

Aula 19

- USB – Universal Serial Bus
- Características principais
- Topologia
- Codificação e transmissão de dados
- Gestão de energia
- Modelo de comunicação
- Tipos de transferências

José Luís Azevedo, Arnaldo Oliveira, Tomás Silva, Bernardo Cunha

Introdução

- USB - Barramento standard desenvolvido por alguns dos principais fabricantes de PCs e indústrias de eletrónica e telecomunicações com vista a interligar dispositivos (tipicamente computadores a periféricos)
 - Compaq, DEC, IBM, Intel, Microsoft, NEC, and Northern Telecom
- Surgiu em 1996 como resposta à necessidade de simplificar a instalação de periféricos num PC
- Antes do USB, ligar novos dispositivos a um PC envolvia acrescentar hardware específico e fazer a respetiva configuração, evitando conflitos (e.g. gama de endereços atribuídos, linhas de interrupção, etc.)

Introdução

- Evolução
 - USB 1.0, Janeiro de 1996 (Low Speed, 1.5 Mbit/s)
 - USB 1.1, Agosto de 1998 (Full Speed, 12 Mbit/s)
 - USB 2.0, Abril de 2000 (High Speed, 480 Mbit/s)
 - USB 3.0, Novembro de 2008 (Super Speed, 5 Gbit/s)
 - USB 3.1, Julho de 2013 (Super Speed+, 10 Gbit/s)
 - USB 3.2, Setembro de 2017 (Super Speed+, 10/20 Gbit/s com conectores USB-C)
 - USB 4.0, Setembro de 2019. Baseado no protocolo Thunderbolt 3 da Intel suporta taxas de transferência até 40 Gbit/s.
- Todas as novas versões mantêm a compatibilidade com as versões anteriores, com exceção do USB 4.0 que apenas é compatível com as versões USB 3.x e USB 2.0

Introdução

- Alguns dos objetivos delineados pelas empresas que conceberam o USB:
 - Os utilizadores não devem ter que configurar *switches* ou *jumpers* em placas ou dispositivos
 - Os utilizadores não devem ter que abrir caixas para instalar novos dispositivos de Input/Output
 - Deve haver somente um tipo de cabo para ligar todos os dispositivos
 - Os dispositivos de Input/Output devem poder obter energia do cabo
 - Devem poder ser ligados até 127 dispositivos a um único computador
 - O sistema deve suportar dispositivos de tempo real (áudio, vídeo,...)
 - Os dispositivos devem poder ser instalados com o computador em funcionamento
 - Não deve ser necessário reiniciar o computador após a instalação de um novo dispositivo
 - O novo barramento e seus dispositivos de Input/Output devem ter um baixo custo de produção

Características principais

- "Hot plugging": Possibilidade de ligar e desligar fisicamente dispositivos sem necessidade de desligar a alimentação do sistema ou efetuar a sua reinicialização
- Configuração automática ("plug and play")
- Disponibiliza (dentro de certos limites) a alimentação para os dispositivos (+5V)
- Três taxas de transmissão (**na versão 2.0**)
 - **low-speed, 1.5 Mbit/s** – para comunicação com dispositivos de interação com o utilizador (rato, teclado, joystick, etc.)
 - **full-speed, 12 Mbit/s** – para comunicação com dispositivos que não requeiram taxas elevadas (e.g. impressoras, áudio, ...)
 - **high-speed, 480 Mbit/s** – para comunicação com dispositivos de alto débito (e.g. vídeo, discos, ...)
- Comunicação **half-duplex** (USB 1.0 e 2.0)

Características principais

- O USB 3.x mantém compatibilidade com versões anteriores e acrescenta as taxas de transmissão
 - USB 3.0: **Super-speed mode – 5 Gbit/s**
 - USB 3.1: **Super-speed plus mode – 10 Gbit/s**
- **Comunicação "full-duplex"** no USB 3.x quando são usados os "Super-speed" modes
- Os dados são transmitidos em modo diferencial em par entrançado (nível lógico na receção é discriminado pela diferença de tensão entre os dois sinais)
- O USB usa **comunicação síncrona orientada ao bit**. Um conjunto consecutivo de bits é organizado numa mensagem (packet)
- Os bits são transmitidos continuamente com um ritmo imposto por um relógio que segue para o recetor embebido nos dados (**relógio codificado** - uma das tarefas do recetor é a recuperação desse relógio)

