

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Manuel Tavares Vieira Cabral

O modo de transferência assíncrono - ATM

Abril de 2008

O Modo de Transferência Assíncrono ATM

O Modo de Transferência Assíncrono - ATM é um conceito definido pelo ITU-T¹ (ITU-T, *International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector*) referido como a tecnologia capaz de dotar a Rede Digital com Integração de Serviços de Banda Larga (RDIS-BL) com os requisitos necessários ao transporte integrado de todo o tipo de serviços. Através do uso do ATM, serviços como a voz, vídeo e dados podem ser transmitidos, multiplexados e comutados, juntamente, num único formato universal. A rede resultante é por isso mais simples, fácil de gerir e de administrar e usa os seus recursos de uma forma eficiente.

As primeiras recomendações sobre ATM foram publicadas em 1993 pelo ITU-T, ATM Forum e ANSI (ANSI, *American National Standards Institute*). Estas, para além de referirem os aspectos gerais do ATM, definem as características funcionais da rede ATM, o modelo de referência de protocolos, as características funcionais das diferentes camadas, as especificações da interface utilizador-rede e princípios de operação e manutenção.

Segue-se uma apresentação das principais características do ATM de acordo com o ITU-T e com o ATM Forum.

Comutação Rápida de Pacotes - ATM

Comutação Rápida de Pacotes² é um conceito que cobre diversas alternativas, todas elas com uma característica básica comum - comutação de pacotes com reduzidas funções de rede. Foram usados diferentes nomes nas diversas soluções alternativas propostas por várias organizações. Os nomes mais vulgares são: ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) que é a designação oficialmente usada pelo ITU-T, ATD (ATD, *Asynchronous Time Division*) o nome originalmente usado pelo CNET (CNET, *Centre National d'Etudes des Telecommunications*) e mais tarde adoptado na Europa [Cou83], e, finalmente, FPS (FPS, *Fast Packet Switching*), a técnica mais aprofundada nos Estados Unidos [Tur83].

¹ ITU-T antigo CCITT - Comité Consultative International de Téléphone et Télégraphe.

² Comutação Rápida de Pacotes – (em inglês – *Fast Packet Switching*) – Técnica adoptada pelo ITU-T como suporte da RDIS de Banda Larga e posteriormente designada por Modo de Transferência Assíncrono – ATM.

O nome FPS era já aplicado anteriormente aos sistemas a operarem a taxas maiores que os sistemas de comutação de pacotes tradicionais, graças às suas reduzidas funcionalidades. Quer na sigla ATD, quer na ATM, a palavra *Asynchronous* tem sido usada pois esta técnica além de permitir uma operação assíncrona entre o relógio de emissão e o relógio de recepção, não impõe uma relação temporal pré-definida entre os tempos de transmissão de unidades consecutivas (pacotes, tramas, células, etc.). A diferença entre os dois relógios pode ser facilmente resolvida através da inserção / remoção de pacotes vazios na trama de informação, isto é, pacotes que não contêm informação útil.

Todas estas alternativas têm uma característica comum que garante o seu sucesso, ou seja, a possibilidade de transportar qualquer serviço independentemente das suas características, tais como débito, requisitos de qualidade ou a natureza *bursty*. Esta última vantagem foi uma das motivações mais fortes para o ITU-T adoptar o ATM como o modo de transferência para a RDIS de Banda Larga.

Uma rede baseada num modo de transferência independente do serviço não terá as desvantagens dos outros modos de transferência descritos anteriormente: dependência do serviço, incapacidade de adaptação a novos serviços, ineficiência no uso dos recursos disponíveis, fraca adaptação a fontes do tipo *bursty*, etc. Deste modo, podem enumerar-se as principais vantagens do ATM:

- **Flexibilidade e capacidade de evolução:**

Os avanços no estado da arte dos algoritmos de codificação e da tecnologia VLSI tendem a reduzir os requisitos de largura de banda dos serviços existentes. Novos serviços poderão surgir com características ainda desconhecidas. Todas estas transformações poderão vir a ser suportadas com sucesso, sem nenhuma alteração e sem perda de eficiência na rede ATM. Os sistemas ATM (transmissão, comutação e multiplexagem) não necessitam de ser modificados.

- **Uso eficiente dos recursos:**

Todos os recursos disponíveis na rede podem ser usados por todos os serviços, o que possibilita uma óptima distribuição estatística de recursos. Não existe especialização de recursos na rede ATM, o que significa que qualquer recurso disponível pode ser usado por qualquer serviço.

- **Rede Universal de serviços:**

Uma vez que só uma rede necessita de ser projectada, controlada, implementada e mantida, os custos globais do sistema deverão ser reduzidos devido a economias de escala. Estas

vantagens beneficiarão todos os membros envolvidos no mundo das telecomunicações: clientes, operadores e fabricantes.

Princípios básicos do ATM

À semelhança do modelo OSI da ISO, o modelo de referência de protocolos (PRM, *Protocol Reference Model*) descrito na Rec. I.321 do ITU-T [ITU91b], satisfaz os princípios da modularidade e independência da tecnologia, definindo os serviços e os protocolos por camadas e as respectivas primitivas de serviço. O modelo de referência de protocolos da RDIS-BL está esquematizado na Figura 1:

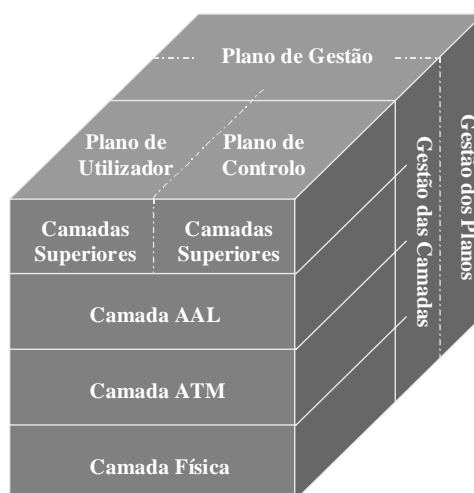


Figura 1: Modelo de Referência de Protocolos.

Tal como no PRM da RDIS, existem três planos: o plano de utilizador, onde é efectuado o transporte da informação a ele associado, o plano de controlo, que lida principalmente com informação de sinalização, e o plano de gestão, usado para fazer a coordenação entre os planos e executar funções operacionais.

De acordo com o ITU-T, as camadas podem ser divididas tal como se apresenta na Tabela 1. As funções das camadas superiores do PRM são dependentes dos serviços e a camada de adaptação AAL (AAL, *ATM Adaptation Layer*) executa funções dependentes dos serviços suportados pelas camadas superiores.

Tabela 1: Funções e subcamadas do PRM.

Camadas Superiores		
Convergência	CS	AAL
Segmentação e Reunião	SAR	
Controlo Global de Fluxo Geração e Extracção do Cabeçalho da Célula Comutação Multiplexagem e Desmultiplexagem de Células		ATM
Desacoplamento do débito de célula Verificação / Criação da sequência do HEC do Cabeçalho Delineação de Células Adaptação para a transmissão de tramas Inserção e extracção de células em tramas	TC	PL
Extracção do Relógio de bit	PM	
Meio Físico		

A camada ATM é independente dos serviços e da camada Física associada ao meio de transmissão.

Na camada AAL, as funções dependentes dos serviços constituem a subcamada de convergência (CS, *Convergence Sublayer*) e as funções de adaptação à camada ATM formam a subcamada de Segmentação e Reunião (SAR, *Segmentation and Reassembly Sublayer*).

Na camada Física PL (PL, *Physical Layer*), as funções dependentes do meio físico constituem a subcamada de Meio Físico (PM, *Physical Medium*) e as funções de adaptação à camada ATM formam a subcamada de Convergência para a Transmissão (TC, *Transmission Convergence*).

Categorias de Serviços, ATCs e Classes de Serviço

Os procedimentos de estabelecimento de uma ligação e a implementação de mecanismos de controlo de tráfego requerem uma grande flexibilidade na camada de gestão da rede [Lue98]. Para lidar com a diversidade de parâmetros de tráfego e de desempenho, o ITU-T Study Group 13 definiu dois conceitos distintos:

- ATC (ATC, *ATM Transfer Capability*) [ITU97a],
- Classes de Serviço [ITU96f].

Uma ATC descreve os parâmetros da camada ATM a serem especificados e os procedimentos aplicáveis. As Classes de Serviço especificam quais os aspectos funcionais relacionados com a adaptação dos serviços à rede (e.g. fragmentação, adaptação de relógios, multiplexagem).

Para se cumprir um determinado contrato de tráfego, o utilizador selecciona uma dada ATC e os valores dos parâmetros relevantes (o descritor de tráfego de fonte e tolerâncias associadas) e selecciona uma Classe de Serviço. Com a especificação do contrato de tráfego, a rede e o utilizador sabem o que esperar. A rede garante as características da ligação, enquanto que a fonte terá de operar de acordo com as condições do contrato de tráfego estabelecido.

Uma ATC descreve as características gerais de uma ligação. Por exemplo, se a capacidade de transmissão está permanentemente disponível e que acções devem ser tomadas no caso de a taxa de envio de células ser excedida pela fonte. O ITU-T SG 13 especifica sete ATCs cujas características principais são descritas a seguir:

- **DBR (DBR, *Deterministic Bit Rate*)**

Caracteriza-se por garantir um valor de pico (PCR, *Peak Cell Rate*) disponível continuamente, transferido com uma QoS especificada. As aplicações que geram tráfego de débito constante devem optar por este tipo de ATC. As aplicações que geram tráfego de débito variável poderão também optar igualmente por esta ATC.

