

Patrocinado por



Integridade de Sinal em Sistemas Embarcados

Conceitos e Aplicação em Projeto de PCB



André Araújo

Gerente de Engenharia na J.G. Moriya



WEBINAR
EMBARCADOS



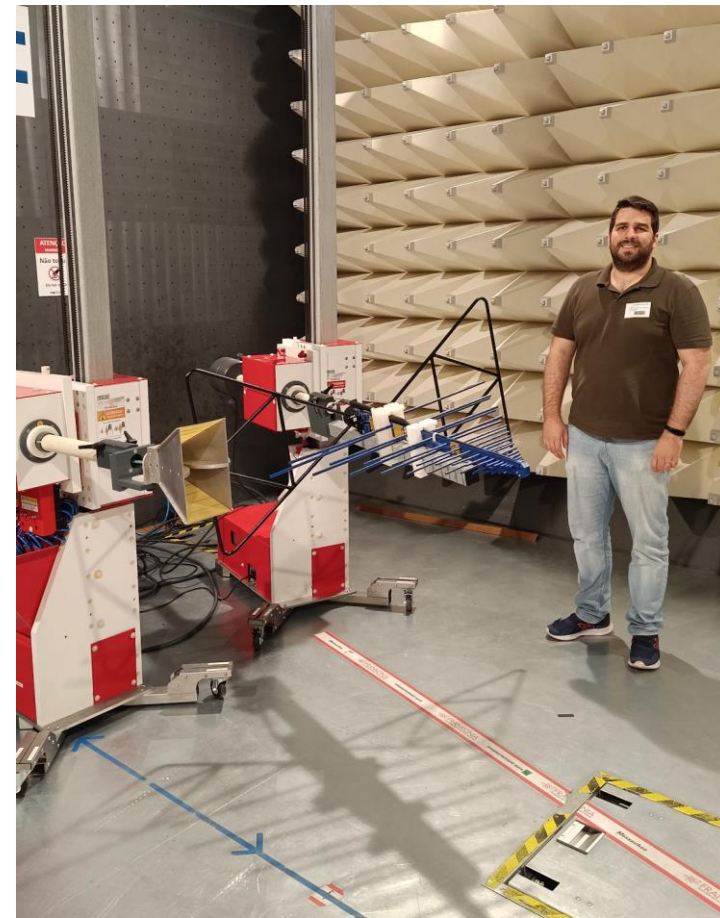
Patrocinado por



**MOUSER
ELECTRONICS**

QUEM SOU EU?

- Eng. André. A. M. Araújo
 - Engenharia Mecatrônica (Poli-USP 2010)
 - Mestrado em Biomecatrônica (Poli-USP 2014)
 - Engenheiro na J.G. Moriya há quase 15 anos
 - Desenvolvimento de equipamentos eletromédicos



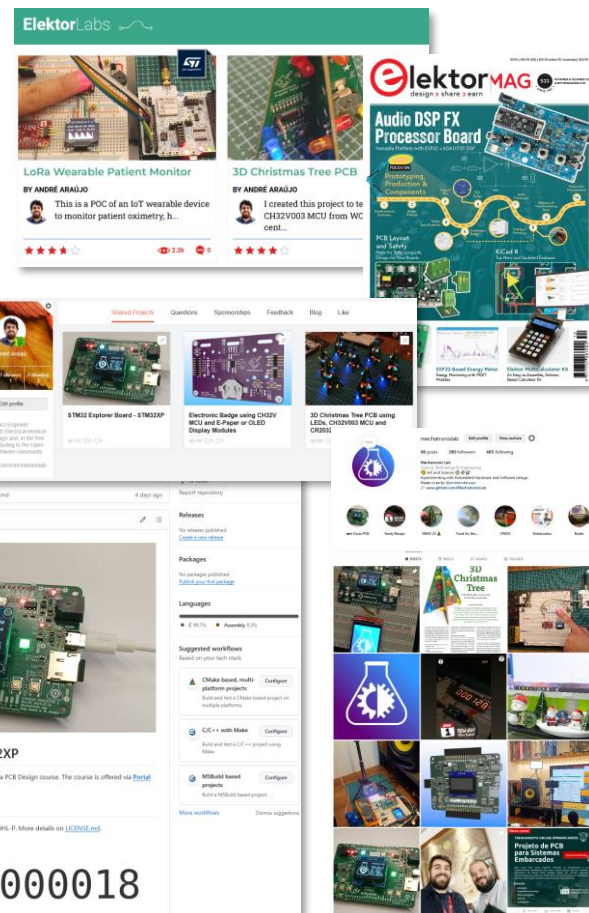
QUEM SOU EU?

- Eng. André. A. M. Araújo
 - Instrutor no Embarcados – [Projeto de PCB para Sistemas Embarcados](#)
 - Mentor na Classpert – [Making Embedded Systems \(Elicia White\)](#)
 - Entusiasta de Sistemas Embarcados e Open Source Hardware

PROJETO DE PCB PARA SISTEMAS EMBARCADOS



O'REILLY® Elicia White

Elektor Labs

LoRa Wearable Patient Monitor
BY ANDRÉ ARAÚJO
This is a POC of an IoT wearable device to monitor patient oximetry, h...

3D Christmas Tree PCB
BY ANDRÉ ARAÚJO
I created this project to test CH32V003 MCU from WC ce...

elektorMAG
design > share > earn

Audio DSP FX Processor Board
Routinely Publishing

LoRa Wearable Patient Monitor
CH32V003 MCU from WC ce...

STM32XP
master · 1 Branch · 0 Tags

unbenutzer@github:STM32XP.m...
DOC
FRAMWARE
HARDWARE
github
LICENSE.md
README.md

STM32 Explorer Board - STM32XP
STM32 Explorer Board - STM32XP

Electronic Badge using CH32V003 MCU and I2C-based OLED Display Modules

3D Christmas Tree PCB using CH32V003 MCU and CR031

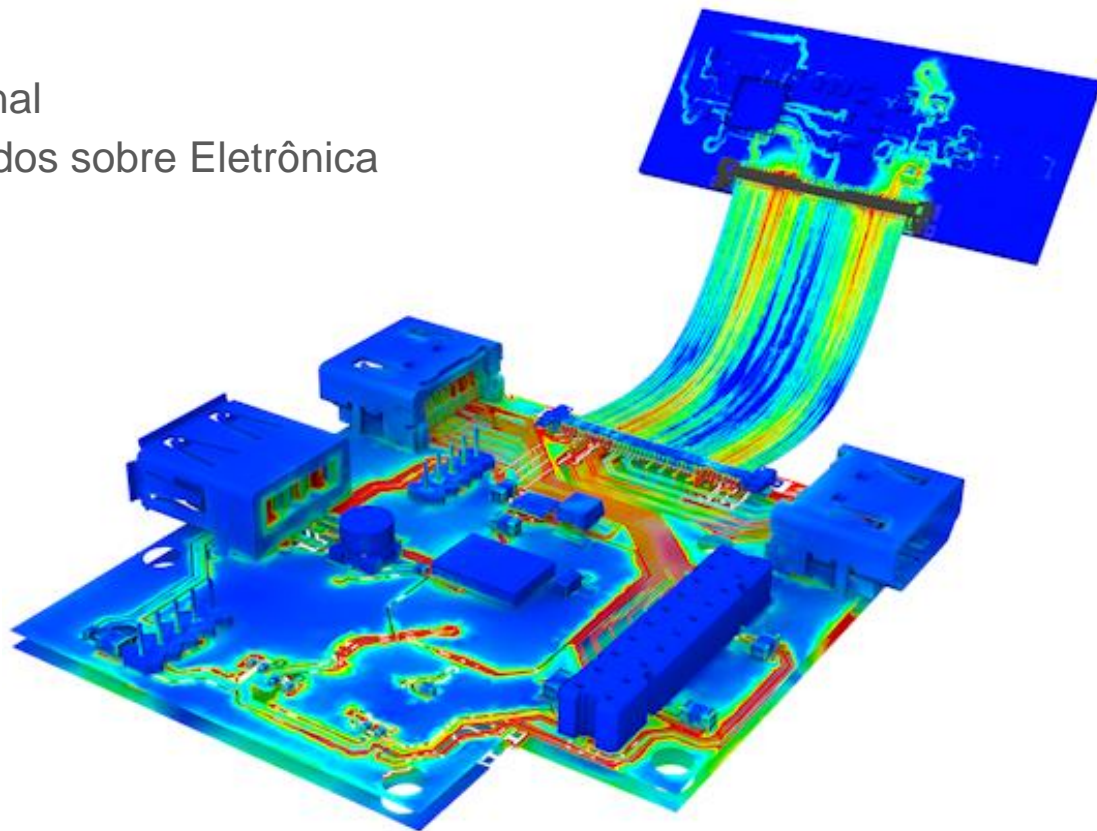
STM32 Explorer Board - STM32XP
This is an educational development board conceived as part of a PCB Design course. The course is offered via [Bristol Robotics Academy](#) website ([Course Page](#)).

License and certification
This is an open source hardware project licensed under CERN-OHL-P. More details on [LICENSE.md](#)

OSHW | BR000018

Conteúdo

- Definição de Integridade de Sinal
- Quebra de conceitos equivocados sobre Eletrônica
- Fluxo de energia num circuito
- Linhas de transmissão
- Correntes de retorno
- Impedância característica
- Impedância controlada
- Stitching vias
- Cross talk
- Pares diferenciais
- Terminação
- Boas práticas para SI em PCB



Integridade de Sinal (Signal Integrity – SI)

- Definição:
 - Capacidade de um sinal de manter sua qualidade enquanto trafega por um circuito
- O que ocorre quando a integridade se degrada:
 - Alteração da forma de onda (atenuação, reflexões, ruído e interferência)
 - Alteração da temporização (jitter, skew)
 - Corrupção/Perda de informação
 - Distorção/Perda de sinal



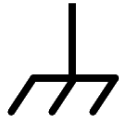
Quebra e conceitos equivocados

- GND – Ground/Terra**

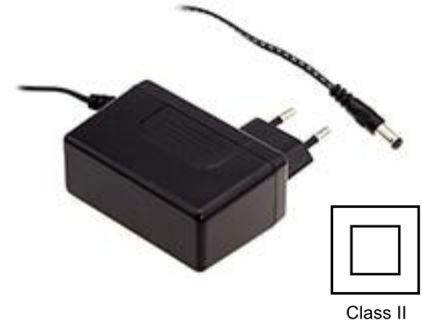
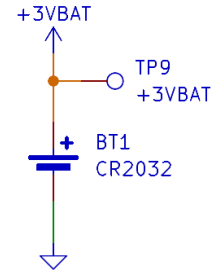
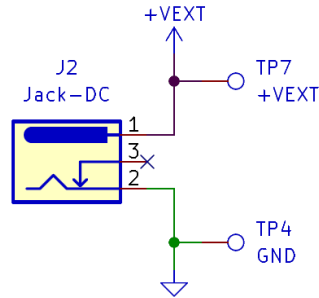
Earth Ground