Sinalização

Pin	Function (host)	Function (device)
1	V _{BUS}	V _{BUS}
2	D ⁻	D ⁻
3	D ⁺	D ⁺
4	Ground	Ground

USB 1.0/2.0 conector Pinout

USB 3.x conector Pinout

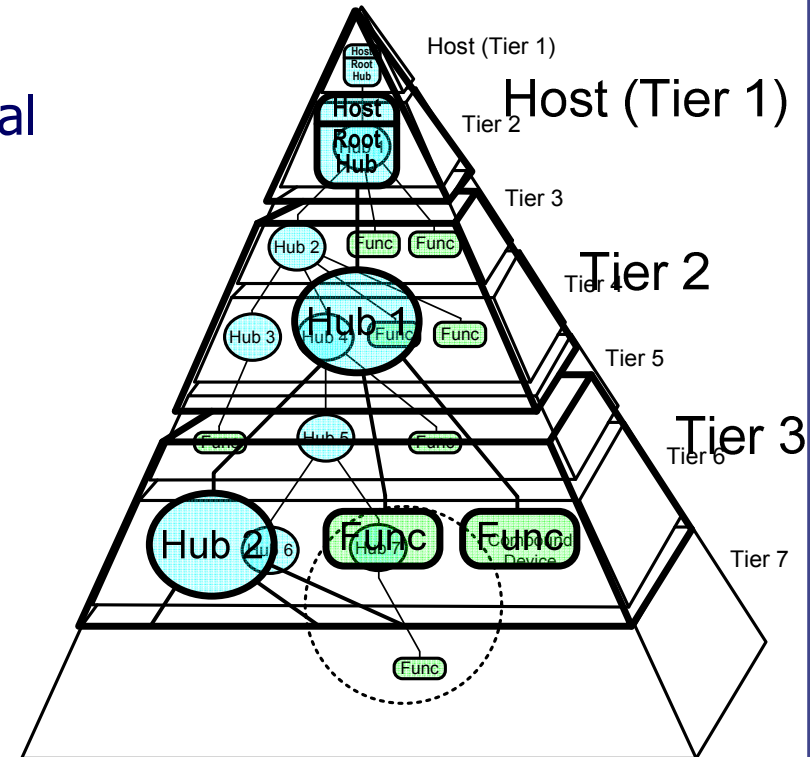
USB 1.0/2.0

Pin	Color	Signal name ("A" Connector)	Signal name ("B" Connector)	Description
Shell	N/A	Shield		Metal housing
1	Red	VBUS		Power
2	White	D-		USB 2.0 differential pair
3	Green	D+		
4	Black	GND		Ground for power return
5	Blue	StdA_SSRX-	StdB_SSTX-	Superspeed transmitter differential pair
6	Yellow	StdA_SSRX+	StdB_SSTX+	
7	N/A	GND_DRAIN		Ground for signal return
8	Purple	StdA_SSTX-	StdB_SSRX-	Superspeed receiver differential pair
9	Orange	StdA_SSTX+	StdB_SSRX+	