- **SBR (SBR, *Statistical Bit Rate*)**

SBR1, SBR2 e SBR3 formam uma família de ATCs similares. Todas elas garantem uma taxa de células “sustentada” (SCR, *Sustainable Cell Rate*), uma espécie de taxa média de longo prazo. Adicionalmente, permitem a ocorrência de *bursts* (de tamanho negociável) a uma taxa mais elevada com limite máximo imposto pelo PCR, respeitando o SCR. As aplicações que geram tráfego de débito variável e que produzem *bursts* limitados encontram nesta ATC um mecanismo de transferência de informação adequado.

O SBR1 verifica se os parâmetros estão de acordo com os valores pré-estabelecidos.

O SBR2 e SBR3 baseiam-se na indicação dada pelo CLP em cada célula. O SCR é verificado apenas em células com CLP = 0 (células com menor prioridade em serem descartadas). O PCR é verificado em todas as células. A distinção entre o SBR2 e o SBR3 é feita no modo como tratam as células com o CLP = 0 que excedem o valor do SCR. O SBR2 considera tais células excedentes ao contrato (e poderá descartá-las). O SBR3 altera o valor do CLP das células excedentárias para CLP = 1, mantendo-as na rede, se cumprirem o limite imposto pelo PCR.

- **ABR (ABR, Available Bit Rate)**

Esta ATC garante uma taxa mínima de transferência de células (MCR, *Minimum Cell Rate*). O valor do MCR, seleccionado pelo utilizador, pode virtualmente ser zero. Dependendo do instante, a rede pode disponibilizar mais capacidade de transmissão de uma forma dinâmica. Através de células de gestão de recursos (*resource management cells*), os utilizadores “interrogam” regularmente a rede acerca da capacidade disponível e são informados no sentido de baixar ou subir o débito de transmissão. Esta ATC é adequada para o suporte de aplicações que têm a propriedade de adaptar o débito de informação (acima do MCR) à capacidade oferecida pela rede.

- **ABT (ABT, ATM Block Transfer)**

As duas variantes desta ATC, ABT-DT (*Delayed Transfer*), e ABT-IT (*Immediate Transfer*), permitem também a alteração das taxas de transmissão em função da flutuação da capacidade oferecida pela rede. No caso do ABT, a taxa permitida pela rede é acordada inicialmente e garantida durante a transferência do bloco de células. O tamanho do bloco de células é um dos parâmetros especificado no início da transferência. No caso da variante ABT-DT a fonte aguarda confirmação da rede antes de transmitir o bloco de células, enquanto que na variante ABT-IT a fonte transmite o bloco de células imediatamente, o que pode provocar atrasos ou perdas se o pedido não for garantido. Esta última é adequada para fontes que adaptem o seu ritmo de transmissão em instantes determinados pela fonte e não pela rede.

O ITU-T SG 13 elaborou estas ATCs nas recomendações [ITU96e] [ITU97a]. Os requisitos de novas aplicações e as novas formas de utilização da rede poderão vir a necessitar da definição de novas ATCs, tais como CT (CT, *Controlled Transfer*) ou UBR (UBR, *Unspecified Bit Rate*). Embora este aumento de ATCs introduza a desvantagem da selecção ser feita através da escolha entre um maior número de ATCs, é desejável pois poderá permitir o suporte de novos serviços, ou o suporte de um serviço de uma forma mais eficiente, quer para a rede quer para a aplicação. O objectivo será definir ATCs em número suficiente de forma a poder suportar todas as necessidades de transporte actuais e futuras.

Na Tabela 2 está especificada a classificação das diferentes Classes de Serviços. Os parâmetros através dos quais é feito o agrupamento são:

- **Relação temporal entre fonte e destino:**

Vários serviços requerem que seja preservada a relação temporal entre a fonte e o destino. Por exemplo, nos canais B da RDIS a 64kbit/s, existe uma relação temporal bem definida entre fonte e destino. A transferência de pacotes de dados não requer esta relação.

- **Débito:**

Serviços tais como o transporte de canais telefónicos geram informação a um débito fixo, enquanto que certos tipo de codificadores geram informação a um débito variável, em função das propriedades do sinal (e.g. codificação de vídeo de débito variável).

- **Modo de Operação:**

Um serviço pode ser responsável por estabelecer e remover uma ligação com o destino, enquanto que outros podem operar num modo sem ligação.

Tabela 2: Classificação das diferentes Classes de Serviço.

	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Relação Temporal entre Fonte e Destino	Existente		Não existente	
Débito	Constante	Variável		
Modo de Operação	Com Ligação			Sem Ligação

O ATM Forum define Categorias de Serviços em vez de ATCs ou Classes de Serviço. Enquanto que as Categorias de Serviços estão associadas à camada ATM, as Classes de Serviço estão relacionadas com a escolha do tipo de protocolo AAL. No entanto, existe correspondência entre as características de tráfego de Categorias de Serviço e ATCs. A Tabela 3 mostra a relação existente entre estas duas abordagens.

Tabela 3: Categorias de Serviço e ATCs.

ATM Forum	ITU-T SG 13
CBR	DBR
nrt-VBR	SBR
rt-VBR	SBR
UBR	Não especificado
Sem equivalência	ABT
ABR	ABR

As Categorias de Serviço do ATM Forum [ATM99b] especificam características de tráfego e requisitos de QoS relacionados com o comportamento da rede, da mesma forma que as ATCs e Classes de Serviço do ITU-T SG13. No entanto, as Categorias de Serviço são caracterizadas em tráfego de tempo-real (CBR e rt-VBR) e sem tempo-real (nrt-VBR, UBR e ABR). No ITU-T a

característica de tempo-real está incluída na Classe de Serviço e não na especificação da ATC.

As Categorias de Serviço do ATM Forum permitem o uso das Classes de Serviço do ITU-T [ITU96f], embora favoreçam a negociação de vários parâmetros chave de QoS tais como o valor pico-a-pico do CDV (CDV, *Cell Delay Variation*), o valor máximo do CTD (CTD, *Cell Transfer Delay*), o CLR (CLR, *Cell Loss Ratio*) entre outros, definidos durante o estabelecimento de chamada.

Embora a negociação de parâmetros de QoS permita uma maior flexibilidade ao utilizador e à rede, provoca um aumento substancial na complexidade dos procedimentos de estabelecimento de chamada.

A Camada ATM

Em ATM a estrutura básica das redes temporais síncronas é mantida, sendo transportado um bloco de informação de dimensão fixa em cada intervalo de tempo - *slot*. A este bloco de informação chama-se célula. As células são transportadas na rede com base numa etiqueta (*label multiplexing*) não ocupando por isso uma posição fixa no tempo como acontece no modo de comutação de circuitos.

A dimensão de cada célula é de 53 octetos e, como mostra Figura 2, decompõe-se em dois campos: cabeçalho e informação. O cabeçalho, com 5 octetos, contém, entre outros parâmetros, os que permitem fazer o encaminhamento da célula através da rede. O outro campo é destinado a transportar a informação do utilizador (*payload*).

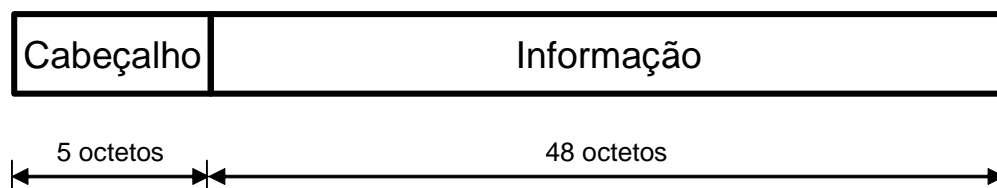


Figura 2: Formato de uma célula ATM.

As características da camada ATM são independentes do sistema de transmissão e do meio de transmissão utilizados. A adaptação da camada ATM ao sistema de transmissão é feita ao nível da camada Física. Esta separação, entre a camada ATM e a transmissão, permite que comutadores e multiplexers ATM, possam ser introduzidos na rede e evoluir independentemente dos aspectos de transmissão da rede.

Ao nível da camada ATM só o cabeçalho é processado, uma vez que o campo de informação só é processado nos extremos de uma ligação. Os 5 octetos do cabeçalho são repartidos por diversos campos, conforme mostra a Figura 3:

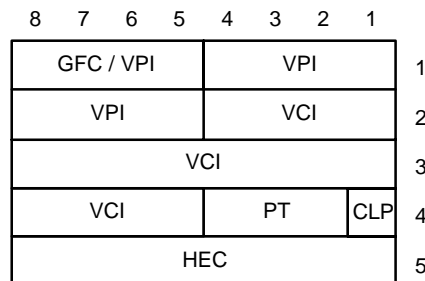


Figura 3: Estrutura do cabeçalho da célula ATM nas interfaces de utilizador (UNI) e de rede (NNI).

A estrutura do cabeçalho é diferente na interface utilizador-rede (UNI, *User Network Interface*) e nas interfaces internas da rede, designadas interfaces entre nós da rede (NNI, *Network Node Interface*).

A diferença consiste somente na existência do campo para controlo de fluxo (GFC, *Generic Flow Control*), que é utilizado na interface UNI, no caso de existirem configurações com múltiplos utilizadores, para controlar o acesso destes à rede. Como o campo GFC é desnecessário nas interfaces internas da rede, é aproveitado nas interfaces entre os nós para aumentar o comprimento do campo VPI.

A identificação de um canal lógico ATM está dividida em duas entidades hierárquicas: caminho virtual (VP, *Virtual Path*) e canal virtual (VC, *Virtual Channel*). Estas entidades são identificadas no cabeçalho da célula pelo identificador de caminho virtual (VPI, *Virtual Path Identifier*) e pelo identificador de canal virtual (VCI, *Virtual Channel Identifier*). Assim, num dado Caminho Virtual será possível transportar 65 536 (2^{16}) Canais Virtuais. Numa dada interface, um canal de comunicação é identificado pelo campo (VPI+VCI) completo. A relação hierárquica entre caminhos e canais virtuais está ilustrada na Figura 4.