Chassis Ground



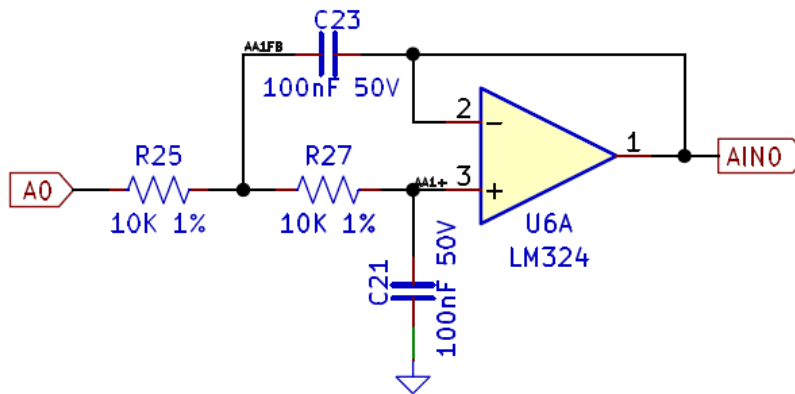
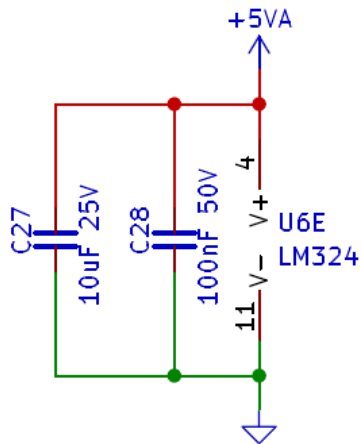
Signal Ground



- Muitas vezes, sistemas embarcados não são aterrados!
 - Ex: Automotiva, Aeroespacial, Fonte Classe II
- Nomenclatura melhor seria “0V”, “Referência” ou “Retorno” (em geral, o terminal negativo da fonte ou bateria)
- Acabamos usando GND pois é o termo mais utilizado

Quebra e conceitos equivocados

- **GND é um poço sem retorno**
- **Corrente não vai para GND e desaparece, a corrente sempre volta para a fonte (retorno)!**

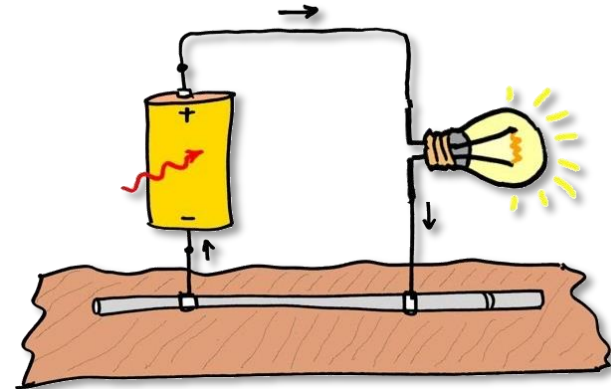
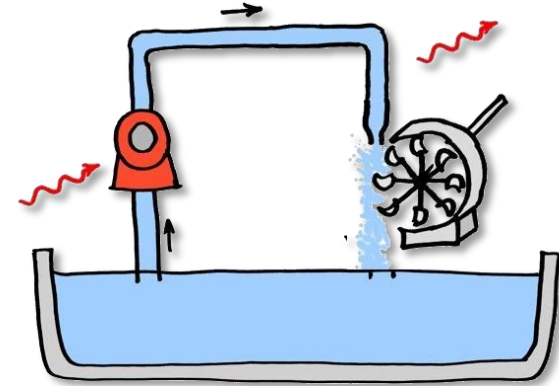


Quebra e conceitos equivocados

- GND / Terra é sempre igual a 0V
- Em PCBs, impedância das trilhas de GND não é zero!
- Para haver passagem de corrente, há diferença de potencial
 - Lei de Ohm: $V = R.I$; $V = Z.I$
- Em DC, GND é aproximadamente 0V
- Em AC, devido à impedância, há diferenças de potencial ainda maiores
- Mesmo no Terra (Planeta – Earth Ground), pode haver diferenças de potencial entre diferentes locais!

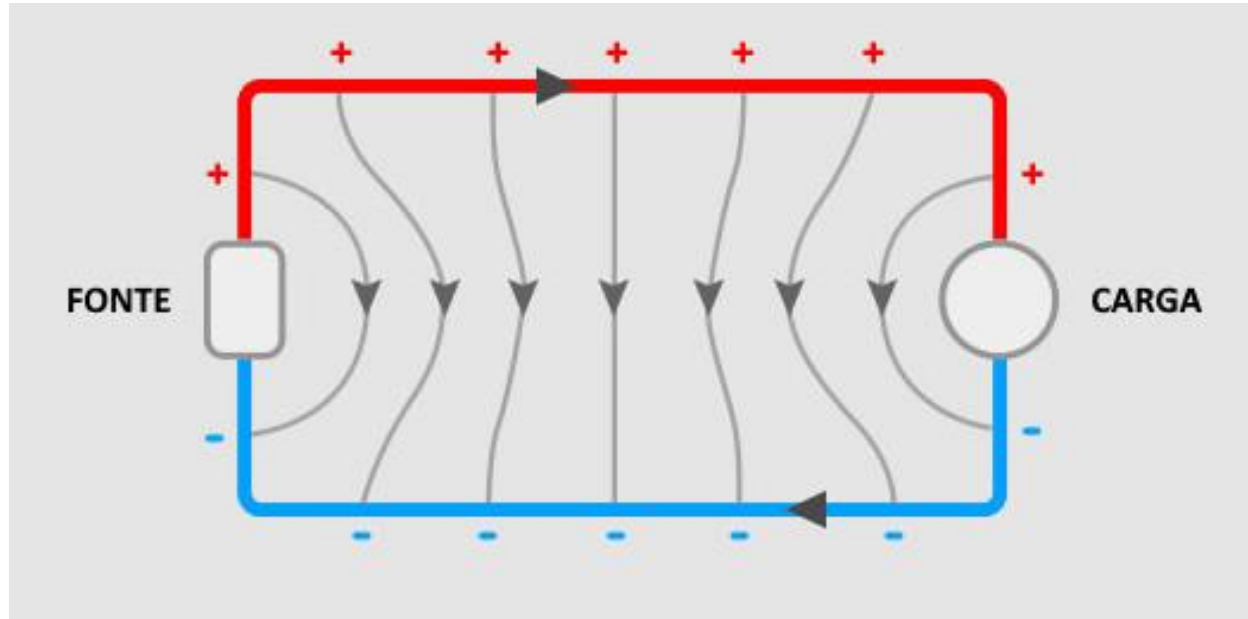
Quebra e conceitos equivocados

- **Analogia da água**
 - No circuito hidráulico, energia está no fluido em movimento
 - No circuito elétrico, **energia está nos campos eletromagnéticos!** Estes, por sua vez, são definidos pelo espaço entre os circuitos
 - Se a analogia fosse correta, **como funcionariam os circuitos de RF?**



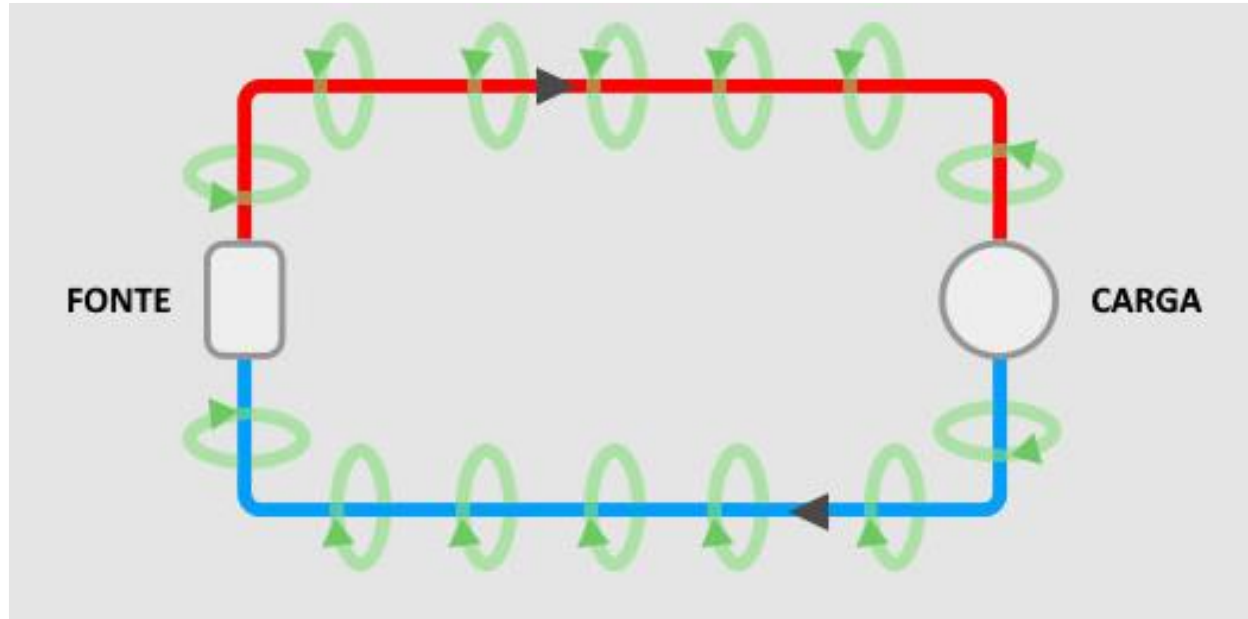
Fluxo de energia num circuito

- Campo Elétrico E :



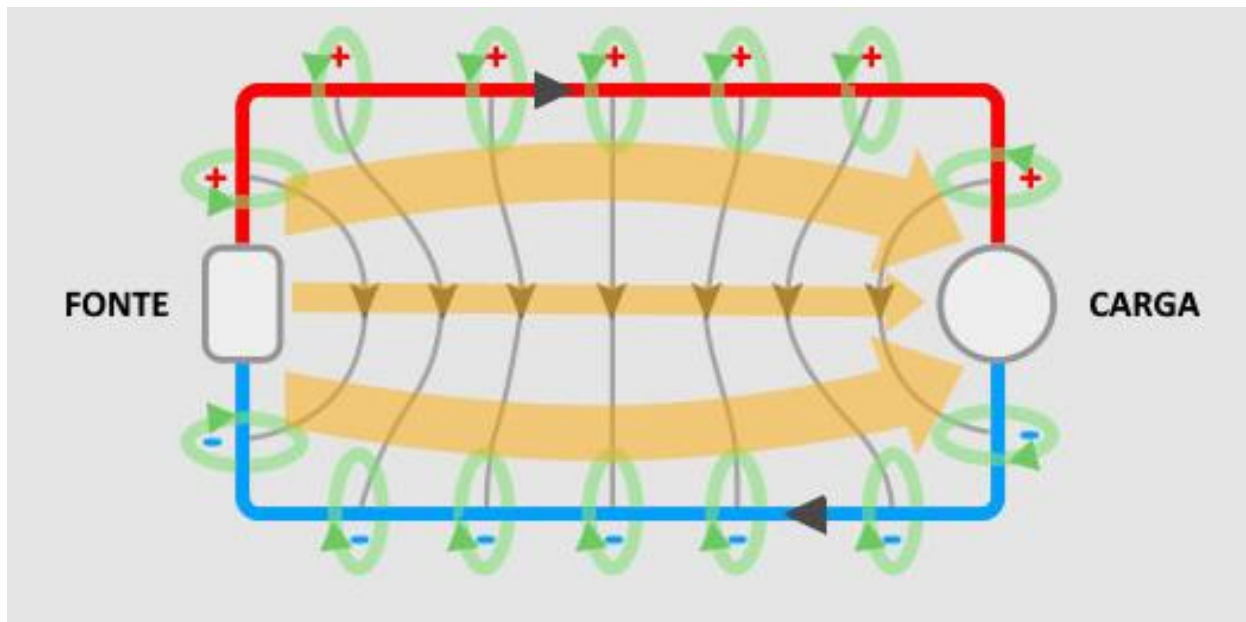
Fluxo de energia num circuito

- Campo Magnético **H**:



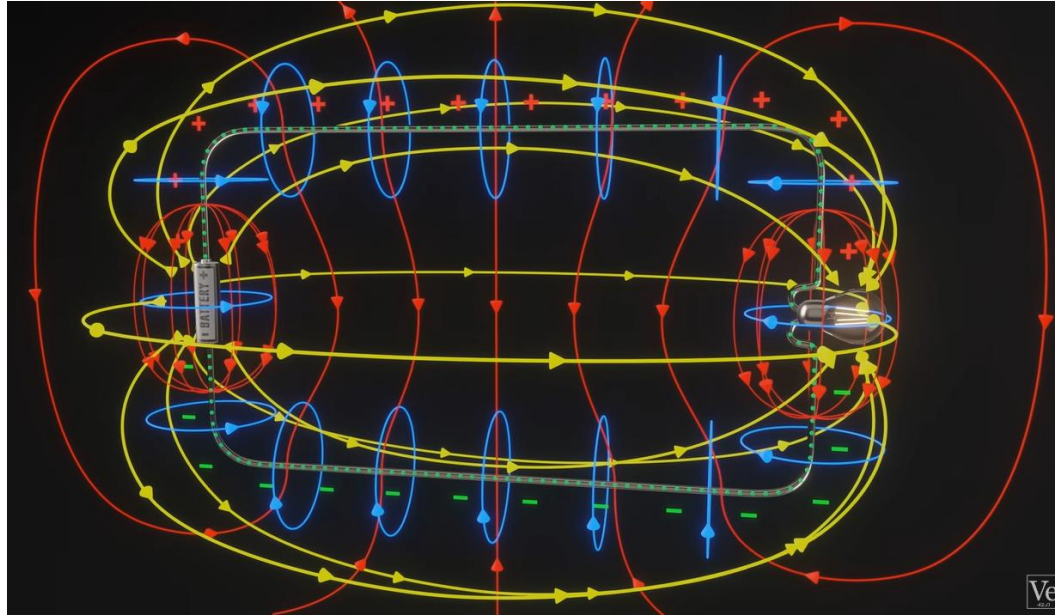
Fluxo de energia num circuito

- Fluxo de energia – Vetor de Poynting ($\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$):



Fluxo de energia num circuito

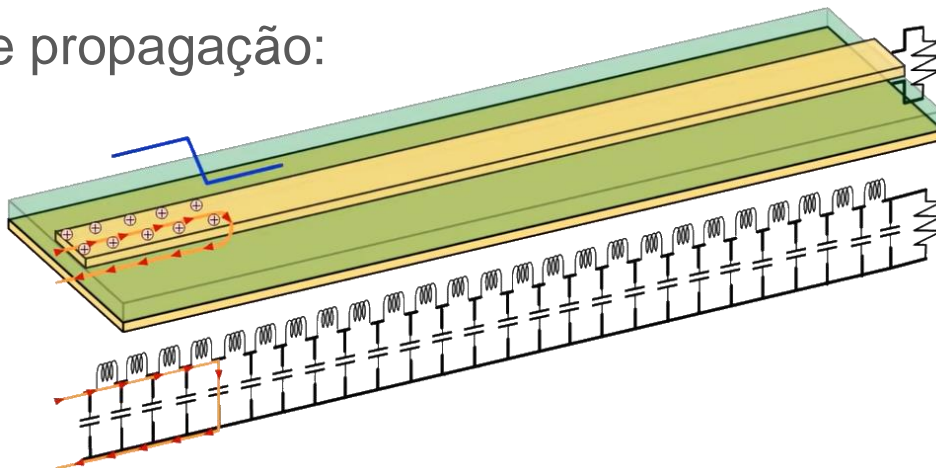
- Fluxo de energia – Vetor de Poynting ($\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$):



Quebra e conceitos equivocados

- Corrente circula como um carro numa pista de corrida, indo por um caminho e **depois** voltando pelo retorno
- Energia flui entre a fonte e a carga pela propagação das ondas EM, **simultaneamente no caminho de ida e no retorno!**
- Velocidade de propagação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$



Quebra e conceitos equivocados

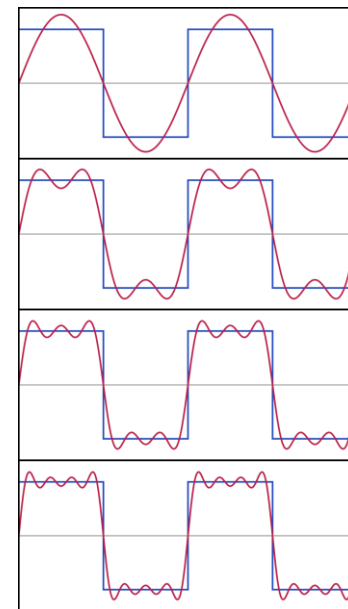
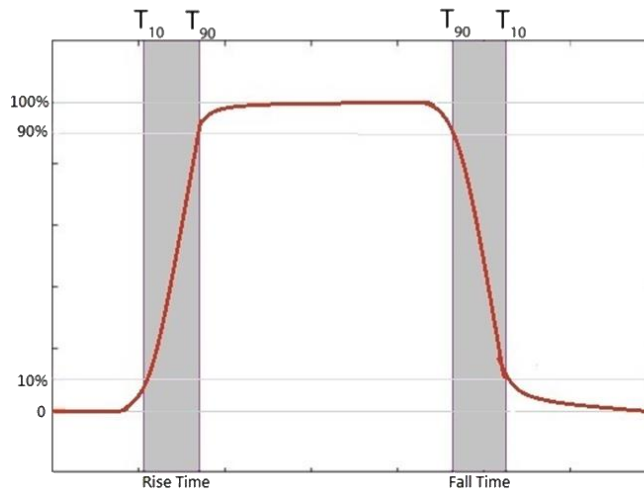
- **Frequência do clock** mais rápido é maior componente de EMI
- Sinais digitais são aproximadamente quadrados, e contem harmônicas mais altas que a fundamental!
- **Tempo de subida/descida são o fator crítico!**

$$t_r = T_{90} - T_{10}$$

$$t_f = T_{10} - T_{90}$$

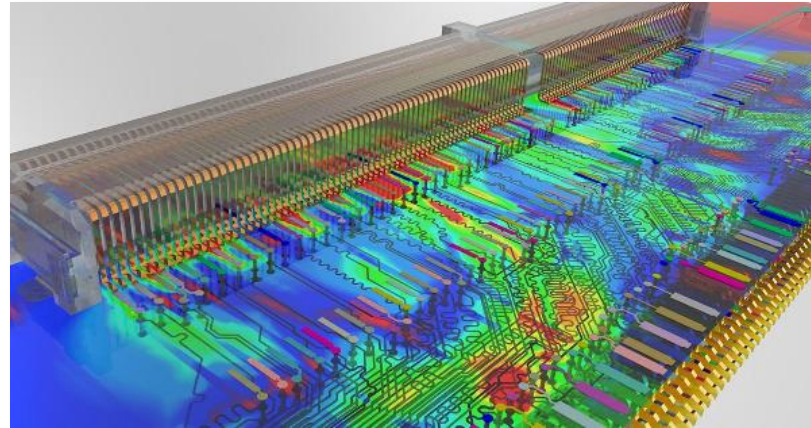
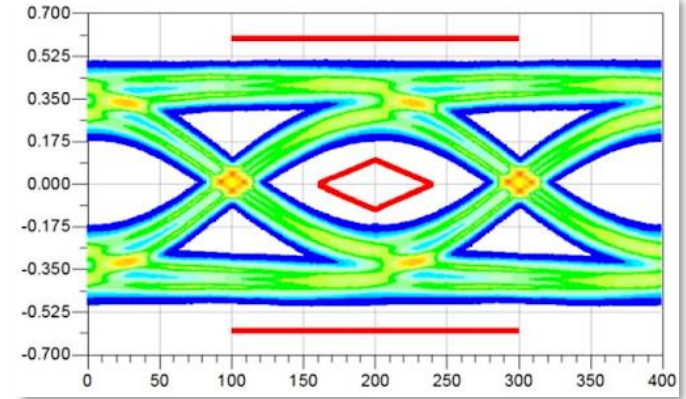
- Conteúdo de frequência:

$$BW \approx \frac{0.5}{t_r}$$



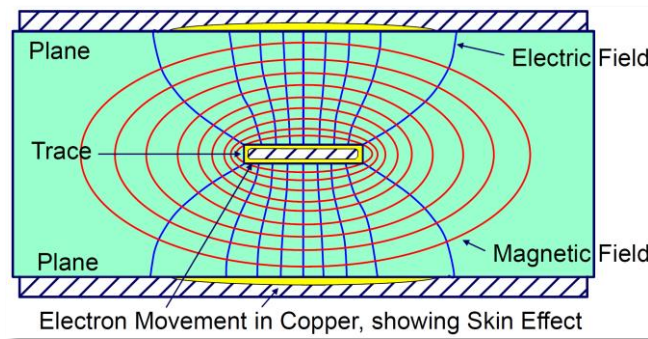
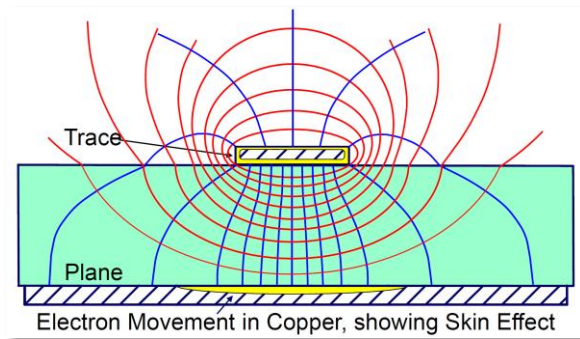
Outros conceitos importantes

- Linhas de transmissão
- Correntes de retorno
- Impedância característica (Z_0)
- Impedância controlada
- Stitching vias
- Cross talk
- Pares diferenciais
- Terminação