USB 3.x

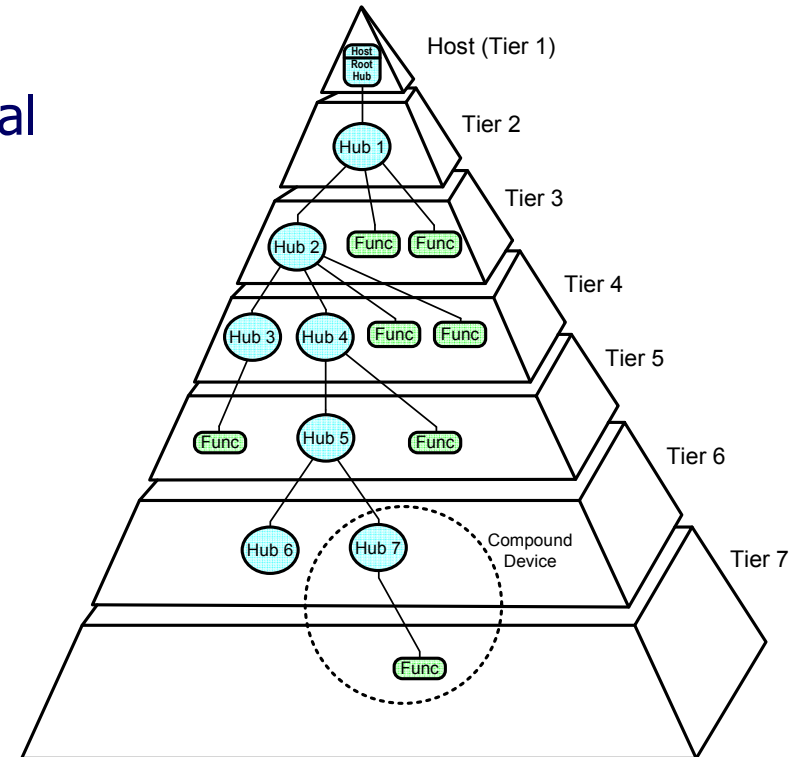
Topologia

- **Ligação física em árvore** (tiered star), partindo de um sistema central (host controller+root hub) para vários dispositivos ("functions", na "terminologia USB")
- **Máximo de 7 níveis** (incluindo "root hub") e de 127 dispositivos
- Uma "function" pode atuar como extremo ou disponibilizar acessos para outros dispositivos operando, nesse caso, como **hub**
- **Hub** (concentrador): permite que vários dispositivos possam partilhar uma única porta USB
 - Uma única ligação a montante, várias a jusante
 - Permite o aumento da disponibilidade de corrente (alimentação) para os dispositivos que a ele se ligem



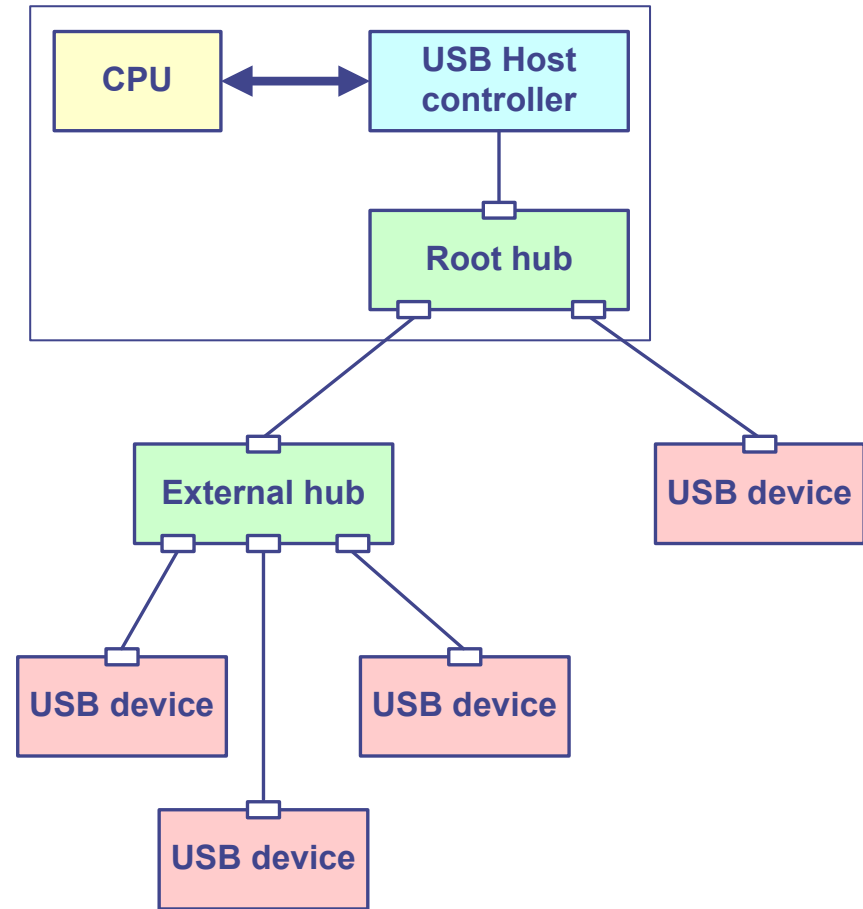
Topologia

- **Ligação física em árvore** (tiered star), partindo de um sistema central (host controller+root hub) para vários dispositivos ("functions", na "terminologia USB")
- **Máximo de 7 níveis** (incluindo "root hub") e de 127 dispositivos
- Uma "function" pode atuar como extremo ou disponibilizar acessos para outros dispositivos operando, nesse caso, como **hub**
- **Hub** (concentrador): permite que vários dispositivos possam partilhar uma única porta USB
 - Uma única ligação a montante, várias a jusante
 - Permite o aumento da disponibilidade de corrente (alimentação) para os dispositivos que a ele se ligem



