidas. Contudo, a informação qualitativa recolhida junto de técnicos e relatórios operacionais indica uma evolução substancial na fiabilidade e disponibilidade da rede, nomeadamente:

- maior rapidez na deteção e resolução de falhas;
- aumento da cobertura de fibra ótica e da diversidade de percursos;
- melhor redundância energética em centrais e estações;
- e maior estabilidade na prestação de serviços essenciais (saúde, segurança e administração pública).

Estas evidências apontam para um aumento significativo da resiliência e da continuidade operacional da rede, confirmando a eficácia das medidas implementadas após 2010.

### **Melhoria da Resiliência da Rede**

A criação de percursos redundantes e a expansão das infraestruturas de fibra ótica contribuíram diretamente para a melhoria da resiliência da rede de telecomunicações na Madeira [1][28]. Os principais efeitos dessa evolução incluem:

- Redução de falhas de conectividade – A implementação do anel ótico permitiu uma melhor distribuição do tráfego, evitando interrupções totais mesmo em caso de falhas de infraestrutura;
- Menor dependência de infraestruturas críticas individuais – Com a diversificação de percursos e a segregação de serviços essenciais, a rede passou a estar menos vulnerável a incidentes localizados;
- Aumento da disponibilidade dos serviços – Antes da implementação das soluções de redundância, falhas em percursos únicos resultavam em interrupções prolongadas. Com as novas infraestruturas, o tráfego pôde ser automaticamente redirecionado.

### **Redução do Tempo Médio de Reparação (MTTR)**

O tempo médio necessário para restaurar serviços críticos foi significativamente reduzido graças à implementação das novas medidas [18][37]:

- Melhor tempo de resposta às falhas – A introdução de monitorização ativa através de sistemas NMS e OTDR permitiu a identificação precoce de falhas e a rápida atuação das equipas técnicas;
- Processos de recuperação mais eficientes – A implementação da redundância SDH e DWDM possibilitou a ativação automática de percursos alternativos, reduzindo o impacto de ruturas físicas na infraestrutura;
- Intervenções mais ágeis e coordenadas – O fortalecimento do cadastro da rede permitiu que as equipas localizassem e reparassem falhas de forma mais rápida e eficiente.

## **Impacto na Segurança e Qualidade dos Serviços**

Com a nova infraestrutura de redundância, observou-se uma melhoria substancial na estabilidade e segurança da infraestrutura de telecomunicações regional, beneficiando diretamente serviços críticos e operacionais:

- Maior segurança para redes de emergência – As infraestruturas suportadas pelo SIRESP e redes hospitalares passaram a contar com percursos redundantes, reduzindo o risco de falhas em momentos críticos;
- Menos impacto de desastres naturais – Com a migração de percursos críticos para cabos subterrâneos protegidos, a vulnerabilidade da rede a intempéries e deslizamentos de terra foi reduzida;
- Melhoria da qualidade do serviço ao cliente final – O aumento da estabilidade da rede traduziu-se numa redução de queixas e falhas percebidas pelos utilizadores, refletindo-se em métricas positivas de satisfação.

## **6.6. Lições Aprendidas e Recomendações Futuras**

O processo de planeamento e implementação das soluções de redundância na Madeira proporcionou um conjunto de lições técnicas e operacionais relevantes;

- Diversificação de percursos é essencial – todos os circuitos críticos devem utilizar trajetos fisicamente distintos para evitar falhas simultâneas;
- Monitorização proativa é determinante – a integração de OTDR e NMS permitiu reduzir drasticamente o tempo de resposta a incidentes;
- Coordenação interinstitucional – o sucesso do projeto dependeu da colaboração entre operadora, autoridades regionais e entidades de proteção civil;
- Integração com planeamento urbano – a expansão da fibra em paralelo com obras rodoviárias reduziu custos e aumentou a proteção física da infraestrutura;

- Importância da documentação e cadastro atualizado – a precisão dos registos técnicos foi decisiva para o planeamento de redundâncias e manutenção preventiva.