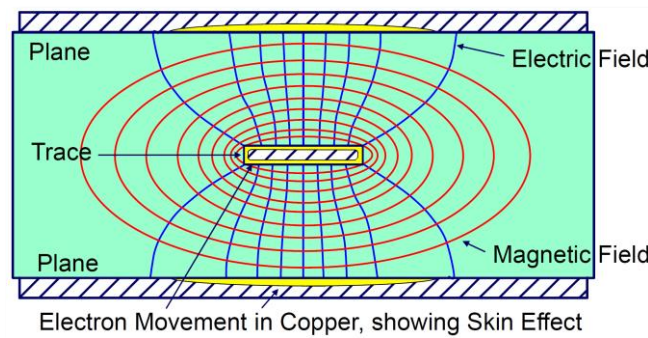
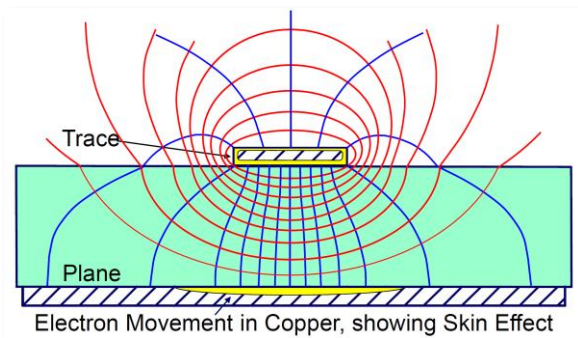
Linhas de transmissão

- Par de condutores: caminho de ida (***forward path***) e caminho de retorno (***return path***) para corrente elétrica
- Condutores definem região por onde campos eletromagnéticos se propagam



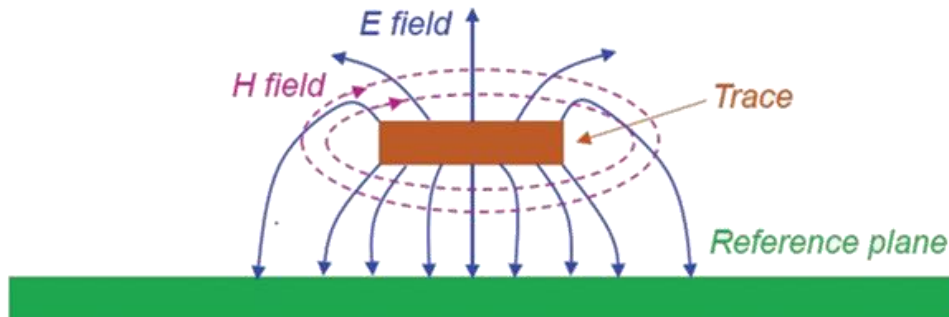
Linhas de transmissão

- É imprescindível **projetar as trilhas de ida e volta** adequadamente, senão a energia irá buscar o caminho de menor impedância
- Dispersão indesejada de campos pode causar EMI
- **Solução:** usar planos de referência sólidos nas camadas vizinha

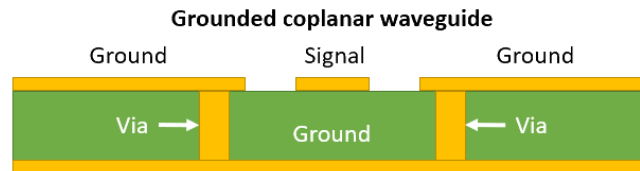
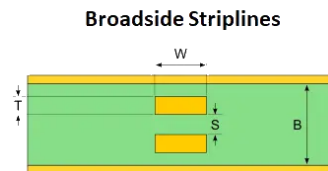
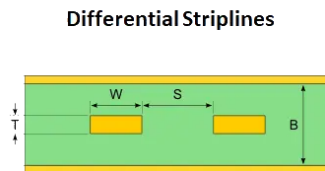
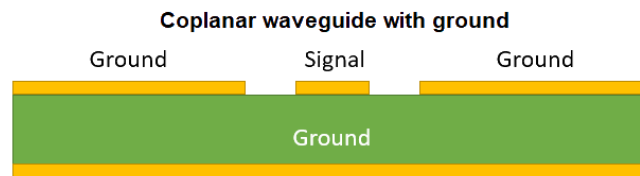
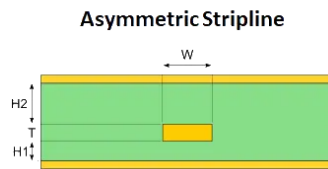
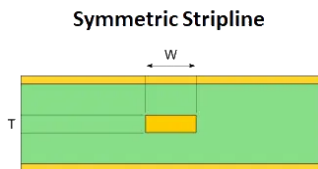
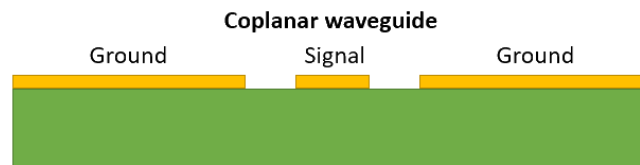
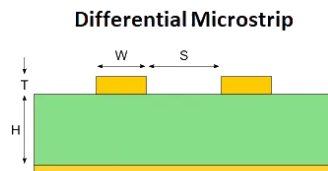
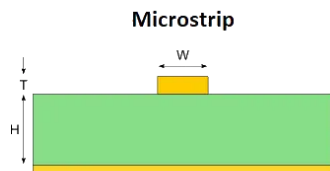


Linhas de transmissão em PCB

- Fatores que influenciam a linha de transmissão:
 - Estrutura
 - Microstrip
 - Stripline
 - Guia de onda coplanar (Coplanar Waveguide – CPW)
 - Geometria
 - Material dielétrico

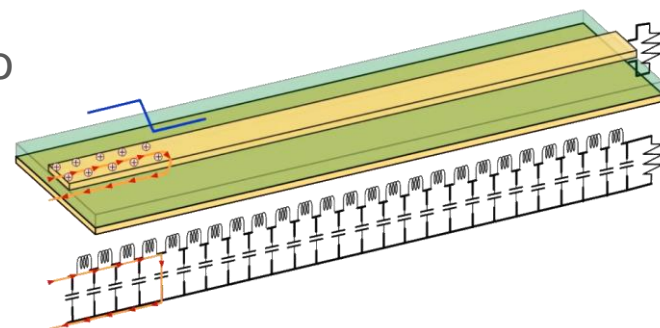


Linhas de transmissão em PCB



Linhas de transmissão em PCB

- Comprimento crítico (***critical length***)
 - Quando o tempo de subida/descida é muito mais rápido que a velocidade de propagação dos campos (entre fonte e carga)
 - Regra prática: $l_c \approx \frac{\lambda}{10}$
 - Na realidade, é mais complexo
 - **Ideia:** sempre tratar trilhas de como linhas de transmissão e controlar a impedância



Fontes: <https://baltic-lab.com/2023/08/critical-length-of-a-pcb-trace-and-when-to-treat-it-as-a-transmission-line/>
Zach Peterson: <https://resources.altium.com/p/why-there-transmission-line-critical-length>

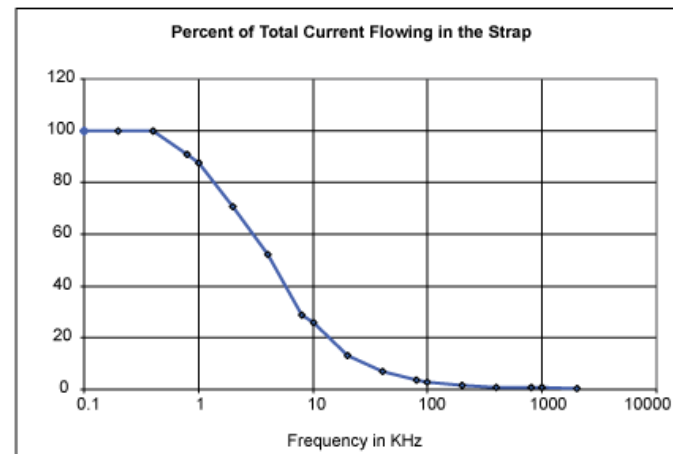
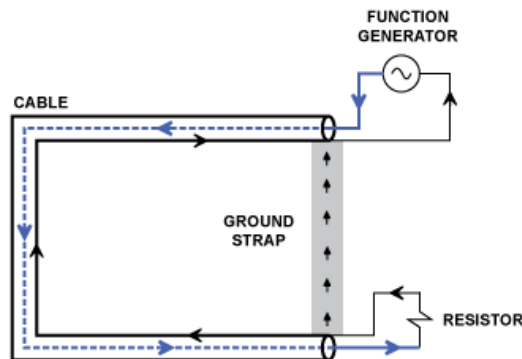
Corrente de retorno

- Corrente busca caminho de menor **impedância**
- Em baixa frequência, caminho é o de menor resistência
- **Em alta frequência, retorno segue próximo da trilha de ida**

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$$

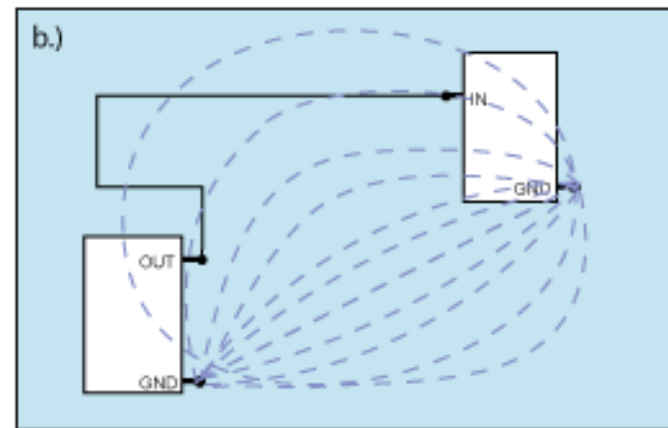
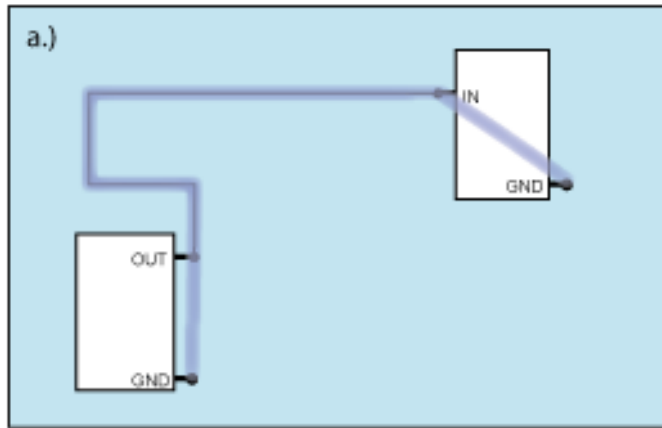
$$L = \frac{\iint_S B \cdot dS}{I}$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$