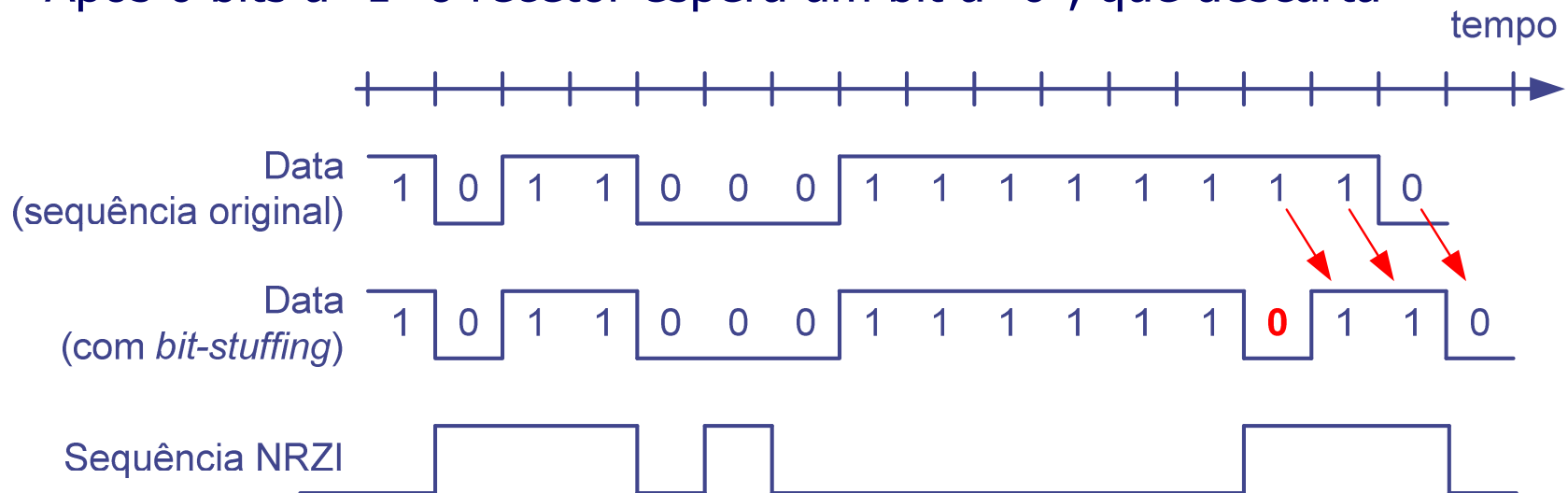
Topologia

- **Arquitetura "master-slave"**
(i.e., cada dispositivo apenas envia dados após permissão explícita do "host controller")
- Não há comunicação entre dois dispositivos USB. Cada dispositivo comunica apenas com o "host controller"
- O controlador USB é encarado, na arquitetura do sistema, computacional como qualquer outro periférico



Codificação e transmissão de dados

- Codificação NRZI (non-return to zero, inverted)
- Sinal codificado em NRZI não altera a polaridade para "1"s lógicos, invertendo-a para "0"s lógicos
- **"Bit-stuffing"** quando nº de "1"s consecutivos ≥ 6
- É inserido um "0" após 6 "1"s consecutivos (na sequência original) de modo a forçar uma transição na sequência transmitida que permita ao recetor manter o relógio sincronizado
- Após 6 bits a "1" o recetor espera um bit a "0", que descarta