Estas lições reforçam a importância de abordagens estruturadas de engenharia de rede, com base em normas internacionais e planeamento contínuo de fiabilidade.

## **Conclusão do Capítulo 6**

A reconstrução da rede de telecomunicações da Madeira após o temporal de 2010 constitui um exemplo paradigmático de engenharia de resiliência aplicada. O planeamento rigoroso, a execução faseada e a integração de tecnologias avançadas permitiram criar uma infraestrutura regional com elevados padrões de disponibilidade e tolerância a falhas.

Embora a ausência de métricas quantitativas impeça uma avaliação numérica exata do impacto das medidas implementadas, a evidência técnica e documental disponível confirma uma melhoria significativa na robustez, disponibilidade e fiabilidade da rede regional. A rede madeirense apresenta hoje uma configuração moderna e resiliente, alinhada com as melhores práticas internacionais em telecomunicações, constituindo um modelo de referência para regiões insulares e de risco geográfico elevado.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões gerais e recomendações futuras, com enfoque na sustentabilidade tecnológica e na evolução para redes inteligentes baseadas em SDN, NFV e IA/ML.

## 7. Conclusões

O presente capítulo sintetiza os principais resultados da dissertação, evidenciando as conclusões alcançadas, as lições extraídas do processo de reconstrução da rede de telecomunicações da Madeira e as recomendações para a sua evolução futura.

### 7.1. Síntese do Trabalho

Esta dissertação analisou o impacto do temporal de 20 de fevereiro de 2010 na rede de telecomunicações da Região Autónoma da Madeira e as subsequentes estratégias de reconstrução e modernização.

Foram abordadas as principais dimensões técnicas e estratégicas associadas à resiliência e à redundância em redes de telecomunicações, com destaque para:

- Enquadramento histórico e tecnológico do setor das telecomunicações em Portugal;
- Caracterização da infraestrutura madeirense antes de 2010, marcada por forte dependência de cobre e ausência de redundância física e energética;
- Análise das tecnologias nucleares — SDH, DWDM, fibra ótica e ASDH — e o seu papel na criação de arquiteturas resilientes;
- Revisão do estado da arte, incluindo normas, modelos de proteção e tecnologias emergentes como SDN, NFV e IA/ML;
- Descrição detalhada do processo de planeamento e implementação de soluções de redundância após o evento de 2010, evidenciando a evolução para uma rede moderna e escalável.

O trabalho demonstrou que o reforço da resiliência não depende apenas da tecnologia, mas também de uma abordagem integrada de planeamento, monitorização e coordenação interinstitucional, fundamentais em contextos de elevado risco geográfico.

## 7.2. Lições Aprendidas

A análise realizada permitiu identificar um conjunto de lições relevantes que podem servir de referência para a gestão e evolução de infraestruturas de telecomunicações em regiões insulares:

1. Diversificação de percursos é essencial – As redes devem evitar trajetos únicos, garantindo diversidade física e lógica entre pontos críticos, para minimizar o impacto de falhas simultâneas;
2. Monitorização contínua é determinante – A utilização de sistemas NMS e OTDR permite detetar e resolver falhas de forma proativa, reduzindo o tempo de indisponibilidade;
3. Documentação técnica rigorosa é indispensável – O cadastro atualizado das infraestruturas constitui uma ferramenta estratégica para planeamento, manutenção e resposta a incidentes;
4. Integração com o planeamento urbano – O aproveitamento de condutas e obras públicas, como vias rodoviárias e galerias técnicas, contribui para a proteção física e eficiência financeira das redes;
5. Coordenação entre entidades públicas e privadas – A reconstrução bem-sucedida da rede madeirense resultou de uma estreita cooperação entre operadores, governo regional e autoridades de proteção civil [38];
6. Aprendizagem institucional – A experiência do temporal de 2010 reforçou a importância de preservar o conhecimento técnico e operacional, garantindo a transmissão das boas práticas a equipas futuras.

Estas lições confirmam que a resiliência de uma rede depende tanto da sua engenharia técnica como da governança e planeamento colaborativo entre os diferentes intervenientes.