Figura 4: Relação entre Canais Virtuais e Caminhos Virtuais.

A existência de caminhos virtuais permite que a rede suporte ligações semi-permanentes entre utilizadores, comutando caminhos virtuais, tratando de um modo global todos os canais virtuais pertencentes a um caminho virtual. Por outro lado, as ligações na rede são estabelecidas através de comutadores ATM, que comutarão caminhos e canais virtuais individualmente. A Figura 5 ilustra o mecanismo de comutação de canais e caminhos virtuais.

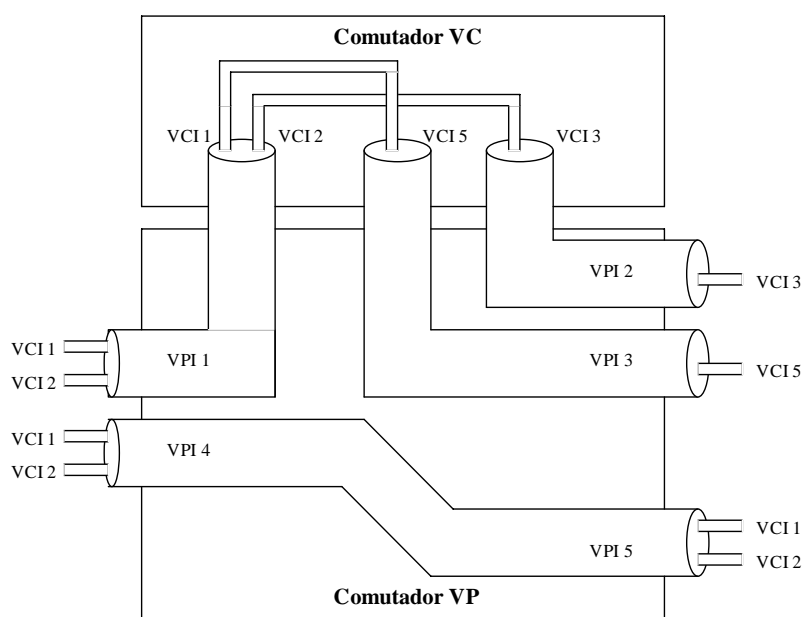


Figura 5: Comutação de Caminhos Virtuais (VP) e Canais Virtuais (VC).

O bit CLP (CLP, *Cell Loss Priority*) indica a prioridade de perda de célula e é manipulado quer pelo nó de origem da célula, quer por um nó intermédio de comutação. Permite atribuir dois níveis de QoS associados à célula - normal (CLP=0) e baixa prioridade (CLP=1). No caso de congestionamento da rede nos nós de comutação, as células de prioridade mais baixa serão as primeiras a ser eliminadas. Este mecanismo foi inicialmente proposto como solução parcial para efectuar o controlo de fluxo – numa dada ligação as células que violassem uma dada função de policiamento, teriam o bit CLP=1, tornando-as descartáveis se num dos nós de comutação seguintes existisse congestionamento provocado pelo restante tráfego.

Os três bits PT (PT, *Payload Type*) veiculam informação entre entidades existentes ao nível da camada ATM e indicam o tipo de informação contida na célula. A célula pode conter informação do utilizador, informação para gestão e manutenção da rede, ou pode veicular informação acerca do congestionamento da rede observado pela célula. Outra função importante implementada por este campo é o AAU (AAU, *ATM User to User Indication*) usada pela camada AAL-5 para indicar a última célula de um pacote da camada de utilizador.

O campo HEC (HEC, *Header Error Control*) é um campo para controlo de erros no cabeçalho. Devido ao mecanismo de controlo de erros ser também usado para determinar a delimitação de células, remete-se a sua descrição para a secção intitulada “A camada Física”.

A Camada de Adaptação

A camada ATM fornece um serviço que é independente da estrutura da unidade de informação e do débito dos serviços suportados. É na camada AAL que as características particulares de cada serviço são adaptadas no sentido de satisfazer a QoS requerida.

Embora as funções que a camada AAL efectua estão dependentes do serviço específico a transportar, podemos destacar as seguintes:

- mapeamento dos formatos de informação da camada acima da AAL nos campos de informação das células ATM,
- recuperação da frequência do relógio e compensação da variação do atraso das células correspondente ao serviço suportado, quando requerido pelas características do serviço,
- detecção da ocorrência de células perdidas e o desencadear das medidas necessárias para diminuir o impacto desta situação na QoS,
- detecção da ocorrência de células mal inseridas e sua correspondente eliminação.

Para cada tipo de AAL as funções básicas são efectuadas numa subcamada de AAL, chamada de subcamada de Segmentação e Reunião (SAR, *Segmenting And Reassembly sublayer*). A subcamada acima desta na AAL é chamada subcamada de Convergência (CS, *Convergence Sublayer*) e implementa funções requeridas para um serviço específico dessa classe [ITU93c]. Actualmente os serviços podem recorrer a quatro especificações tipo, da camada AAL:

- AAL-1: Suporta serviços CBR, sendo as principais aplicações a emulação de circuitos e o transporte de aplicações de áudio e vídeo de alta qualidade [ITU96b],
- AAL-2: Suporta tráfego VBR (VBR, *Variable Bit Rate*), permitindo reduzir o atraso no preenchimento das células assim como otimizar a eficiência na utilização da largura de banda [ITU97b],
- AAL-3/4: Suporta serviços de dados orientados à ligação e sem ligação, em 2 modos de transferência de informação: o modo mensagem e o modo fluxo [ITU96c].
- AAL-5: Fornece funções semelhantes ao AAL-3/4 mas com uma eficiência superior, satisfazendo os requisitos de eficiência e simplicidade na transferência de informação de

dados e sinalização, devido a ter menos campos de controlo no cabeçalho das células [ITU96d].

Os parágrafos seguintes descrevem, com algum detalhe, os vários tipos de AALs já normalizados.

AAL - Tipo 1

Sendo a futura RDIS de Banda Larga uma rede capaz de suportar qualquer tipo de serviço, assim como interligar as redes existentes e futuras, e constituindo a “espinha dorsal” da infra-estrutura de telecomunicações, será também capaz de suportar o transporte do tráfego de débito binário constante - CBR (CBR, *Constant Bit Rate*), característico das redes de comutação de circuitos.

Tal como a rede de comutação de circuitos é mais vocacionada para o transporte de sinais de débito binário constante, a rede ATM (por utilizar uma tecnologia de comutação de pacotes) é mais adequada ao transporte de sinais do tipo *burst*, tais como dados.

O transporte de sinais CBR, numa rede ATM, é vulgarmente referido como Emulação de Circuitos [Cab95]. O desempenho de um Serviço de Emulação de Circuitos (CES, *Circuit Emulation Service*) em redes ATM deve ser comparável ao verificado com recurso a técnicas TDM (TDM, *Time Division Multiplexing*).

A Figura 6 representa o formato da unidade de dados do protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) para a subcamada de segmentação e reunião (SAR-PDU) na camada de adaptação do tipo 1 correspondente a serviços da Classe A.

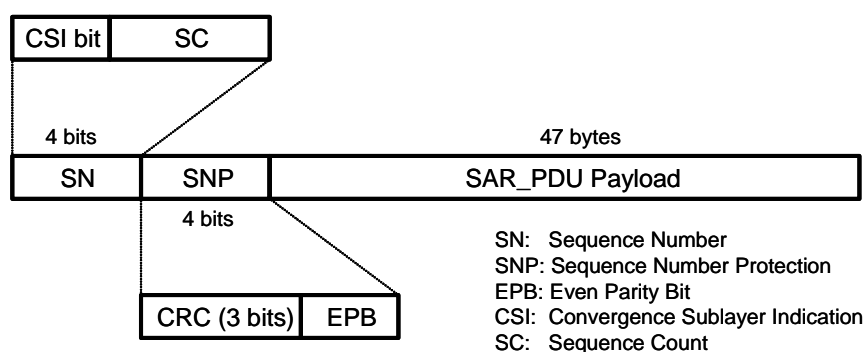


Figura 6: Unidade de dados do protocolo para a subcamada SAR do AAL-1.

O primeiro octeto do campo de informação da célula (SN, *Sequence Number*) é composto por um campo utilizado para a inserção de um número de sequência SC (SC, *Sequence Count*) e de um bit CSI (CSI, *Convergence Sublayer Indication*) utilizado para veicular informação da subcamada CS. O campo SN é protegido pelo campo SNP (SNP, *Sequence Number Protection*), baseado no polinómio gerador $G(x) = x^3 + x + 1$ com um bit extra de paridade (EPB). A existência do campo SC permite detectar, na recepção, se houve células perdidas ou mal inseridas durante a transmissão. Os restantes 47 octetos transportam a informação da subcamada superior CS. É ao nível da subcamada CS que os diversos serviços da Classe A são adaptados. Para alguns serviços específicos a subcamada CS suporta algumas funções especiais tais como:

- correcção de erros ao nível do campo de informação. Este processo pode ser combinado com um método em que os bits são entrelaçados antes de serem colocados nas células,
- recuperação de relógio na recepção baseada na sequência de chegada de células. Esta técnica pode ser efectuada através do seguimento do nível de enchimento do *buffer* de recepção.

AAL - Tipo 2

As redes celulares transmitem a informação de voz comprimida em vez de circuitos PCM de 64kbit/s de modo a economizarem largura de banda. Além disso, o débito é também variável, devido à supressão de silêncios, motivados pela economia de potência das baterias dos dispositivos móveis. Nestas circunstâncias, se fosse usado o AAL-1, o atraso no preenchimento de células aumentaria proporcionalmente com a taxa de compressão.