Gestão de energia

- Dispositivos (incluindo *hubs*) podem ter fonte de alimentação própria ou alimentar-se do barramento
- USB 2.0 – 1 unidade de carga (UC): 100 mA
 - Um *hub* alimentado pelo barramento pode (depois de configurado) fornecer em cada porta um máximo de 1 UC (i.e. 100 mA). A corrente máxima fornecida pelo *hub* está limitada a 5 UC
 - Um *hub* auto-alimentado pode fornecer em cada porta um máximo de 5 UC (i.e. 500 mA)
- USB 3.x – 1 unidade de carga (UC): 150 mA
 - *Hub* alimentado pelo barramento pode fornecer em cada porta 1 UC. A corrente máxima fornecida pelo *hub* está limitada a 6 UC (900mA)
 - Um *hub* auto-alimentado pode fornecer em cada porta 6 UC

Gestão de energia

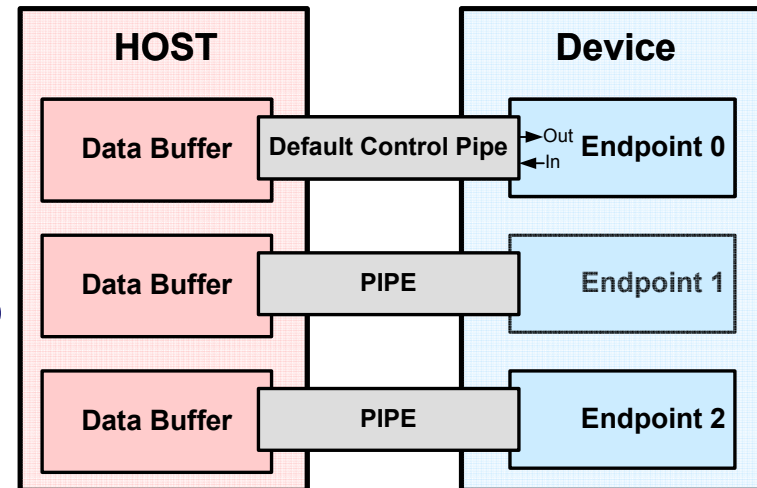
- Após conexão os "devices" são interrogados pelo "host controller" acerca das suas necessidades energéticas
 - Situações de sobrecarga são notificadas e *hubs/devices* podem ser desligados automaticamente
 - Durante a fase inicial os *devices* têm de operar em modo de baixo consumo (low power, max. 1 unidade de carga), passando para o modo normal de operação apenas após autorização explícita do "Host controller"
- A disponibilização de energia entre um *hub* e um dispositivo é também utilizada para a deteção da ligação ou da retirada do dispositivo o que permite implementar o modo de operação "plug-and-play"

Modelo de comunicação USB

- O "host controller" pode controlar até 127 dispositivos, cada um com um identificador único (entre 1 e 127)
- O identificador 0 é reservado para permitir a ligação de um novo dispositivo; quando um novo dispositivo se liga, o "host controller" atribui-lhe um novo identificador e liberta o identificador 0
- Não há comunicação entre dois dispositivos USB: cada dispositivo USB comunica apenas com o "host controller" através de canais virtuais, designados por "**pipes**" (condutas)
- Cada dispositivo pode incluir várias funcionalidades a que correspondem terminais lógicos (designados por "**endpoints**")
- Um *pipe* estabelece a comunicação entre um *endpoint* e o "host controller"; os *endpoints* estão numerados de 0 a 15 (a cada número correspondem dois *endpoints*, um em cada sentido)
- Os *endpoints* são unidirecionais (ou são "sinks" ou "sources"), sendo denominados:
 - OUT (sink): do "host controller" para o dispositivo (OUT EP)
 - IN (source): do dispositivo para o "host controller" (IN EP)