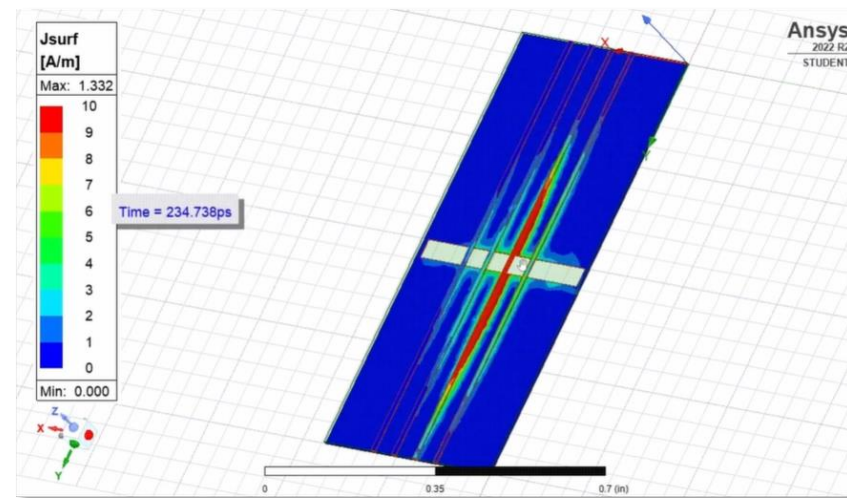
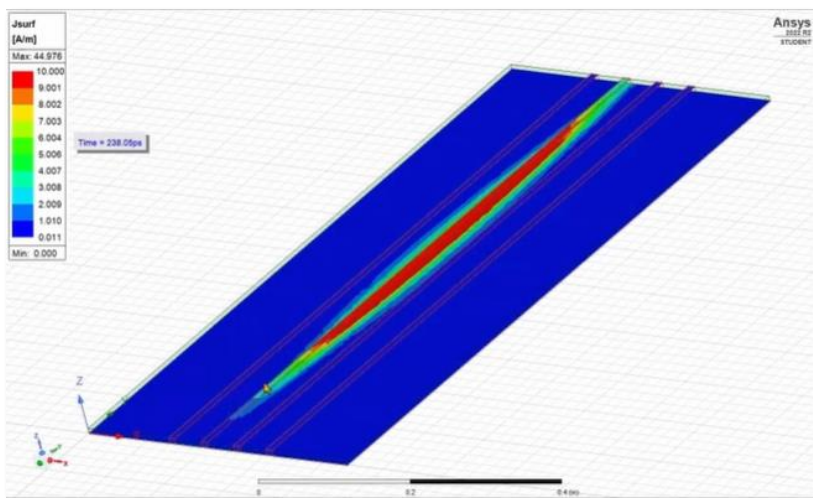
Corrente de retorno

- Corrente busca caminho de menor **impedância**
 - a.) Alta frequência (> 100 kHz)
 - b.) Baixa frequência (< 10 kHz)

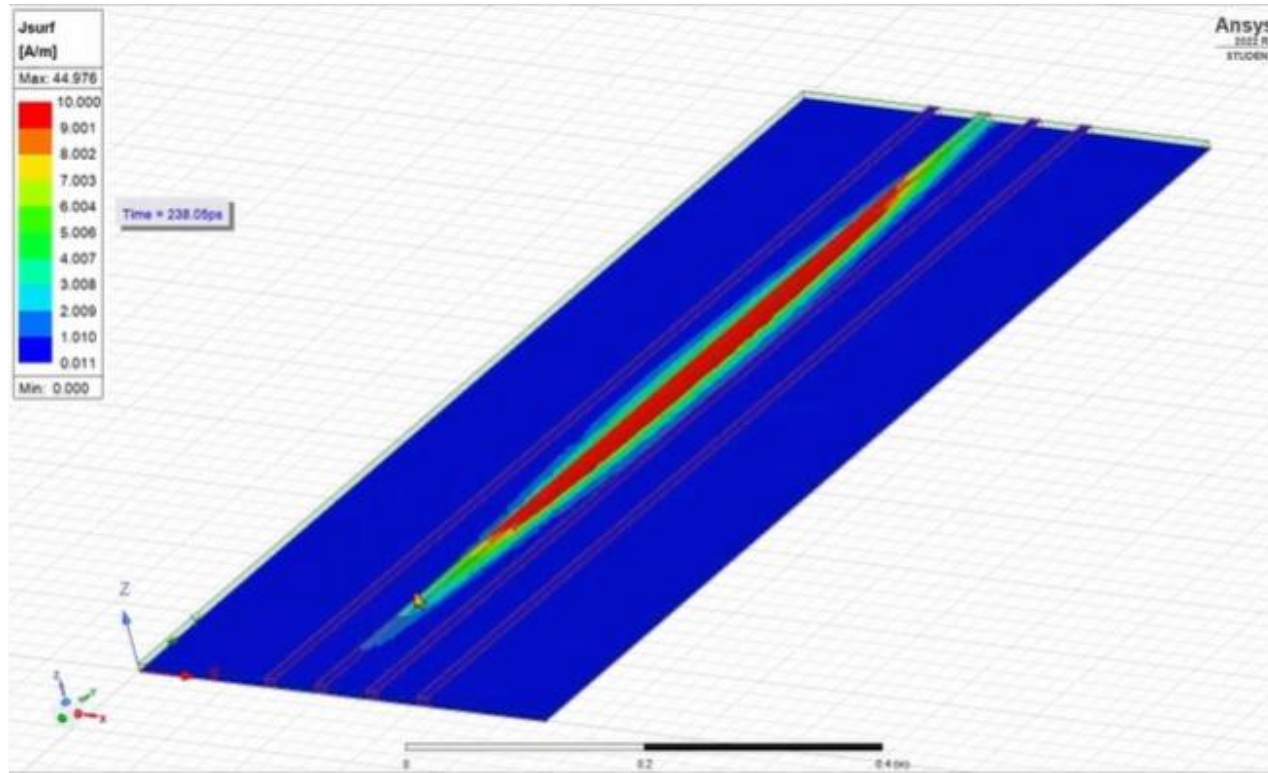


Corrente de retorno

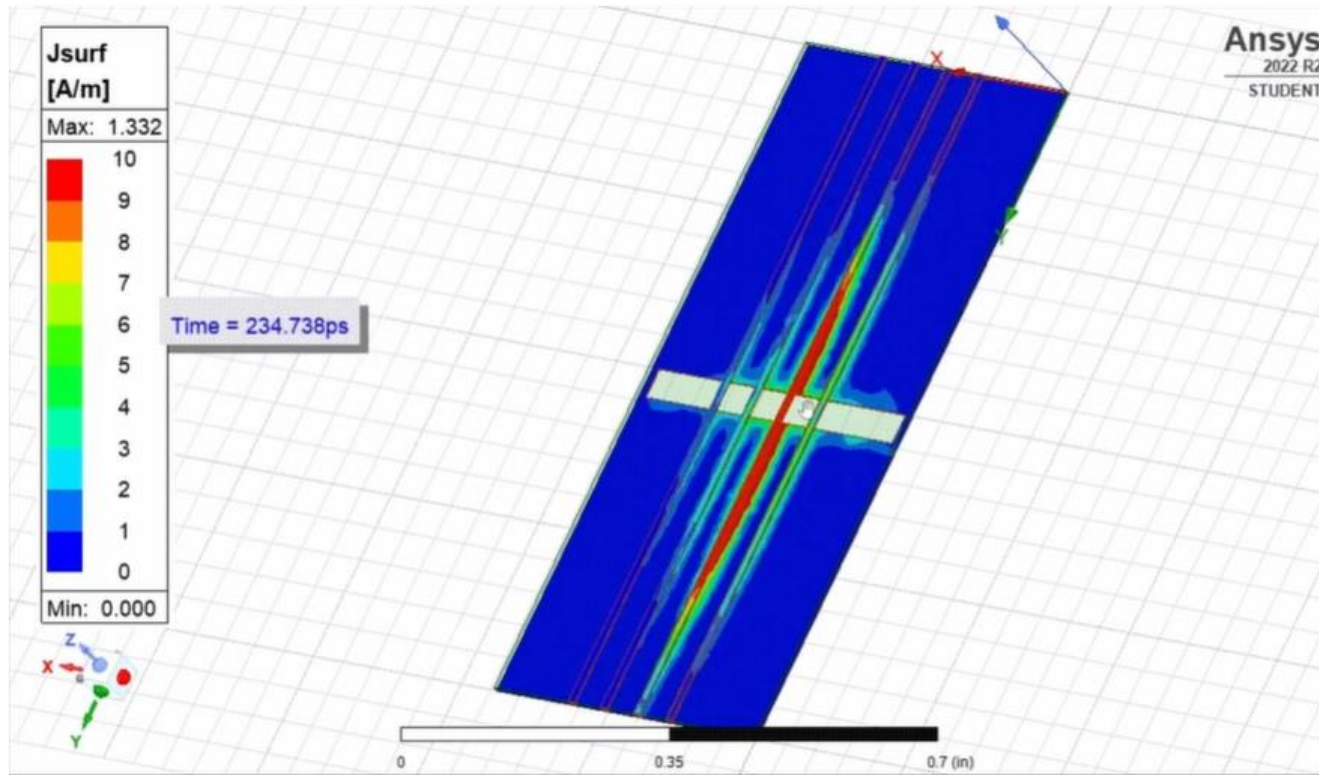
- Em PCB multicamada, maior parte do retorno é abaixo da trilha
- Se houver interrupções no plano de retorno, a corrente irá se dispersar e isso gera EMI



Corrente de retorno

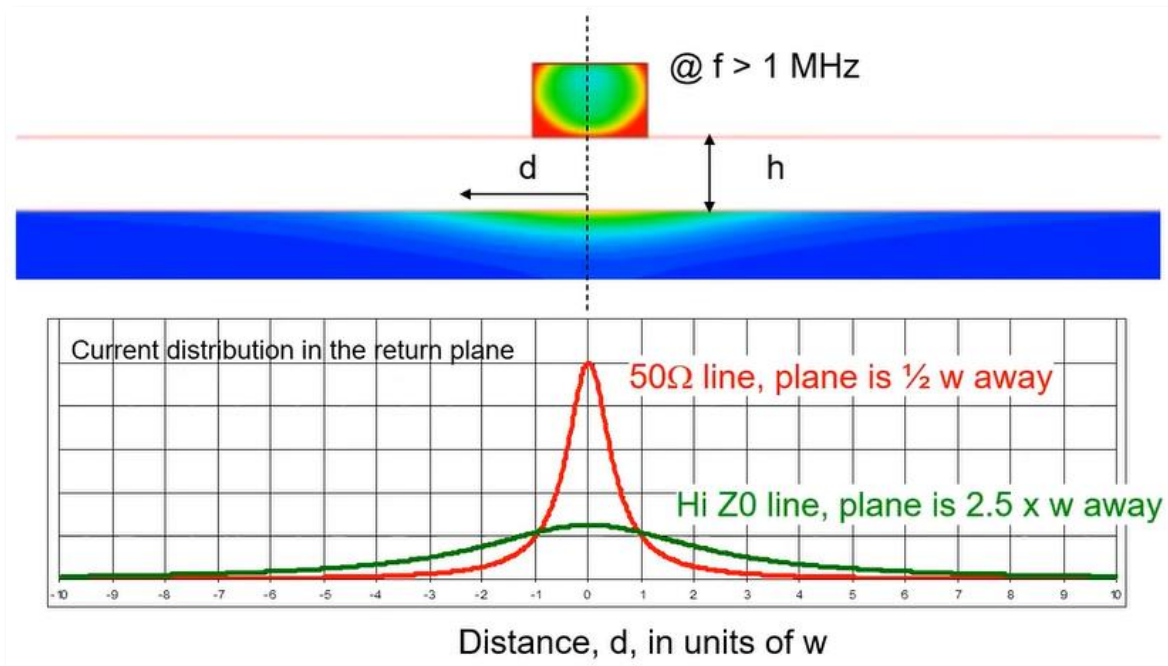


Corrente de retorno



Corrente de retorno

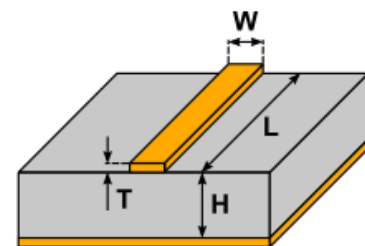
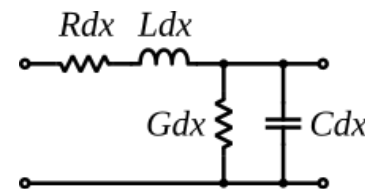
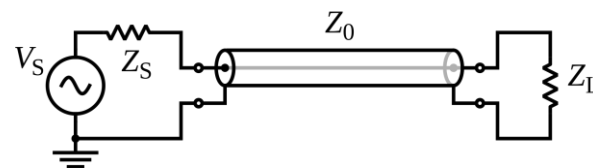
- Distribuição da corrente de retorno num plano vizinho