O protocolo AAL-2 foi desenvolvido para suportar tráfego VBR (Classe B) orientado à ligação e com baixo atraso de propagação. As características deste protocolo foram definidas a partir das necessidades da área da telefonia celular onde se procurava integrar eficientemente serviços do tipo voz e vídeo, comprimidos em tempo real, sendo especificado nas recomendações I.363.2 [ITU97b] e I.366.1 [ITU98], criadas no final da década de 90.

A estrutura do protocolo AAL-2 pode ser dividida em duas subcamadas: a subcamada inferior que fornece os serviços comuns da camada AAL, designada de CPS (CPS, *Common Part Sublayer*) e a subcamada superior - que fornece os chamados serviços de convergência específicos da aplicação, designada de SPCS (SPCS, *Service Specific Convergence Sublayer*), como pode ser observado no modelo de referência de protocolos da Figura 7.

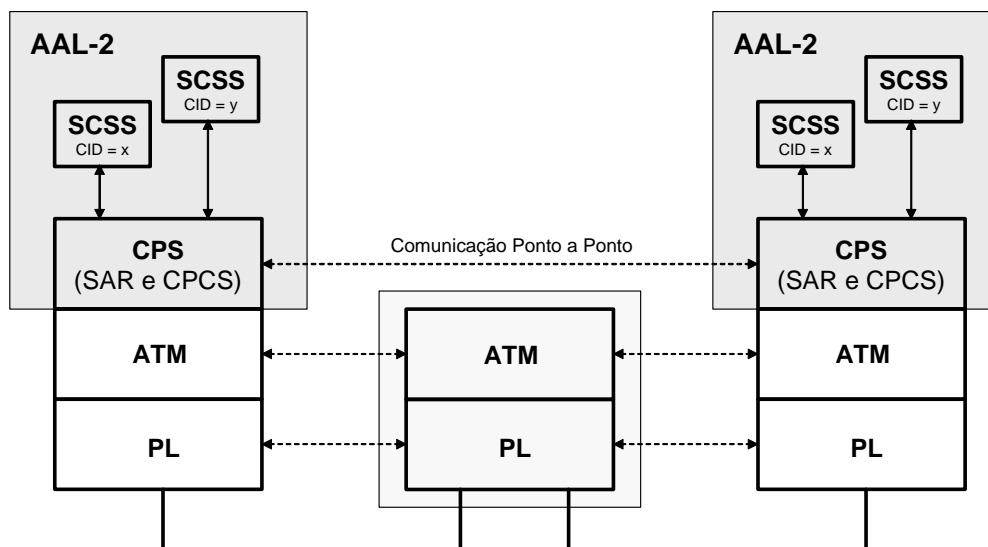


Figura 7: Modelo de Referência de Protocolos para o AAL-2.

A recomendação I.363.2 atribuiu à subcamada CPS, do protocolo AAL-2, os serviços de Segmentação e Reunião de células (SAR) e a parte dos serviços comuns de Convergência (CPCS), permitindo a possibilidade de serem definidos outros serviços de convergência específicos (SSCS), de acordo com as necessidades das aplicações. O protocolo AAL-2 proporciona uma ligação ponto-a-ponto entre dois utilizadores e permite, através de seus pontos de acesso (SAP), a capacidade de seleccionar as QoS desejadas para o transporte das unidades de serviço CPS-SDU pela ligação.

Os utilizadores da subcamada CPS são as entidades SSCS ou a camada de gestão, mas a operação é ponto-a-ponto e, apesar das ligações AAL-2 serem multiplexadas e desmultiplexadas, a integridade da sequência dos CPS-SDUs é mantida para cada canal virtual. As múltiplas ligações AAL podem ser associadas a uma única ligação da camada ATM.

Ao receber a primitiva da camada superior, é criado um pacote CPS com a informação recebida e o identificador da entidade que o enviou. O pacote CPS consiste em três octetos no cabeçalho (CPS-PH) seguido de um campo (CPS-PP). O cabeçalho é dividido nas seguintes partes: um octeto para o campo CID, 6 bits para o campo LI, 5 bits para o campo UUI e 5 bits para o campo HEC. A Figura 8 ilustra a Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPS.

O CID é bidireccional e único para cada ligação individual AAL-2, ou seja, deve ser o mesmo nas duas extremidades. O valor de LI é específico do canal, não necessitando ser comum a todos os canais; cada um pode ter o seu valor fixo, porém, o seu valor máximo por omissão é de 45 octetos (mas pode ser alterado para 64 octetos através de mecanismos de sinalização e gestão). O campo UUI tem duas funções: transportar informação específica, de forma

transparente, através da subcamada CPS e distinguir entre uma entidade SSCS (caso os valores estejam entre 0 e 27) e a camada de gestão.

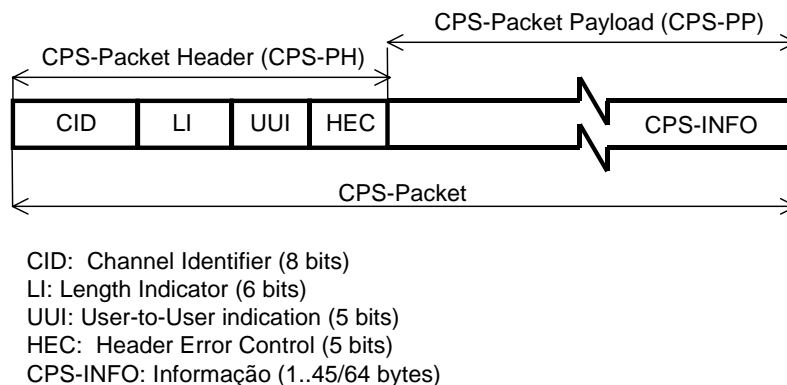


Figura 8: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPS do protocolo AAL-2.

É através do campo CID que é possível multiplexar no máximo 248 entidades SSCS numa única ligação ATM. Este campo identifica os pacotes CPS associados a cada um dos fluxos da camada superior. Estes pacotes são agrupados para formar os 48 octetos da ATM-SDU. Devido ao tamanho variável destes pacotes, é necessário localizar a sua posição dentro do campo de informação da célula, através de um pequeno cabeçalho (STF) que ocupa sempre o primeiro octeto. Este mecanismo é ilustrado na Figura 9.

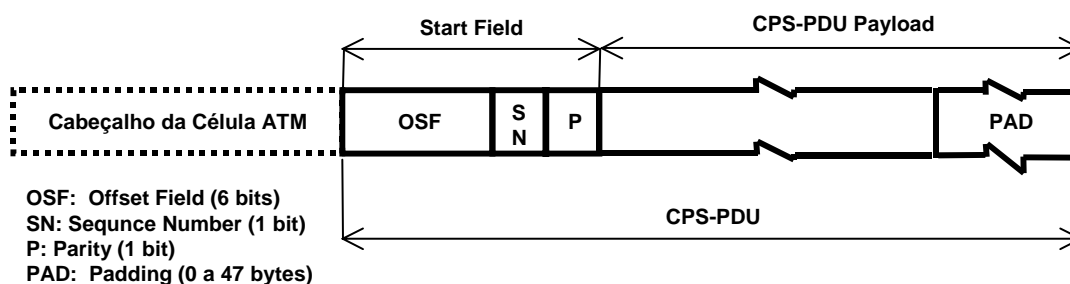


Figura 9: Formato do CPS-PDU do AAL-2.

O STF contém um campo de 6 bits de *offset* (OSF), ou seja, localiza o início do próximo pacote CPS ou, na ausência deste, o início do campo PAD. Além disso, o STF contém um bit de paridade (P) e um número de sequência (SN), que juntos formam um mecanismo básico de controlo para detectar perdas de células. Como se pode observar, cada pacote CPS pode ser suportado por uma ou duas células ATM em que o ponto de partição pode ocorrer em qualquer local do pacote, incluindo o cabeçalho CPS-PH, como se pode observar no exemplo da Figura 10 [Amo01].

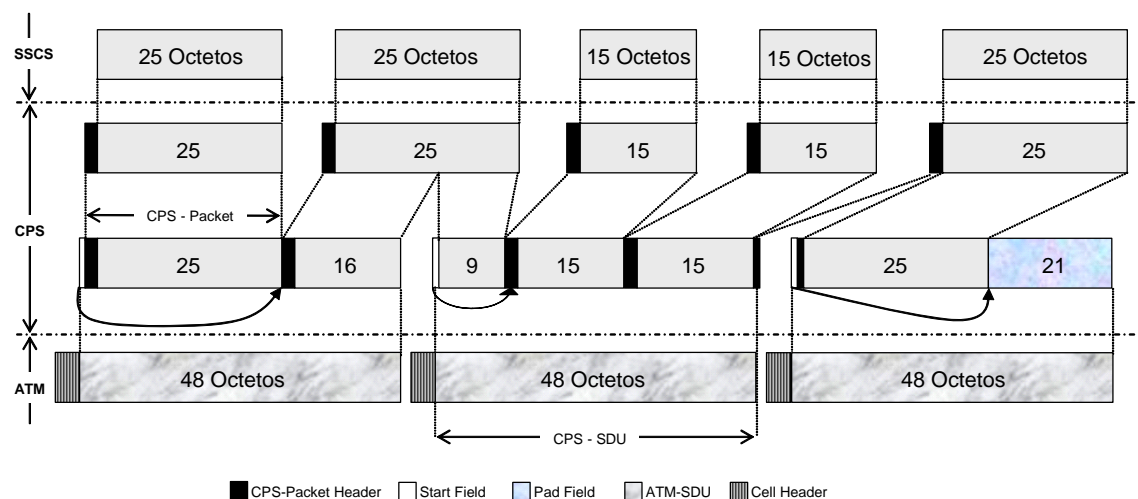


Figura 10: Exemplo da multiplexagem de pacotes de comprimento variável na camada AAL-2.