### 7.3. Recomendações para o Futuro

Apesar da evolução significativa registada desde 2010, a contínua transformação tecnológica e o aumento da dependência digital exigem novas abordagens à gestão de infraestruturas críticas.

Com base na análise efetuada, recomendam-se as seguintes orientações estratégicas para o futuro da rede de telecomunicações da Madeira:

- Consolidação da cobertura em fibra ótica, garantindo diversidade geográfica e proteção física reforçada;
- Expansão da rede DWDM e SDH com capacidade de reencaminhamento automático em todas as ligações críticas;
- Transição gradual para arquiteturas IP/MPLS, promovendo interoperabilidade e escalabilidade de serviços;
- Adoção de soluções de gestão inteligentes, baseadas em SDN (Software Defined Networking) e NFV (Network Function Virtualization), permitindo orquestração dinâmica e recuperação automática de falhas;
- Integração de modelos de Inteligência Artificial e Machine Learning (IA/ML) nos sistemas de supervisão, para deteção preditiva de anomalias e otimização em tempo real;
- Testes regulares de resiliência e simulações de contingência, assegurando a prontidão operacional das equipas técnicas;
- Planeamento sustentável da infraestrutura, com foco na eficiência energética, durabilidade dos materiais e adaptação às alterações climáticas.

A adoção destas medidas permitirá consolidar uma rede de telecomunicações inteligente, autónoma e autoadaptável, capaz de responder a falhas, catástrofes ou picos de tráfego com mínima intervenção humana.

## **Conclusão Final**

A reconstrução da rede de telecomunicações da Madeira após o temporal de 2010 constitui um exemplo notável de engenharia aplicada à resiliência.

O processo combinou rigor técnico, planeamento estratégico e visão de longo prazo, transformando uma crise num ponto de viragem tecnológica.

A análise desenvolvida nesta dissertação demonstra que a resiliência das infraestruturas de telecomunicações depende tanto da robustez física como da inteligência operacional, sendo essencial garantir que os investimentos futuros continuem a integrar ambas as dimensões.

A Madeira dispõe hoje de uma rede sólida, moderna e preparada para a próxima geração de serviços digitais — um exemplo de como a engenharia e o planeamento podem transformar a adversidade em progresso tecnológico.

## 8. Referências

- [1] Instituto Superior Técnico, “A avaliação do risco de aluviões na ilha da Madeira,” Lisboa, Portugal, 2018. [Online]. Available: <https://poseur.portugal2020.pt/media/4020/estudo-de-risco-de-aluvi%C3%B5es-da-madeira.pdf> Accessed: 23/02/2025.
- [2] ANACOM, “O Sector das Comunicações 2024” Lisboa, Portugal, 2024. [Online]. Available: [https://anacom.pt/streaming/SectorCom2024.pdf?contentId=1809702&field=ATTACHED\\_FILE](https://anacom.pt/streaming/SectorCom2024.pdf?contentId=1809702&field=ATTACHED_FILE) Accessed: 12/01/2025.
- [3] ANACOM, “Indicadores de Banda Larga – 2023,” Lisboa, Portugal, 2024. [Online]. Available: <https://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=1785981>. Accessed: 12/11/2025.
- [4] R. C. Madureira, A. M. de O. Duarte e R. M. da Fonseca, “133 anos de História das Comunicações em Portugal,” Revista do DETUA, jan. 2011. [Online]. Available: [https://servicouniversal.files.wordpress.com/2013/04/deti\\_6jan11\\_artigohistoria\\_comunicacoes\\_port\\_rma.pdf](https://servicouniversal.files.wordpress.com/2013/04/deti_6jan11_artigohistoria_comunicacoes_port_rma.pdf) Accessed: 12/01/2025.
- [5] ANACOM, “Cabos Submarinos – Pilares do Ecossistema Digital” ANACOM, 2024. [Online]. Available: [https://www.anacom.pt/streaming/Geopolitica\\_dosCabos\\_Submarinos\\_ANACOM\\_21Nov24.pdf?contentId=1798854&field=ATTACHED\\_FILE](https://www.anacom.pt/streaming/Geopolitica_dosCabos_Submarinos_ANACOM_21Nov24.pdf?contentId=1798854&field=ATTACHED_FILE) Accessed: 12/01/2025.
- [6] ITU-T, “Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)”, Recommendation G.803, Geneva, 2000. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.803> Accessed: 19/01/2025.
- [7] IEEE, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks – Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing, IEEE Std 802.1Qci-2017, and Frame Replication and Elimination for Reliability, IEEE Std 802.1CB-2017,” IEEE Standards Association, 2017. [Online].