Impedância característica (Z_0)

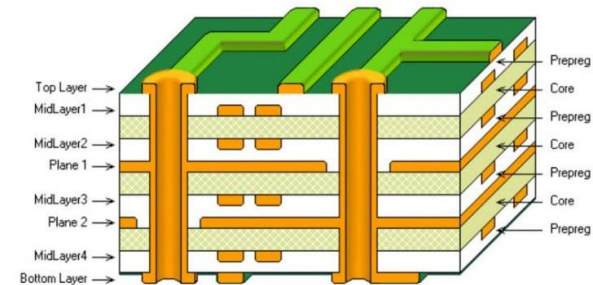
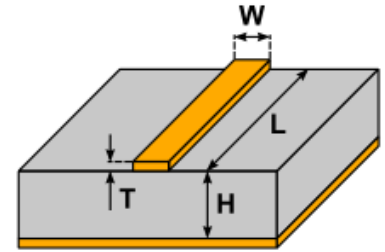
- Relação entre tensão e corrente que circula por uma linha de transmissão
- Na PCB, depende da geometria e materiais
- Z_0 deve ser escolhida conforme tipo de comunicação e componentes. Exemplos:
 - RF: 50 Ω single-ended
 - USB: 90 Ω diferencial (45 Ω single-ended)
 - Ethernet: 100 Ω diferencial (50 Ω single-ended)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$



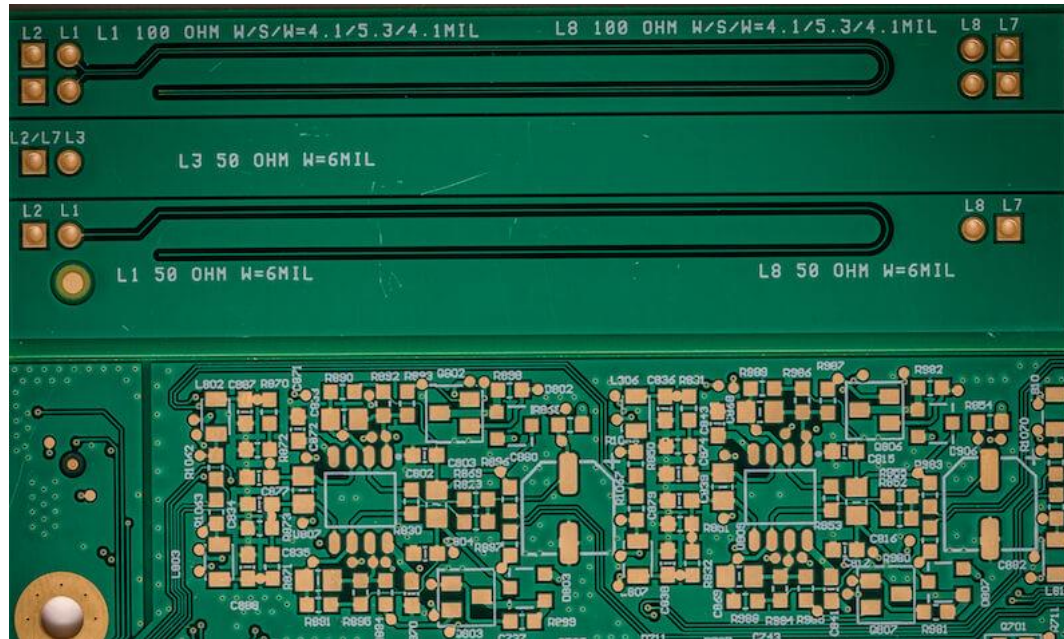
Impedância controlada

- Escolha de geometria e materiais para alcançar determinada impedância característica na PCB
 - Espessura do cobre
 - Largura da trilha
 - Espessura dos isolantes
 - Materiais dos isolantes (ϵ_r , D_k)
 - Informações do fabricante de PCB
- Fabricação e testes para garantir a impedância desejada
 - Cupons de teste



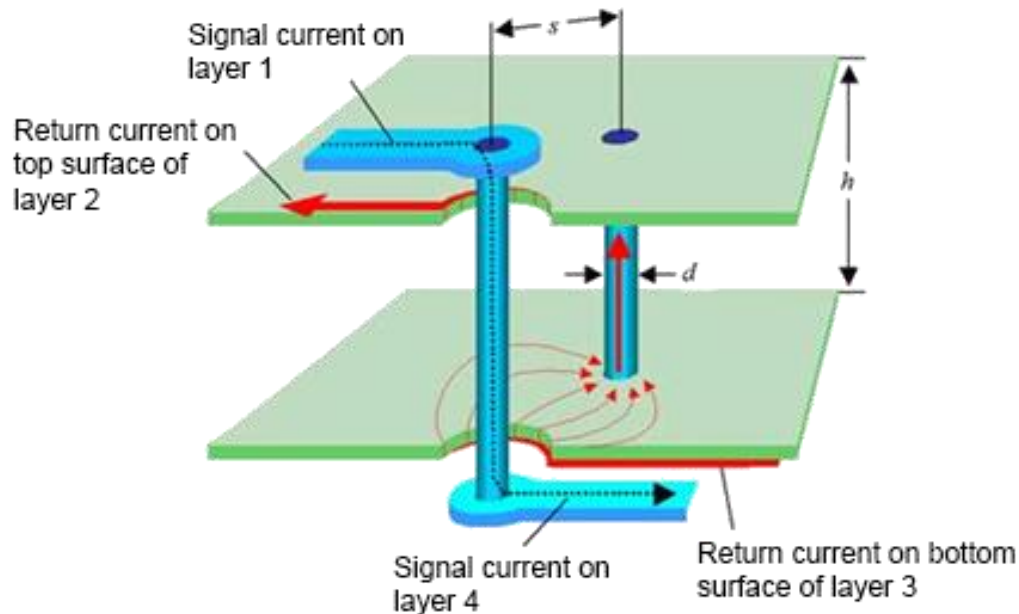
Impedância controlada

- Cupons de teste



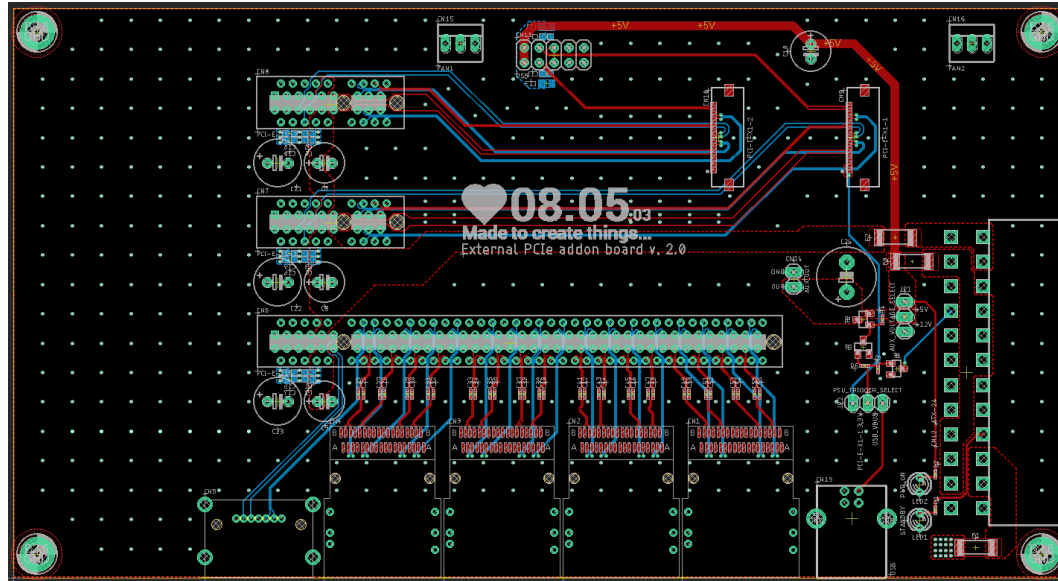
Stitching vias

- Vias conectadas a GND, paralelas a vias em trilhas de sinal
- Permitem a passagem dos campos para manter acoplamento



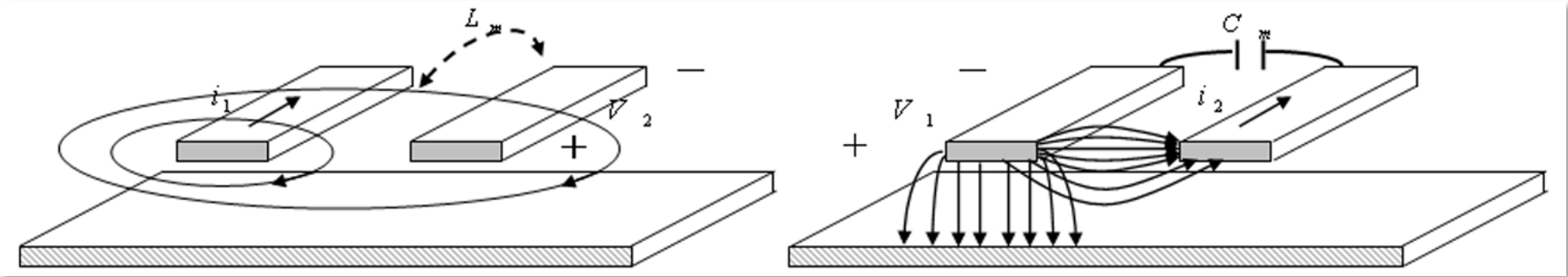
Stitching vias

- Também utilizadas para conectar planos de GND ou Power em diferentes camadas



Cross talk

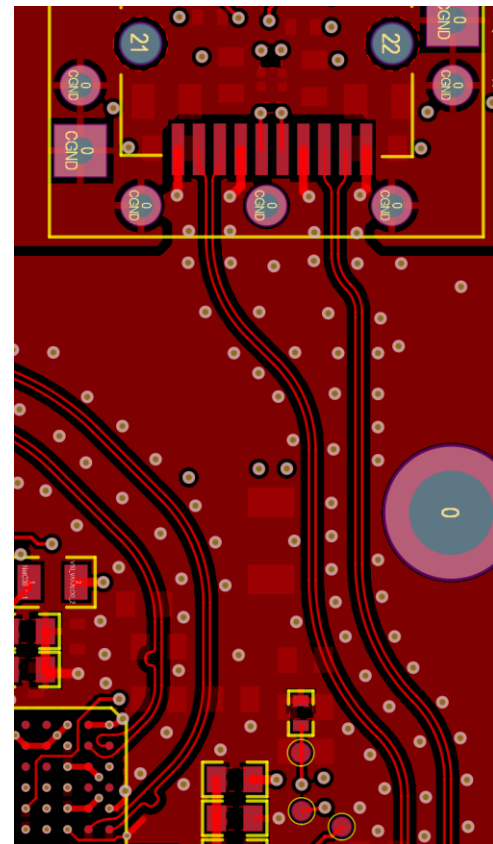
- Acoplamento de energia de uma linha a outra, por meio de:
 - Indutância mútua (campo magnético)
 - Capacitância mútua (campo elétrico)
- Interferência entre trilhas próximas na PCB