Na Figura 10 observa-se o uso de pacotes com tamanhos variáveis (25 e 15 octetos) e como uma única célula pode conter mais do que um pacote. Através da figura fica também claro que um pacote da camada superior, ao ser segmentado, pode prolongar-se por três células, no caso de pacotes de 64 octetos.

Em aplicações de tempo-real o controlo do tempo de atraso e sua variação são essenciais. Este controlo é efectuado através da temporização do tempo de empacotamento, garantido por um relógio denominado *Timer_CU* que gera eventos para a máquina de estados da transmissão. Se a célula é totalmente preenchida, então ela é enviada imediatamente (desde que exista autorização da camada de gestão). Se a célula é parcialmente preenchida, ela aguardará a chegada de mais informação até ser totalmente preenchida, ou que o tempo do relógio expire.

A interacção com o plano de gestão ocorre também através de primitivas para a subcamada CPS. Essas primitivas podem efectuar a comunicação de gestão ponto-a-ponto, ou somente indicar erros na máquina de estados de recepção local. Além disso, o AAL-2 está previsto para transmitir unicamente as células se tiver permissão da camada de gestão, o que ocorre quando recebe a primitiva indicando que o ATC da ligação em vigor admite novas ordens para transmitir. Esta função é implementada através de uma variável de estado que passa ao estado "verdadeiro" quando tem permissão, e após a transmissão de uma célula, retorna ao estado "falso", aguardando nova primitiva de permissão.

A função de multiplexagem agrega vários fluxos de tráfego CPS das camadas superiores numa única ligação ATM. Para esta função, não são especificados na Recomendação I.363.2, o método de gestão das filas de espera dos pacotes na entrada, a disciplina de atendimento ou algum esquema de prioridade.

AAL - Tipo 3/4

O nome como é referido este tipo de AAL reflecte o seu estado de desenvolvimento. Assim, no início foram definidos o AAL-3 e AAL-4 para as classes C e D, respectivamente. Posteriormente, estes dois tipos de AAL foram aglutinados num único (AAL-3/4) suportando ambas as classes C e D [Hän94].

Para tal, a subcamada CS é dividida em duas partes (Figura 11):

- CPCS (CPCS, *Common Part Convergence Sublayer*),
- SSCS (SSCS, *Service Specific Convergence Sublayer*).

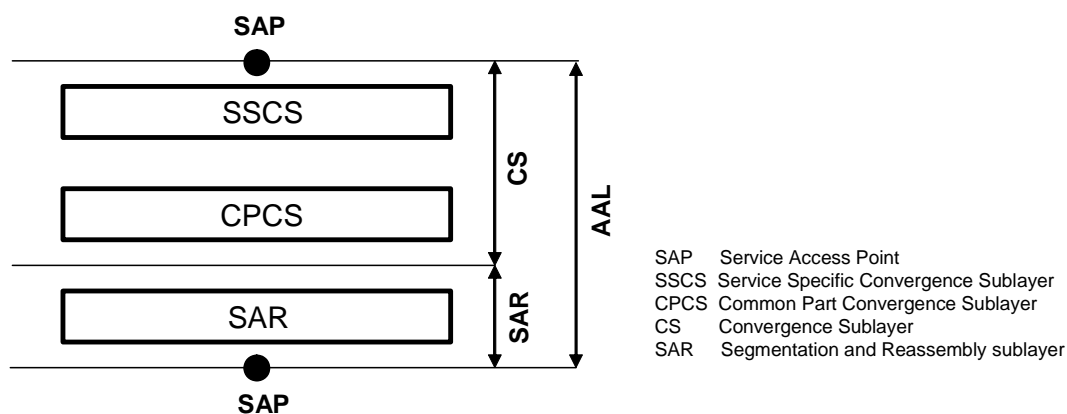


Figura 11: Subcamadas do protocolo AAL-3/4.

A subcamada de convergência é subdividida em CPCS e SSCS. As funções implementadas na subcamada SSCS são dependentes da aplicação e podem nem existir.

Este tipo de AAL suporta dois modos de transferência de informação:

- Modo mensagem,
- Modo fluxo.

No modo mensagem uma única unidade de dados do serviço AAL-SDU (AAL-SDU, *AAL - Service Data Unit*) é segmentada em uma ou mais unidades do protocolo da subcamada de convergência CS-PDU, enquanto que no modo de fluxo uma ou mais unidades de tamanho fixo são transportadas numa única unidade de dados do protocolo CS-PDU. Na Figura 12 está ilustrado o modo de mensagem e na Figura 13 o modo de fluxo.

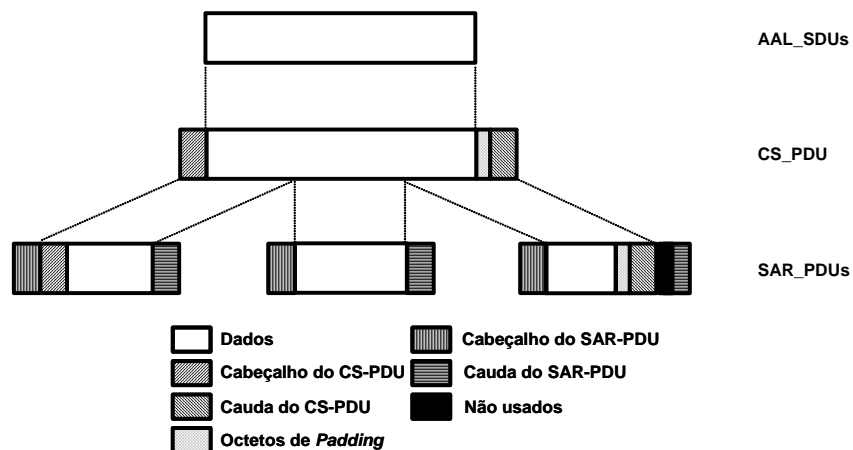


Figura 12: Modo de mensagem.

O modo de mensagem é usado no transporte de grandes estruturas de dados, enquanto que o modo de fluxo é adequado à transferência de dados de baixo débito com requisitos de atraso baixos.

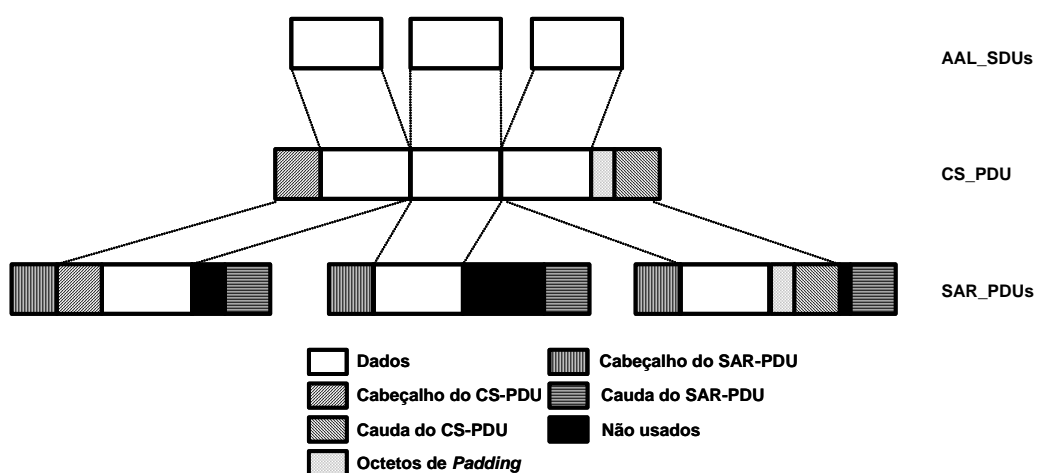


Figura 13: Modo de fluxo.

Para adaptação de serviços das classes C e D é utilizado, ao nível da SAR, a unidade de dados do protocolo indicada na Figura 14. Os dois primeiros octetos (cabeçalho) do campo de informação contêm os campos ST (ST, *Segment Type*), SN (SN, *Segment Number*) e MID (MID, *Message Identifier*).

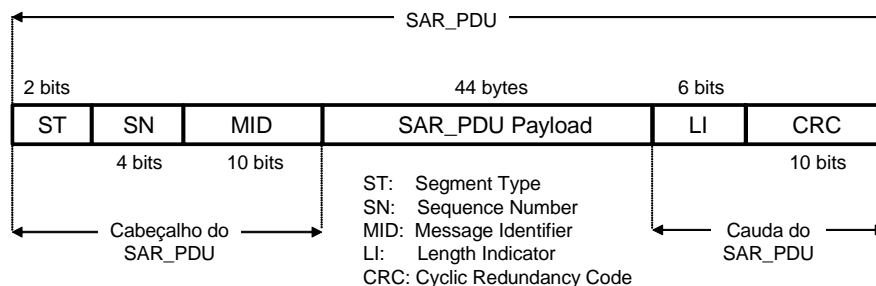


Figura 14: Unidade de dados do protocolo para a subcamada SAR do AAL-3/4.

O campo ST indica se a PDU que resulta da segmentação de uma mensagem da subcamada superior CS é o primeiro segmento, um segmento de continuação, o último segmento ou um segmento único. Este mecanismo é idêntico ao descrito para os serviços do tipo 2. O campo SN tem funcionalidade idêntica à descrita para a PDU da classe A. O campo MID permite multiplexar, ao nível da SAR, PDUs pertencentes a diferentes mensagens da subcamada CS.

Os dois últimos octetos da PDU (cauda) têm os campos LI (LI, *Length Indicator*) e CRC (CRC, *Cyclic Redundancy Code*). O campo LI indica, no caso do último segmento ou segmento único, quantos octetos no campo de informação da subcamada CS correspondem à mensagem que foi segmentada. O campo CRC é baseado num polinómio gerador $G(x) = x^{10} + x^9 + x^5 + x^4 + x + 1$ e protege contra erros todo o campo de informação da célula (SAR-PDU).