Modelo de comunicação USB

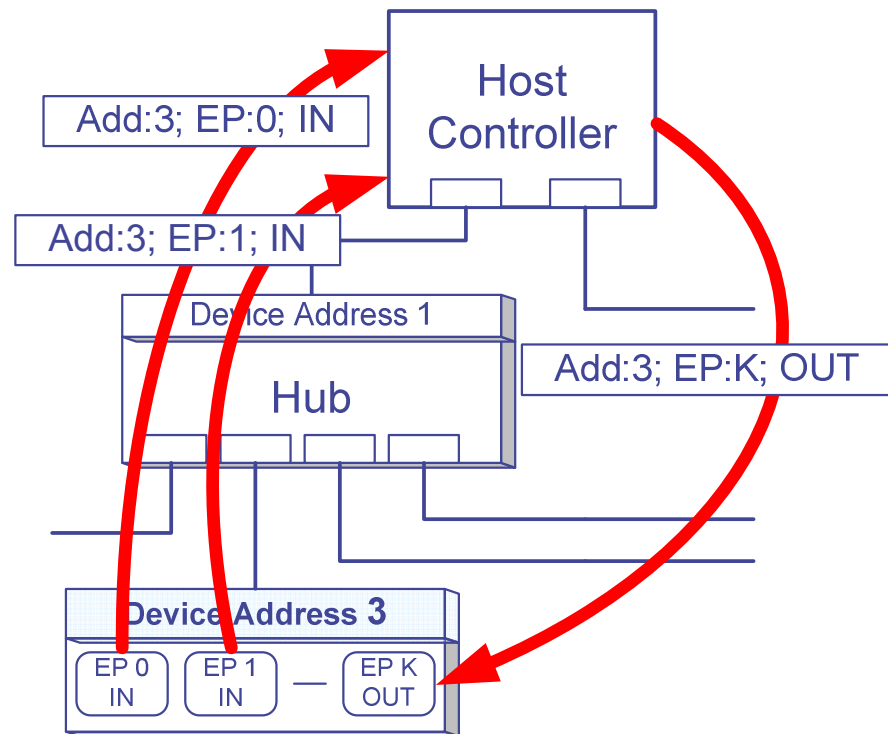
- Todos os dispositivos implementam obrigatoriamente os dois *endpoints* com o número 0
- O **"default control pipe"** está associado ao *endpoint 0*, é usado para efeitos de configuração e verificação de estado



- O "default control pipe" é obrigatório em todos os dispositivos USB – é o canal de comunicação bidirecional básico que se estabelece quando o dispositivo é ligado
- Os restantes canais de comunicação (pipes) são estabelecidos quando o dispositivo é ligado ao barramento, numa fase designada por **enumeração**
- Cada *endpoint* inclui uma zona de memória suficiente para guardar o maior pacote que pode circular no *pipe* a ele associado (configurado na fase de enumeração)

Modelo de comunicação – endereçamento

- O endereço do dispositivo é atribuído pelo *host controller* aquando da conexão, sendo único no barramento
- Número do *endpoint*: cada *endpoint* tem um número pré-configurado, único para cada device
- Direção: IN/OUT



A combinação
"Endereço de device : Número de Endpoint : Direcção"
identifica univocamente cada *endpoint* no barramento

Enumeração

- No arranque do sistema o *host controller* acede ao *root hub* para:
 - Descobrir se há dispositivos a ele ligados
 - Identificar os dispositivos ligados aos diferentes *hubs* descobertos no sistema
- Passa depois ao procedimento de enumeração de cada um dos dispositivos encontrados: troca de informação inicial, que acontece automaticamente quando o sistema arranca e sempre que um dispositivo é ligado
- A enumeração permite ao *host controller* reconhecer e inicializar um dispositivo. Inclui:
 - Atribuição de um endereço (único)
 - Leitura de informações (e.g. Class, Vendor)
 - Requisitos de comunicação
 - Alocação de recursos
 - Requisitos de corrente
 - Atribuição e carregamento do *Device Driver*
 - ...
- É uma tarefa permanente pois podem ligar-se/desligar-se dinamicamente dispositivos a um barramento USB

Tipos de transferências

- O USB suporta 4 tipos de transferências de dados
- **Não periódicas** – surgem sem qualquer período definido, sob iniciativa do *host-controller*, sem garantia de taxa de transmissão ou de latência:
 - **Control** Transfers
 - **Bulk** Transfers (massivo)
- **Periódicas** – Na fase de enumeração é definido o período entre envios consecutivos de informação, garantindo-se um limite máximo para a **latência** (atraso máximo de transmissão pelo USB):
 - **Isochronous** Transfers (isócrono)
 - **Interrupt** Transfers
- Cada *pipe* suporta apenas um destes tipos de transferência

Transferências de controlo

- São utilizadas pelo *host-controller* para o envio de mensagens de **comando e configuração** ou **consulta de estado** de um dispositivo
- Todos os dispositivos USB têm de implementar o "default control pipe" associado ao *endpoint* 0, destinado a tarefas de configuração, controlo e verificação de estado
- As transferências de controlo suportam a comunicação com o *endpoint* 0 do dispositivo (IN e OUT). Podem ser criados *endpoints* adicionais deste tipo para satisfazer necessidades específicas dos dispositivos
- Em princípio, a informação a transmitir / receber é de pequena dimensão