Cross talk

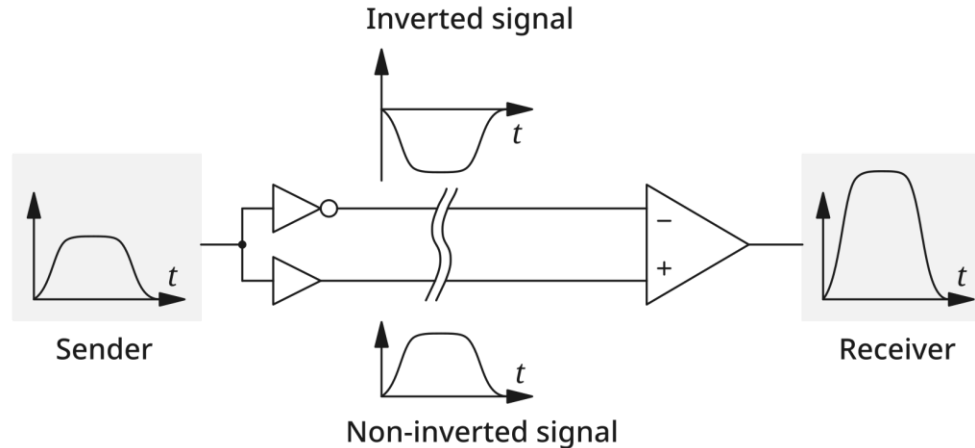
- Utilizar plano de referência
 - Quanto mais próximo (menor h), melhor
- Separar trilhas (razoavelmente)
 - Regra prática : $>3h$
- Utilizar preenchimento de GND entre trilhas
 - Porém, necessário usar stitching vias (**via fencing**)
 - Regra prática: espaçamento entre vias:

$$\lambda/10; f = 0.5/t_r$$



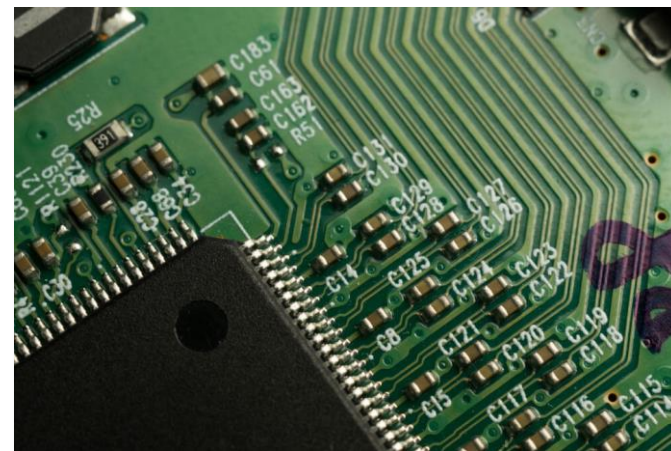
Pares diferenciais

- Trilhas paralelas que levam sinais de polaridade oposta
- Aumentam imunidade a ruído, pois o ruído é aproximadamente igual nas 2 trilhas, e cancelado no receptor
- Exemplos: USB, Ethernet, PCI Express, SATA, DDR

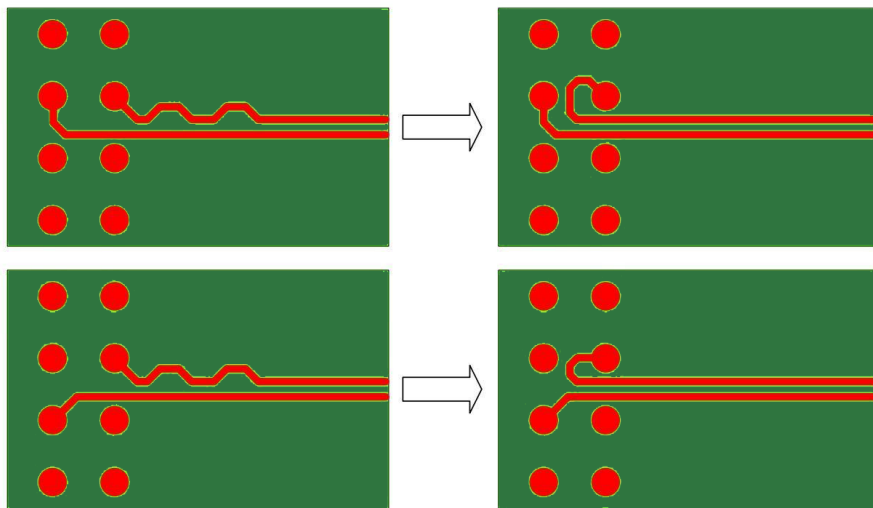


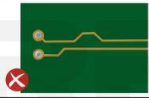
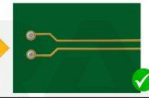
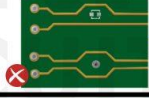
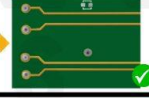
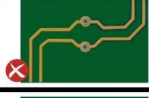
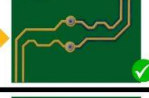






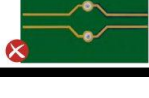
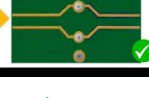
Boas prática no uso de pares diferenciais

- Manter trilhas que garantam o mesmo **tempo** de propagação
 - Se na mesma camada, mesmo comprimento
 - Se em camadas diferentes, velocidade de propagação muda
- Se houver mudança de camadas, utilizar stitching vias
- Manter simetria do par
- Desviar de outros elementos da PCB



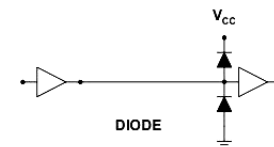
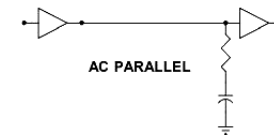
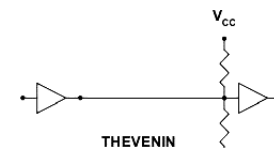
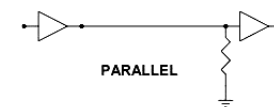
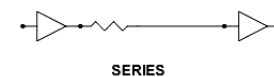
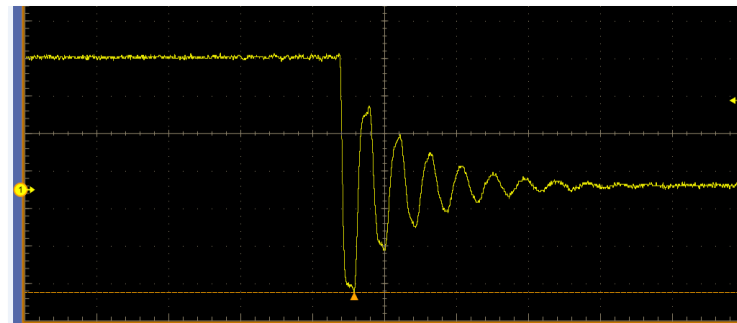
Boas prática no uso de pares diferenciais



SIERRA CIRCUITS		7 PCB Routing Tips to Achieve Controlled Impedance	
S.No	Tips	Layout Dos and Don'ts	
01.	» Route differential pairs symmetrically and keep the signals parallel		
02.	» Avoid placing components and vias between differential lines		
03.	» Add serpentine traces to ensure length matching		
04.	» Do not route high-speed signals over a split plane		
05.	» Incorporate 45° trace bends instead of right-angled bends		
06.	» Maintain symmetry while placing coupling capacitors		
07.	» Place transition vias close to the signal vias		

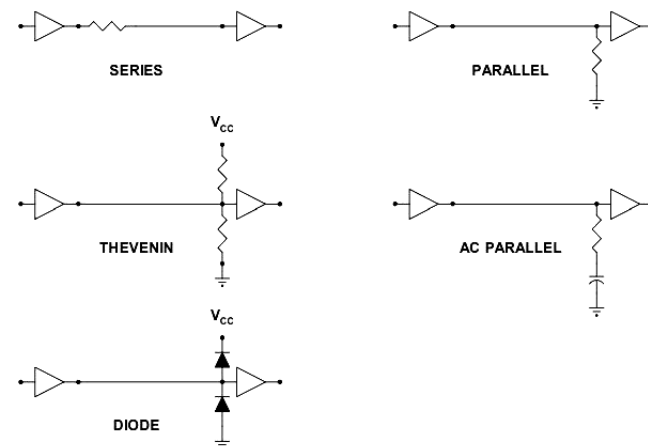
Terminação

- Componentes utilizados para evitar reflexões, overshoot e ringing nas linhas de transmissão
 - Absorvem a energia EM após a onda se propagar do transmissor ao receptor
- Série ou paralelo
 - Série: perto da saída do transmissor (driver)
 - Paralelo: perto da entrada do receptor



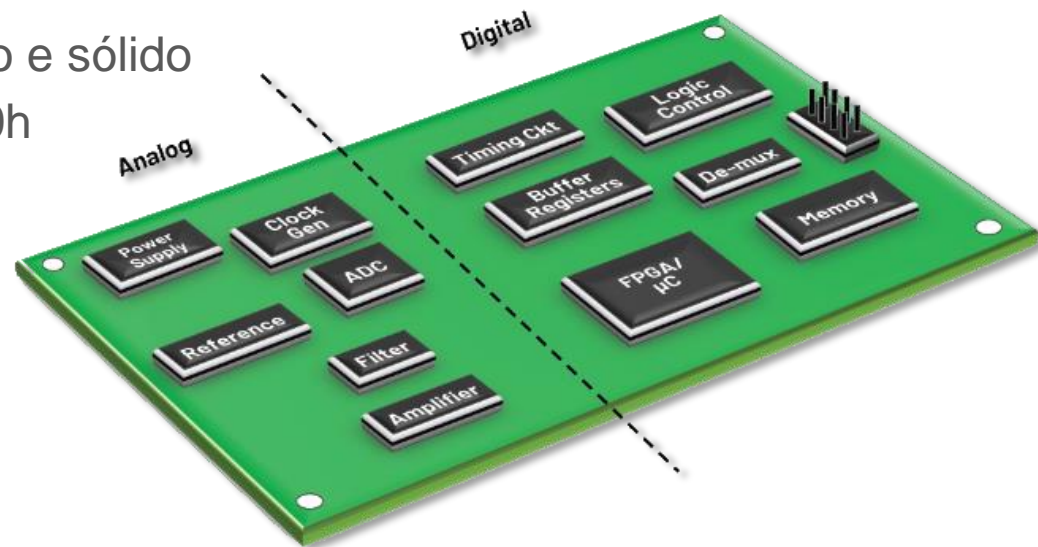
Terminação

- Série
 - Reduz tempo de subida/descida
 - Menor consumo de energia
 - Exemplos: I²C, SPI, UART
- Paralelo
 - Para sinais mais rápidos ou LT longas
 - Maior consumo de energia
 - Exemplos: DDR, PCIe, RS-485, CAN
- Às vezes, terminação está inclusa dentro do CI