O formato do CPCS-PDU é ilustrado na Figura 15. É constituído por um cabeçalho e uma cauda de 4 octetos. O campo CPI é usado para interpretar os restantes campos do cabeçalho e da cauda. Os campos Btag e Etag servem para delimitar a unidade de dados, o campo BASize indica, à entidade semelhante do lado do receptor, os requisitos de memória necessários para receber o CPCS-PDU e o campo PAD garante que o tamanho do *payload* do CPCS-PDU seja múltiplo de 4 octetos e não transporta informação útil. De forma idêntica, o campo AL permite um alinhamento de 32 bits da cauda do CPCS-PDU. Finalmente, o campo Length é usado para definir o comprimento do *payload* do CPCS-PDU e permite ao receptor detectar a perda ou má inserção de dados.

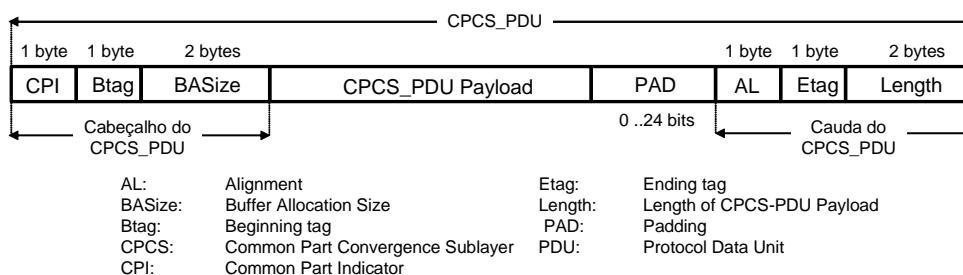


Figura 15: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS do AAL-3/4.

AAL - Tipo 5

Este tipo de AAL suporta serviços de débito variável em que existe uma relação temporal entre fonte e destino (Classe D) e caracteriza-se por suportar, duma forma eficiente, a transferência de grandes blocos de informação através da utilização da totalidade da capacidade da unidade de dados do protocolo (SAR-PDU). A grande diferença entre este e o AAL-3/4 reside na impossibilidade do AAL-5 suportar directamente a função de multiplexagem.

O AAL-5 é subdividido nas subcamadas SAR e CS de forma idêntica ao AAL-3/4 (Figura 11).

A subcamada SAR aceita SDUs de tamanho múltiplo de 48 octetos da subcamada CPCS. Nenhum campo de controlo é adicionado aos SDUs recebidos, ao nível da SAR, sendo apenas efectuadas as funções de segmentação e reunião³. Para detectar o início e o fim de um SAR-PDU recorre-se ao parâmetro AAU. O valor 1 do campo PT (PT, *Payload Type*) do cabeçalho da célula ATM, indica o fim, enquanto que o valor 0 o início ou a continuação de um SAR-PDU. Deste modo, o campo ST (existente no AAL-3/4) não é usado.

Uma vez que o AAL-5 usa informação veiculada no cabeçalho da célula ATM, as operações efectuadas contrariam, em parte, as directivas especificadas no PRM nos aspectos de independência e modularidade das camadas. No entanto, esta técnica foi adoptada devido à sua simplicidade e eficiência.

A subcamada de convergência é subdividida em CPCS e SSCS. As funções implementadas na subcamada SSCS são dependentes da aplicação e podem nem existir. Uma possível aplicação é a multiplexagem de diferentes conexões AAL de forma idêntica à efectuada no AAL-3/4 usando o campo MID.

Na Figura 16 representa-se a última unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS da camada de adaptação do AAL-5. A subcamada CPCS permite a transferência de estruturas de dados de nível superior de tamanho variável entre 1 e 65535 octetos especificado pelo campo *Length*. O campo UU permite a transferência transparente, extremo-a-extremo, de informação entre entidades de nível superior, em cada CPCS-PDU, o campo CPI tem funções idênticas às usadas no AAL-3/4 e o campo CRC é usado para a detecção de erros. O campo PAD é usado para ajustar o comprimento do bloco de informação ao valor de 48 octetos.

³ Com a excepção da última CPCS-PDU, todas as anteriores apresentam um *payload* de 48 octetos, de comprimento igual ao da respectiva SDU, uma vez que não é adicionado qualquer cabeçalho. Por esta razão, este tipo de segmentação e reunião, também é conhecido por AAL-0.

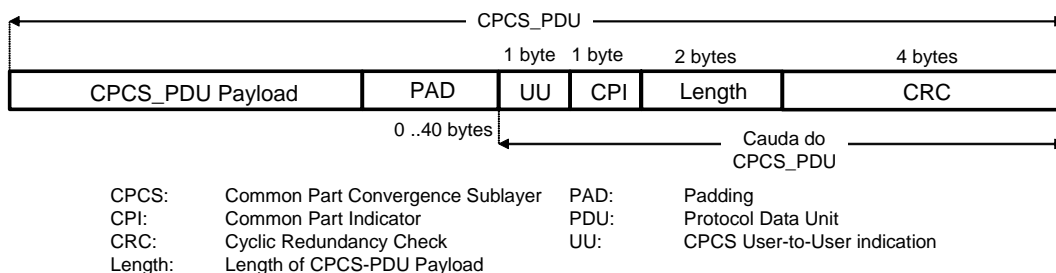


Figura 16: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS do AAL-5.

A Camada Física

A camada Física está dividida em duas subcamadas. A subcamada superior, chamada subcamada de Convergência para a Transmissão e a camada inferior, chamada subcamada do Meio Físico. As funções principais da subcamada de convergência para a transmissão são:

- Adaptação do fluxo de células ao sistema de transmissão usado. Isto é conseguido através da inserção de células vazias de modo a preencher a capacidade de transmissão não usada,
- Construção do formato de trama do sistema de transmissão usado,
- Processamento dos campos de controlo das tramas de nível físico,
- Inserção e remoção de células ATM de e para o nível físico,
- Delimitação de células,
- Detecção de erros através da análise do cabeçalho da célula ATM.

Na camada inferior (subcamada do meio físico), a realização das suas funções está inteiramente dependente do meio de transmissão utilizado. As funções principais realizadas são:

- codificação de linha,
- regeneração de bits,
- conversão electro-óptica.

Delimitação de células e controlo de erros

O mecanismo de delimitação da célula é baseado na correlação que existe entre o valor do cabeçalho da célula e o campo HEC para controlo de erros no cabeçalho. O campo HEC é um

octeto que corresponde ao resto da divisão módulo 2, do cabeçalho da célula, excluindo o HEC, multiplicado por x^8 , pelo polinómio gerador x^8+x^2+x+1 . A utilização do HEC permite corrigir um bit e detectar múltiplos bits em erro. O procedimento para controlo de erros na recepção com base no campo HEC está descrito na Figura 17.

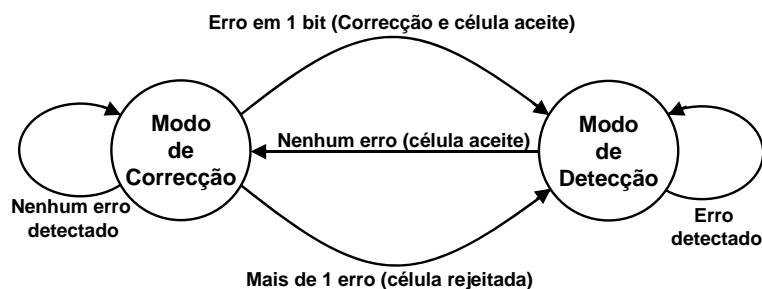


Figura 17: Diagrama de estados para o controlo de erros na recepção.

Existem dois modos de operação no receptor: correcção e detecção. O modo inicial é o de correcção, existindo a capacidade no receptor de corrigir um bit errado. Cada cabeçalho recebido é examinado e, se for detectado um erro, a acção a executar depende do modo de operação do receptor. No modo de correcção, se for só um bit errado, este é corrigido; se ocorrerem erros em mais de um bit, a célula é rejeitada. Em ambos os casos, o receptor comuta em seguida para o modo de detecção. Neste, todas as células com erros no cabeçalho são rejeitadas, mantendo-se o receptor no modo de detecção. Quando ocorrer um cabeçalho sem erros, o receptor volta ao modo de correcção. Devido a este procedimento, o receptor tem possibilidades de reagir às situações de erros isolados ou em rajadas.

O mecanismo de delimitação de célula tem o diagrama de estados indicado na Figura 18. Este diagrama de estados ocorre na recepção e tem o estado de Fora de Sincronismo como estado inicial.

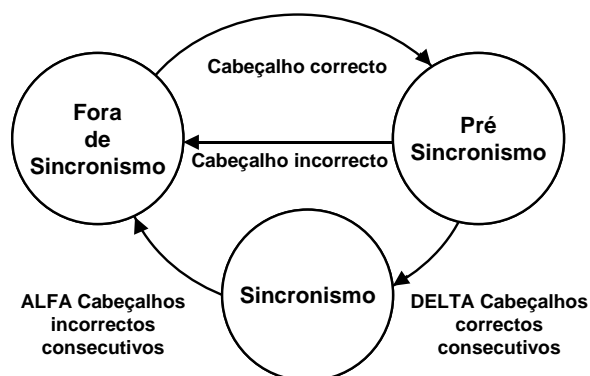


Figura 18: Diagrama de estados para o processo de delimitação de células.