Transferências Bulk (massivo)

- Transferência de volumes de dados elevados, com instantes de transmissão irregulares
- Permitem a transmissão de dados com garantias de entrega, usando mecanismos de retransmissão em caso de detecção de uma situação de erro (CRC – Cyclic Redundancy Check)
- Não são dadas garantias de largura de banda (quantidade de dados/unidade de tempo) ou de latência, sendo este tráfego tratado em regime de "best effort"
- As transferências deste tipo utilizam a parte da trama que se encontra disponível após a transmissão dos pacotes relativos aos outros tipos de transferências
- Exemplos de dispositivos que usam este tipo de transferências: discos, pen-drives, scanners, impressoras

Transferências de Interrupção

- Não há sinais físicos dos periféricos para o controlador de interrupções do CPU
- O ***host-controller*** **interroga periodicamente** os dispositivos (registados com este modo de transferência) para saber se algum tem informação para transferir (é um *polling* feito pelo *host-controller*)
- A regularidade com que o *polling* é feito depende do valor da latência negociada na fase de enumeração no arranque do periférico (o sucesso da negociação depende da existência de recursos suficientes para satisfazer os requisitos)
- O período de *polling* pode ser configurado entre 1 e 255 ms
- No caso em que ocorre um erro de comunicação, a retransmissão é feita no período de *polling* seguinte
- São transmitidas baixas quantidades de informação (até 64 bytes)
- Tipo de transferência tipicamente usado em dispositivos de interação com o utilizador: ratos, teclados, joysticks, etc.

Transferências Isócronas

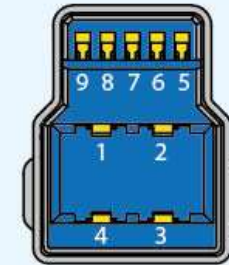
- Permitem a transferência de informação com uma **largura de banda garantida** (quantidade de dados / unidade de tempo) e **latência limitada**. Ou seja, é assegurado um ritmo de transmissão sustentado
- Estes parâmetros são negociados após a ligação do dispositivo ao barramento, na fase de enumeração (o sucesso da negociação depende da existência de recursos suficientes para satisfazer os requisitos)
- Os eventuais erros de transmissão não são corrigidos, isto é, não há retransmissão de informação (não há garantias de entrega)
- É, das quatro, o único tipo de transferência que **não faz controlo de erros**
- Este tipo de transferência é usado essencialmente em aplicações de áudio e vídeo; i.e., aplicações onde garantir o ritmo de transmissão é mais importante que garantir que todos os dados chegam ao destino

Anexo: USB 3.x – conetores tipo A e tipo B

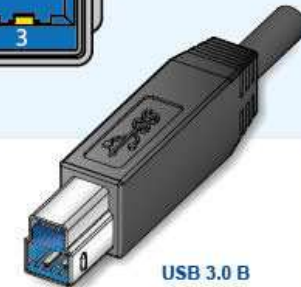
Comprimento dos cabos limitado a 5 m

USB 3.0 type B pinout, cable Assembly

USB type B Pinout, Cable Assembly		
Pin	Signal Name	Description
1	VBUS	Red
2	D-	White
3	D+	Green
4	GND	Black
5	StdA_SSTX-	Blue
6	StdA_SSTX+	Yellow
7	GND_DRAIN	GROUND
8	StdA_SSRX-	Purple
9	StdA_SSRX+	Orange
Shell	Shield	Connector Shell



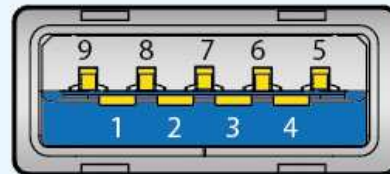
USB 3.0 type B Connector



USB 3.0 B

USB 3.0 type A pinout, cable Assembly

USB type A Pinout, Cable Assembly		
Pin	Signal Name	Description
1	VBUS	Red
2	D-	White
3	D+	Green
4	GND	Black
5	StdA_SSRX-	Blue
6	StdA_SSRX+	Yellow
7	GND_DRAIN	GROUND
8	StdA_SSTX-	Purple
9	StdA_SSTX+	Orange
Shell	Shield	Connector Shell