Available: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_1Qci-2017.html](https://standards.ieee.org/standard/802_1Qci-2017.html) Accessed: 21/06/2025.

[8] PT/MEO, “Infraestrutura de Telecomunicações na Madeira - Análise Pós-Temporal 2010,” Relatório interno, 2011.

[9] Open Networking Foundation, “Software-Defined Networking: The New Norm for Networks,” ONF White Paper, 2012. [Online].

Available: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2011/09/wp-sdn-newnorm.pdf>  
Accessed: 21/06/2025.

[10] ETSI, “Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework,” ETSI GS NFV 002 V1.2.1, 2014. [Online].

Available:

[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV/001\\_099/002/01.02.01\\_60/gs\\_NFV002v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/002/01.02.01_60/gs_NFV002v010201p.pdf) Accessed: 21/06/2025.

[11] S. Jain, A. Kumar, S. Mandal, J. Ong, L. Poutievski, A. Singh et al., “B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN,” in Proc. ACM SIGCOMM, Hong Kong, China, Aug. 2013, pp. 3–14. [Online].

Available: <https://research.google/pubs/b4-experience-with-a-globally-deployed-software-defined-wan/> Accessed: 21/06/2025.

[12] ITU-T, “High-bit-rate digital subscriber line (HDSL) transceivers,” Recommendation G.991.1, Geneva, 2001. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.991.1>  
Accessed: 01/02/2025.

[13] ITU-T, “Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers,” Recommendation G.991.2, Geneva, 2001. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.991.2> Accessed: 01/02/2025.

[14] ITU-T, “Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH),” Recommendation G.707, Geneva, 2007. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.707> Accessed: 01/02/2025.

- [15] PT Inovação, “Manual Técnico dos Sistemas AGORA-NG e EMILO,” Aveiro, Portugal, 2010. Documento interno.
- [16] ITU-T, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” Recommendation G.694.1, Geneva, 2012. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1> Accessed: 01/02/2025.
- [17] Corning, “Fiber Optic System Testing Tutorial,” Applications Engineering Note, 2020. [Online]. Available: <https://www.corning.com/catalog/coc/documents/application-engineering-notes/AEN135.pdf> Accessed: 09/02/2025.
- [18] Cisco Systems, “Redundant Network Design – White Paper,” Cisco, 2020. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Campus/campover.html> Accessed: 19/01/2025.
- [19] ITU-T, “Security Architecture for Systems Providing End-to-End Communications,” Recommendation X.805, Geneva, 2003. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-X.805> Accessed: 21/06/2025.
- [20] National Institute of Standards and Technology, “Contingency Planning Guide for Federal Information Systems,” NIST SP 800-34 Rev.1, 2010. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-34/rev-1/final> Accessed: 21/06/2025.
- [21] ISO/IEC, “Information technology – Security techniques – Guidelines for ICT readiness for business continuity,” ISO/IEC 27031:2011, Geneva, Switzerland, 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/44374.html>. Accessed: 21/03/2025.
- [22] ISO, “Security and resilience – Business continuity management systems – Requirements,” ISO 22301:2019, Geneva, Switzerland, 2019. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/75106.html>. Accessed: 21/03/2025.

[23] ETSI, “Network Functions Virtualisation (NFV); Resiliency Requirements,” ETSI GS NFV-REL 001 V1.1.1, 2015. [Online].

Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV-REL/001\\_099/001/01.01.01\\_60/gs\\_NFV-REL001v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-REL/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV-REL001v010101p.pdf) Accessed: 21/06/2025.

[24] Uptime Institute, “Tier Classification System,” [Online].

Available: <https://uptimeinstitute.com/tier-certification> Accessed: 21/06/2025.

[25] NTT Communications, “CSR Report 2013 – Drawing on the Lessons Learned from the Great East Japan Earthquake,” Tokyo, 2013. [Online].

Available: [https://www.ntt.com/content/dam/nttcom/hq/en/about-us/csr/report/pdf\\_download/pdf/NTTCom\\_csr2013\\_web.pdf](https://www.ntt.com/content/dam/nttcom/hq/en/about-us/csr/report/pdf_download/pdf/NTTCom_csr2013_web.pdf) Accessed: 21/06/2025.

[26] AT&T, “Network Disaster Recovery Program Overview,” AT&T Corporate Communications, 2020. [Online].

Available: [https://about.att.com/pages/disaster\\_recovery](https://about.att.com/pages/disaster_recovery) Accessed: 21/06/2025.

[27] BT Wholesale, “Ethernet Resilience and Diversity – Technical Brochure,” BT Group, UK, 2024. [Online].

Available: <https://www.btwholesale.com/assets/documents/products-and-services/data/wholesale-ethernet/sales-and-marketing/ethernet-resilience-and-diversity-brochure.pdf> Accessed: 21/06/2025.

[28] Teleco, “Multiplexagem digital – SDH/PDH,” Tutorial, 2023. [Online].

Available: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtdm/pagina\\_3.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtdm/pagina_3.asp) Accessed: 01/03/2025.

[29] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, “Multiprotocol Label Switching Architecture,” RFC 3031, IETF, Jan. 2001. [Online].

Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3031> Accessed: 01/03/2025.

[30] PT/MEO, “Operações de Rede na Madeira 2013,” Relatório interno, Lisboa, Portugal, 2013

- [31] PT/MEO, “Infraestrutura DWDM na Madeira,” Relatório interno, 2011.
- [32] PT/MEO, “Equipamentos de transmissão ASDH na Madeira,” Relatório interno, 2009.
- [33] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), “Boletim Climatológico Mensal – Fevereiro 2010,” Lisboa, Portugal, 2010. [Online]. Available: [https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20100308/YfXNEqcTaQqHeaWHZhhY/cli\\_20100201\\_20100228\\_pcl\\_mm\\_md\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20100308/YfXNEqcTaQqHeaWHZhhY/cli_20100201_20100228_pcl_mm_md_pt.pdf). Accessed: 15/03/2025.
- [34] Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, “Memórias e Riscos da Região Autónoma da Madeira,” eBook, Coimbra, Portugal, 2018. [Online]. Available: [https://www.riscos.pt/wp-content/uploads/2018/SEC/9/Ebook\\_SEC\\_MRR.pdf](https://www.riscos.pt/wp-content/uploads/2018/SEC/9/Ebook_SEC_MRR.pdf). Accessed: 21/03/2025.
- [35] PT/MEO, “Rede de Transmissão na Madeira – Relatório Técnico,” Lisboa, Portugal, 2013.
- [36] ITU-T, “Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics,” Recommendation G.984.1, Geneva, 2008. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1> Accessed: 01/02/2025.
- [37] PT/MEO, “Plano de Redundância da Rede de Telecomunicações da Madeira – Relatório Interno,” Lisboa, Portugal, 2011.
- [38] Governo Regional da Madeira - Autoridade Regional de Proteção Civil (ARPC), “Plano Regional de Emergência de Proteção Civil da Região Autónoma da Madeira,” procivmadeira.pt, outubro de 2017. [Online]. Available: [https://www.procivmadeira.pt/images/planeamento-de-emergencia/PREPCRAM\\_VAprovada\\_2022\\_Publico.pdf](https://www.procivmadeira.pt/images/planeamento-de-emergencia/PREPCRAM_VAprovada_2022_Publico.pdf) Accessed: 12/01/2025.