O procedimento para se atingir o estado estável de funcionamento (Sincronismo) a partir do estado inicial é o seguinte: no estado Fora de Sincronismo é verificado, bit a bit, se a codificação do HEC em relação ao valor do resto do cabeçalho está correcta. Assim que se encontrar um valor correcto, presume-se que se está em presença de um cabeçalho correctamente delimitado e passa-se ao estado Pré-Sincronismo. Este mecanismo repete-se até que se encontrem HEC's correctos durante DELTA células consecutivas, passando-se nessa altura ao estado Sincronismo, considerando-se o processo de delimitação da célula concluído. Perder-se-á esta delimitação se ocorrerem HEC's incorrectos durante ALFA vezes consecutivas, voltando-se ao estado inicial⁴.

De modo a aumentar a segurança do processo de delimitação de células em relação a eventuais simulações do HEC correcto no campo de informação, os bits do campo de informação são misturados por um processo aleatório antes da informação ser enviada para a rede, por um sistema conhecido por *scrambler*, baseado num conjunto de registos de deslocamento com realimentação.

Na recepção, após o procedimento de delimitação de célula, existe um mecanismo inverso que permite reconstituir o campo de informação original.

Sistemas de Transmissão de células ATM

Em geral, qualquer sistema de transmissão com baixa taxa de erros e largura de banda adequada é candidato ao transporte de células ATM. No entanto, os sistemas de transmissão baseados nas hierarquias digitais síncronas e plesiócronas são os que estão implementados em maior número.

Nas hierarquias digitais síncronas, os sistemas SDH (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*) e SONET (SONET, *Synchronous Optical NETwork*) estão bastante implementados a 155Mbit/s embora sejam usados os débitos de 52Mbit/s (SONET) e 622Mbit/s (SONET e SDH), sendo este último cada vez mais vulgar devido às solicitações crescentes de maior largura de banda.

Nas hierarquias plesiócronas, os sistemas E1 e E3, com débitos de 2Mbit/s e 34Mbit/s, respectivamente são os mais usados na Europa enquanto que os sistemas DS-1 e DS-3 com débitos de 1.5Mbit/s e 45Mbit/s, respectivamente são os mais usados nos EUA.

⁴ Os valores de ALFA e DELTA poderão ser ajustados aos diferentes sistemas de transmissão, sendo os valores de ALFA= 7 e DELTA = 6 ou 8, recomendados para as interfaces de 155 520 kbit/s.

Seguidamente é feita uma breve descrição sobre a forma como são transmitidas as células nas hierarquias digitais síncronas.

- **Transmissão de células nas hierarquias digitais síncronas**

No caso do transporte de células ATM, tanto a rede SDH como a rede SONET usam o formato de dados de transporte VC-4, tornando-se as diferenças entre estas duas redes praticamente nulas no contexto das redes B-ISDN. A Figura 19 mostra a forma como são transportadas as células na trama STM-1 da rede SDH.

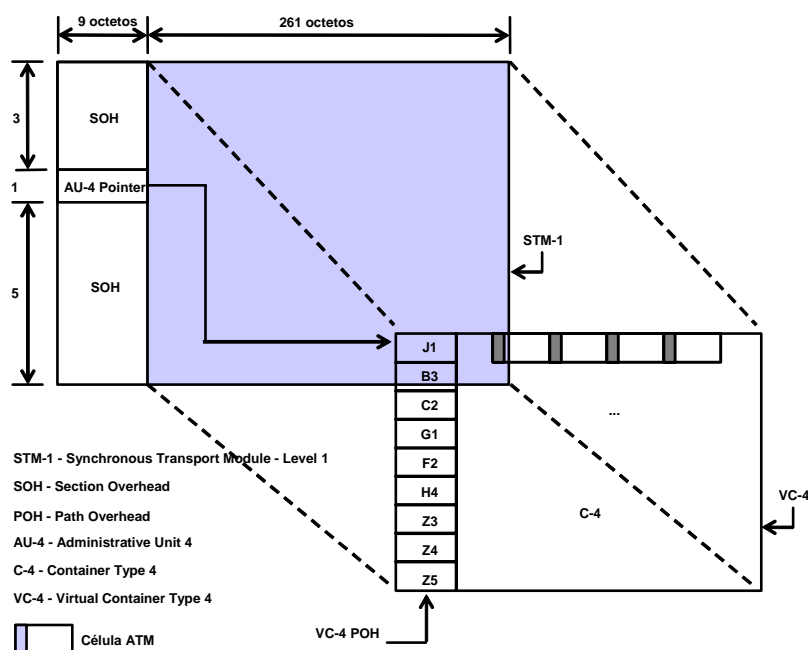


Figura 19: Transporte de Células ATM na rede SDH.

Na emissão, as células são colocadas em contentores do tipo C-4 com capacidade de 9 X 260 octetos. A este contentor virtual é adicionado um conjunto de 9 X 1 octetos de controlo chamados de POH (POH, *Path Overhead*) resultando no contentor virtual VC-4 que, em seguida, é mapeado na trama STM-1. Esta, além do contentor virtual VC-4 é composta por uma estrutura de controlo de 9 X 9 octetos chamada de SOH (SOH, *Section Overhead*). Um destes campos (AU-4, *Administrative Unit 4*) contém um apontador que indica a posição, na trama, onde se inicia a transmissão das células.

A capacidade útil de transmissão desta estrutura é de $260 \times 9 = 2340$ octetos. Este valor como não é múltiplo do tamanho das células ATM, faz com que a posição ocupada por estas não seja fixa como ilustra a Figura 19. Deste modo, a delimitação das células na recepção é efectuada à custa do processamento do cabeçalho da célula, da forma referida

anteriormente, ou através do processamento do campo H4 do VC-4 POH que indica a posição do contentor virtual VC-4 onde se localiza o início da primeira célula transportada na trama seguinte.

Configurações de Referência

Uma configuração de referência é uma representação esquemática em que são definidas claramente a interface entre as várias entidades da rede e as funções das diferentes entidades.

A configuração de referência usada na RDIS-BL, correspondente à interface utilizador-rede, é derivada da utilizada na RDIS e vem descrita na recomendação I.411 do ITU-T [ITU93e]. A Figura 20 representa a configuração de referência para a interface utilizador-rede. É constituída por pontos de referência e grupos funcionais.

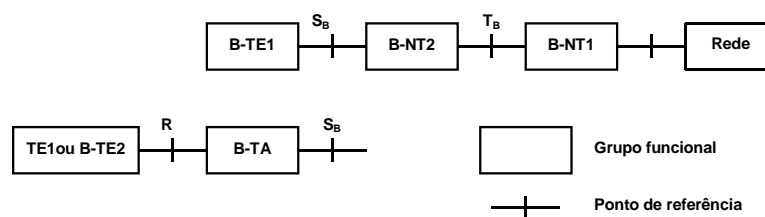


Figura 20: Configuração de referência para a interface utilizador-rede.

A interface utilizador-rede é definida no ponto de referência T_B . Nesta configuração de referência existem cinco grupos funcionais: B-NT1, B-NT2, B-TE1, B-TE2 e B-TA.

O grupo funcional Terminação de Rede 1 (B-NT1, *Broadband Network Termination 1*) está localizado nas instalações do utilizador mas, na Europa, pertence ao operador de telecomunicações. É o elemento final na linha de transmissão para a rede, englobando os componentes necessários para garantir o funcionamento correcto da ligação na instalação do utilizador no ponto T_B .

O B-NT1 só inclui funções da camada física nomeadamente a terminação da linha de transmissão, interface de transmissão e funções de operação e manutenção (OAM, *Operation and Maintenance*) [ITU93b].

O grupo funcional Terminação de Rede 2 (B-NT2, *Broadband Network Termination 2*) é o núcleo da rede na instalação do utilizador. O B-NT2 pode desempenhar as funções de concentrador, multiplexar / demultiplexar ou de comutador privado podendo, neste último caso,

ter uma implementação concentrada ou distribuída. O B-NT2 engloba não só funções da camada física mas também das camadas superiores.

O equipamento terminal de tipo 1 (B-TE1, *Broadband Terminal Equipment 1*) será um terminal compatível com as características ATM da interface no ponto de referência S_B , enquanto que o equipamento terminal de tipo 2 (TE2, *Terminal Equipment 2*) não possui essa compatibilidade, necessitando de um Adaptador de Terminal (B-TA, *Broadband Terminal Adaptor*) para se poder ligar a S_B .

Existem três pontos de referência na configuração: R, S_B e T_B . As características da interface em R dependem do tipo de TE2 que estiver a ser adaptado para ATM. No que respeita a S_B e T_B , em ambos poderá ser suportado um débito de 155.520kbit/s ou 622.080kbit/s, embora as recomendações avancem mais na definição das características básicas para 155.520kbit/s. Em regra, existe uma certa compatibilidade das características em S_B e T_B , de modo a permitir ligar directamente um equipamento terminal em T_B .

Em T_B , para 155.520kbit/s, são recomendadas quer interfaces ópticas, quer eléctricas. A solução escolhida depende da distância a ser coberta e dos requisitos do utilizador. Em qualquer dos casos, será feita uma ligação ponto-a-ponto.

A configuração de referência pode ser implementada fisicamente de diversas maneiras. A Figura 21 mostra algumas configurações possíveis.