USB 3.0 type A Connector



USB 3.0 A

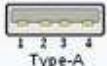
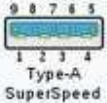


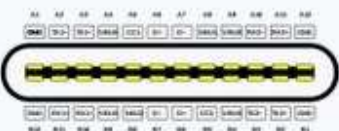
Micro-B



3.0







- O conetor tipo A liga ao host
- O conetor tipo B liga ao device

Anexo: Conectores

Connectors		USB 1.0 1996	USB 2.0 2001	USB 2.0 Revised	USB 3.0 2011	USB 3.1 2014	USB 3.2 2017	USB4 2019
Data rate		1.5 Mbit/s (Low Speed)	1.5 Mbit/s (Low Speed)		5 Gbit/s (SuperSpeed)	10 Gbit/s (SuperSpeed+)	20 Gbit/s (SuperSpeed+)	40 Gbit/s (SuperSpeed+ and Thunderbolt 3)
		12 Mbit/s (Full Speed)	12 Mbit/s (Full Speed)	480 Mbit/s (High Speed)				
Standard	A	Type A 			Type A 			Deprecated
	B	Type B 			Type B 			Deprecated
	C	N/A				Type C (enlarged) 		

Ref: <https://en.wikipedia.org/wiki/USB>

Anexo: Conectores

Connectors		USB 1.0 1996	USB 2.0 2001	USB 2.0 Revised	USB 3.0 2011	USB 3.1 2014	USB 3.2 2017	USB4 2019
Mini	A	N/A	Mini A  Mini-A		Deprecated			
	B		Mini B  Mini-B					
	AB	N/A	Mini AB  Mini-AB					
Micro	A	N/A						
	B	N/A	Micro B  Micro-B	Micro B  Micro-B SuperSpeed		Deprecated		
	AB		Micro AB  Micro-AB	Deprecated				
Connectors		USB 1.0 1996	USB 2.0 2001	USB 2.0 Revised	USB 3.0 2011	USB 3.1 2014	USB 3.2 2017	USB4 2019

Ref: <https://en.wikipedia.org/wiki/USB>

Anexo: Classes USB

Class	Usage	Description	Examples, or exception
00h	Device	Unspecified ^[42]	Device class is unspecified, interface descriptors are used to determine needed drivers
01h	Interface	Audio	Speaker, microphone, sound card, MIDI
02h	Both	Communications and CDC Control	Modem, Ethernet adapter, Wi-Fi adapter, RS-232 serial adapter. Used together with class 0Ah (<i>CDC-Data, below</i>)
03h	Interface	Human interface device (HID)	Keyboard, mouse, joystick
05h	Interface	Physical Interface Device (PID)	Force feedback joystick
06h	Interface	Image (PTP/MTP)	Webcam, scanner
07h	Interface	Printer	Laser printer, inkjet printer, CNC machine
08h	Interface	Mass storage (MSC or UMS)	USB flash drive, memory card reader, digital audio player, digital camera, external drive
09h	Device	USB hub	Full bandwidth hub
0Ah	Interface	CDC-Data	Used together with class 02h (<i>Communications and CDC Control, above</i>)
0Bh	Interface	Smart Card	USB smart card reader
0Dh	Interface	Content security	Fingerprint reader
0Eh	Interface	Video	Webcam
0Fh	Interface	Personal healthcare device class (PHDC)	Pulse monitor (watch)
10h	Interface	Audio/Video (AV)	Webcam, TV
11h	Device	Billboard	Describes USB Type-C alternate modes supported by device
DCh	Both	Diagnostic Device	USB compliance testing device
E0h	Interface	Wireless Controller	Bluetooth adapter, Microsoft RNDIS
EFh	Both	Miscellaneous	ActiveSync device
FEh	Interface	Application-specific	IrDA Bridge, Test & Measurement Class (USBTMC), ^[43] USB DFU (Device Firmware Upgrade) ^[44]
FFh	Both	Vendor-specific	Indicates that a device needs vendor-specific drivers

Ref:https://en.wikipedia.org/wiki/USB#Device_classes