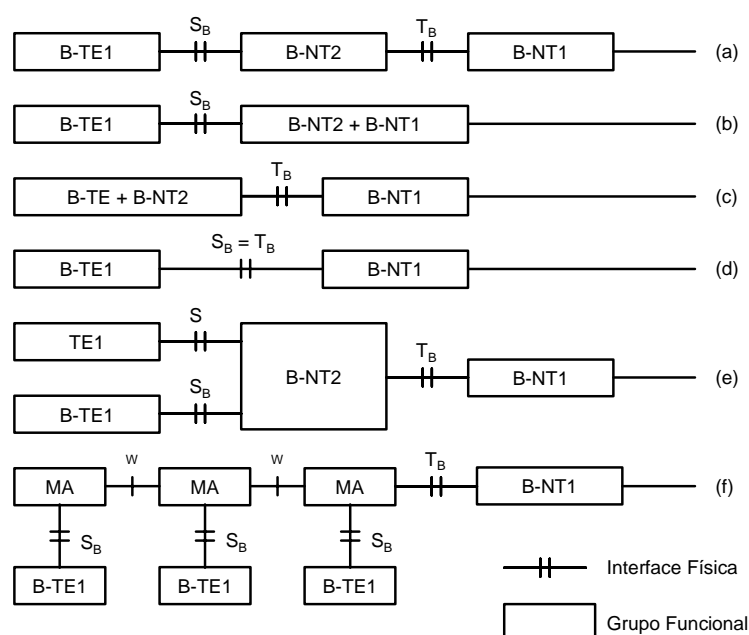


Figura 21: Exemplos de algumas configuração físicas na interface utilizador-rede.

No caso (a) são implementadas fisicamente as interfaces nos pontos S_B e T_B . No caso seguinte (b), apenas a interface em S_B está fisicamente presente. Aqui, B-NT1 e B-NT2 são agrupadas numa entidade única. No caso (c) apenas a interface em T_B é implementada fisicamente, resultando uma entidade que agrupa B-TE e B-NT2. Em (d) os pontos S_B e T_B são coincidentes e, por isso, idênticos. Neste caso não existe B-NT2 nas instalações do utilizador. No caso (e) as interfaces físicas entre terminais e B-NT2 são S_B e S (para RDIS), baseadas num agrupamento centralizado de B-NT2. Como já foi referido, B-NT2 pode ser igualmente distribuído. Uma configuração possível é representada na Figura 21(f). O MA (MA, *Medium Adaptor*) implementa um mecanismo de acesso ao meio, de modo a que todos os terminais possam aceder à rede. Estes MA's são totalmente dependentes da topologia utilizada e as suas funções não serão objecto de normalização. Neste exemplo, a interface W poderá ser igualmente dependente da topologia e também não será normalizada. No entanto, poderão existir soluções em que W é idêntica a S_B .

Bibliografia

- [Amo01] Amorim, D., Rochol, J., "Avaliação de Desempenho do Protocolo de Adaptação ATM tipo 2 (AAL-2)", Proceedings da XXVII Conferência Latino Americana de Informática - CLEI2001, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2001.
- [ATM94] ATM Forum, AF-UNI-0010.002, "User to Network Interface Specification - Version 3.1", Setembro de 1994.
- [ATM97] ATM Forum, AF-VTOA-0078.000, "ATM Circuit Emulation Service – Intereoperability Specification", Version 2.0, Janeiro de 1997.
- [ATM99a] ATM Forum, AF-VTOA-0113.000, ATM Trunking using AAL-2 for Narrowband Services, Fevereiro de 1999.
- [ATM99b] ATM Forum, AF-TM-0121.000, "Traffic Management Specification Version 4.1", Março de 1999.
- [Bla95] Black, Uyless D., "ATM: Foundation for Broadband Networks", Prentice Hall Series in Advanced Communications Technologies, Maio de 1995.
- [Cab95] Cabral, J.M., "Emulação de Circuitos em Redes ATM, Sistema de Teste de Algoritmos de Recuperação de Relógio", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 1995.
- [Cou83] Coudreuse, J.P., "Les réseaux temporels asynchrones: du transfert de données à l'image animée", L'Echo des Recherches, N° 112, 1983.
- [FOR99] "ForeRunner HE/200E/LE ATM Adapters for the PC User's Manual", Software Version 5.0.2, FORE Systems, Inc, Fevereiro, 1999.
- [Goy99] Goyal, R; "Traffic Management for TCP/IP over Asynchronous Transfer Mode (ATM) Networks", Tese de Doutorado, The Ohio State University; EUA, 1999.

- [Hän94] Händel, R., Huber, M. N., Schröder, S.; "ATM Networks - Concepts, Protocols, Applications", Siemens AG, Munich, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [ITU91a] ITU-T, Rec. G.703, "Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces", Genebra, Abril, 1991.
- [ITU91b] ITU-T, Rec. I.321 - "B-ISDN Protocol Reference Model and its Application", Genebra, Abril de 1991.
- [ITU92] ITU-T, Rec. G.728 - "Coding of Speech at 16 kbit/s using Low-Delay Code Excited Linear Prediction", Setembro de 1992.
- [ITU93a] ITU-T, Rec. I.320, "ISDN Protocol Reference Model", Genebra, Novembro de 1993.
- [ITU93b] ITU-T, Rec. I.327 - "B-ISDN Network Functional Architecture", Rev. 1, Genebra, 1993.
- [ITU93c] ITU-T, Rec. I.362 - "BISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Functional Description", Rev. 1, Genebra, 1993.
- [ITU93d] ITU-T, Rec. I.363 - "BISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Specification", Helsínquia, Março de 1993.
- [ITU93e] ITU-T, Rec. I.411, "ISDN User-Network Interfaces - Reference Configurations", Rev. 1, Genebra, 1993.
- [ITU94] ITU-T, Rec. Q.2110, "B-ISDN ATM Adaptation Layer - Service Specific Connection Oriented Protocol (SSCOP)", Julho de 1994.
- [ITU96] ITU-T, Rec. G.131, "Control of talker echo", Agosto, 1996.
- [ITU96a] ITU-T, Rec. G.729 - "Coding of Speech at 8kbit/s using Conjugate Structure Algebraic Coded Excited Linear Prediction (CS-ACELP)", Março de 1996.
- [ITU96b] ITU-T, Rec. I.363.1 - "B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 1 AAL", Agosto de 1996.
- [ITU96c] ITU-T, Rec. I.363.3 - "B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 3/4 AAL", Agosto de 1996.
- [ITU96d] ITU-T, Rec. I.363.5 - "B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 5 AAL", Agosto de 1996.

- [ITU96e] ITU-T, Rec. I.371 – “Traffic control and congestion control in B-ISDN”, Agosto de 1996.
- [ITU96f] ITU-T, Rec. I.356 – “B-ISDN ATM layer cell transfer performance”, Outubro de 1996.
- [ITU97a] ITU-T, Rec. I.371.1 – “Traffic control and congestion control in B-ISDN: conformance definitions for ABT and ABR”, Junho de 1997.
- [ITU97b] ITU-T, Rec. I.363.2 – “B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 2 AAL”, Setembro de 1997.
- [ITU98] ITU-T, Rec. I.366.1, “Segmentation and Reassembly Service Specific Convergence Sublayer for the AAL type 2”, Junho de 1998.
- [Iye97] Iyer, J., Jain, R., Munir, S., Dixit, S.; "Performance of Compressed Voice Sources over VBR", ATM Forum/97-0608, Julho de 1997.
- [Jam04] James, J.H., Chen, B., Garrinson, L.; “Implementing VoIP: A Voice Transmission Performance Progress Report”, IEEE Communications Magazine, pp 36-41, Julho de 2004.
- [Lap95] Lapid, Y.; “Video Communications in B-ISDN”; Computer Networks Lab, Department of Electrical Engineering Technion, Israel, Fevereiro de 1995, <http://www2.rad.com/networks/1994/atm/videoatm.htm>.
- [Liu99] Liu, C., Munir, S., Jain, R., Dixit, S.; "Packing Density of Voice Trunking using AAL-2", Proceedings IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom99), Vol. 1(B), pp. 611-615, 5-9 de Dezembro, 1999, Rio de Janeiro, Brasil.
- [Lue98] Luetchford, J.C., Schreinemachers, M., Arai, N.M.; “Applications of ATM In Global Networks”, IEEE Communications Magazine, pp 104-109, Agosto de 1998.
- [Mar97] Martins, J.A.L., “Evolução Tecnológica da Internet em Portugal”, Ingenium, 2ª Série, Nº 17, pp 70-78, Maio de 1997.
- [McD95] McDysan, D. E., Spohn, D. L., “ATM Theory and Application”, McGraw-Hill Series on Computer Communications, 1995.
- [McI97] Mcloughlin, M., O'Neil, J.; A Management Briefing on Adapting Voice for ATM Networks, An AAL-2 Tutorial. General DataComm, 1997.

- [Moo98] Moondhra, V., "Implementation And Performance Analysis of ATM Adaptation Layer Type 2", Tese de Mestrado, Department of Electrical Engineering and Computer Science and the Faculty of the Graduate School of the University of Kansas, EUA, Maio, 1998.
- [Nev95] Neves, J.J.S.E.; "Partilha Dinâmica de Recursos em Redes de Comunicação", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [Nun92] Nunes, M. S., Casaca, A.; "Redes Digitais com Integração de Serviços", Editorial Presença, 1991.
- [Omi93] Omidyar, C.G., Aldridge, A.; "Introduction to SDH/SONET", IEEE Communications Magazine, Setembro de 1993.
- [Orz98] Orzessek, M., Sommer, P.; "ATM & MPEG-2, Integrated Digital Video into Broadband Networks", Hewlett - Packard Company, Prentice - Hall, Inc., 1998.
- [Owe94] Owen, F.F.E., "PCM and Digital Transmission Systems", Texas Instruments Electronics Series, McGraw-Hill Book Company, 1982.
- [Pry95] Prycker, M., "Asynchronous Transfer Mode - Solution for Broadband ISDN", Prentice Hall, 3ª Edição, 1995.
- [Tur83] Turner, J.S., Wyatt L.F.; "A packet network architecture for Integrated Services", Globecom '83, San Diego, Novembro de 1983.
- [Win98] Winstanley, S. B., "Quality of Service over ATM Networks", Tese de Doutorado; Department of Electronic Engineering, Queen Mary and Westfield College, University of London, 1998.