Boas práticas para Integridade de Sinal em PCB

- Separação de circuitos
 - Separar por função (digital, analógico, potência, RF, etc.)
 - Separar por fonte de alimentação
 - Separar por velocidade
 - Usar plano de retorno único e sólido
 - Distância recomendada: 20h



Boas práticas para Integridade de Sinal em PCB

- Conectores

- Posicionar nas bordas da placa
 - Conectores de I/O idealmente numa única borda
 - Separar conectores para sinais rápidos dos conectores para sinais lentos
- CIs de interface devem estar próximos dos conectores
- Conectores de sinais devem ter linhas de GND e POWER adjacentes:



Ruim



Bom



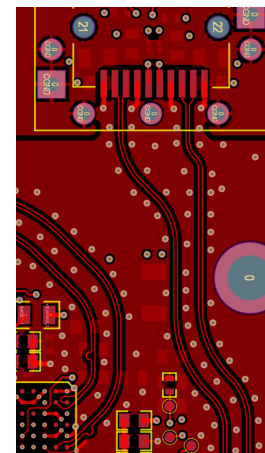
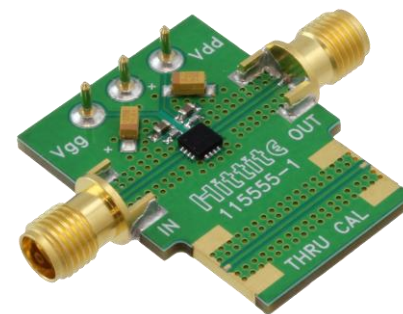
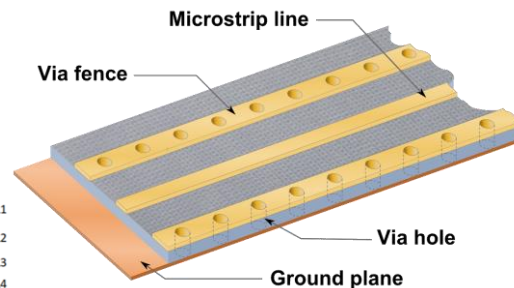
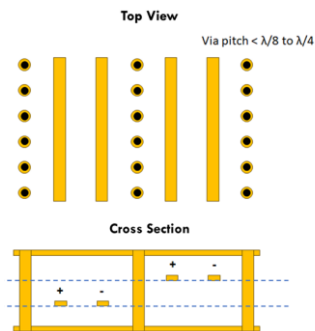
Melhor



Ótimo

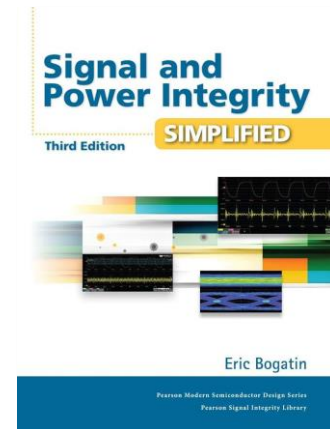
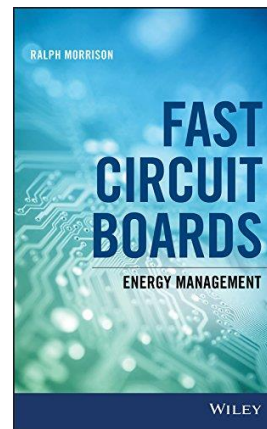
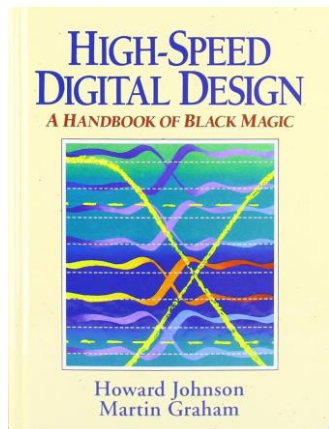
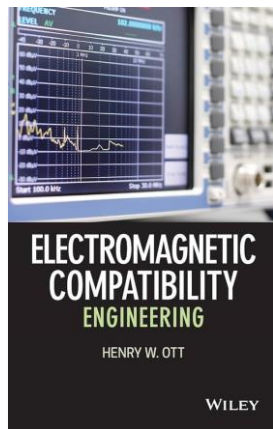
Boas práticas para Integridade de Sinal em PCB

- Via fencing
 - Caso particular do uso de stitching vias, para blindagem
 - Usado nas bordas da PCB ou em volta de sinais ou circuitos sensíveis
 - Osciladores e Clocks
 - Sinais de RF
 - Grounded Coplanar Waveguide (GCPW)



Referências

- Electromagnetic Compatibility Engineering (Ott)
- High-Speed Digital Design – A Handbook of Black Magic (Johnson, Graham)
- Fast Circuit Boards – Energy Management (Morrison)
- Signal and Power Integrity – Simplified (Bogatin)

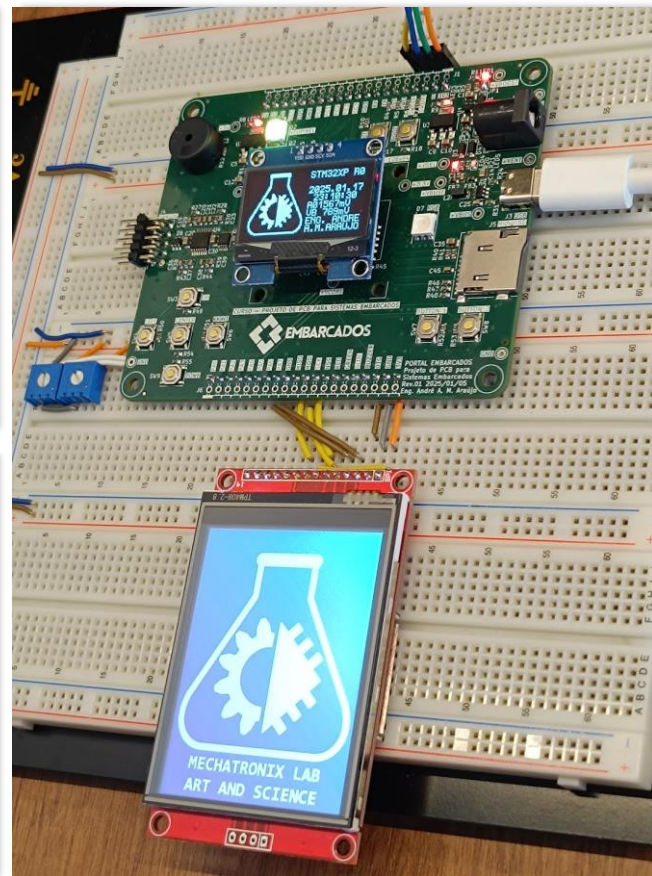
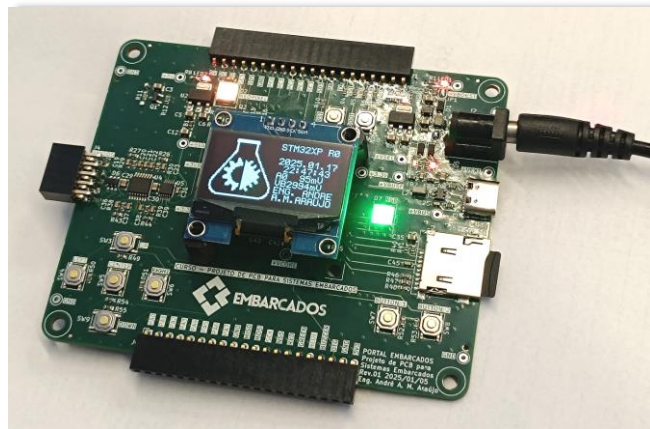


Referências

- Veritasium – The Big Misconception About Electricity
<https://www.youtube.com/watch?v=bHlhgxav9LY>
- Veritasium – How Electricity Actually Works
https://www.youtube.com/watch?v=ol_X2cMHNe0
- Rick Hartley – What your Differential Pairs Wish You Knew – AltiumLive
<https://www.youtube.com/watch?v=ySuUZEjARPY>
- Robert Feranec & Eric Bogatin – What Every PCB Designer Should Know - Return Current Path
<https://www.youtube.com/watch?v=icRzEZF3eZo>
- Robert Feranec & Rick Hartley – Ground in PCB Layout - Separate or Not Separate?
<https://www.youtube.com/watch?v=vALt6Sd9vIY>
- Rick Hartley – Power Distribution Tips To Control SI, EMI and Noise
<https://youtu.be/icAZlvpiJCo?si=bZLv732EcIEH-KaG&t=474>

Curso: <https://cursos.embarcados.com.br/cursos/projeto-de-pcb-para-sistemas-embarcados/>

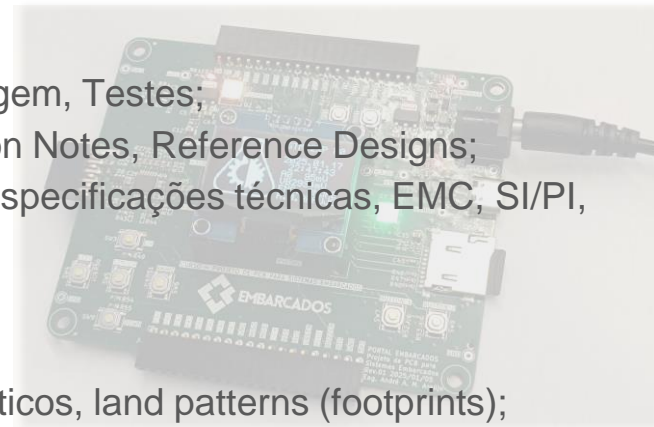
PROJETO DE PCB PARA SISTEMAS EMBARCADOS



Curso: <https://cursos.embarcados.com.br/cursos/projeto-de-pcb-para-sistemas-embarcados/>

- **PCB:** Elementos básicos, etapas de Projeto, Fabricação, Montagem, Testes;
- **Materiais de referência:** Livros, Normas, Datasheets, Application Notes, Reference Designs;
- Fundamentos de sistemas embarcados, Diagramas de blocos, Especificações técnicas, EMC, SI/PI, DFM;
- Simulações, protótipos, jigas de teste;
- **Software:** KiCad, STM32Cube;
- **Bibliotecas de componentes:** organização, símbolos esquemáticos, land patterns (footprints);
- **Esquemático:** Elaboração, detalhamento, verificação;
- **Layout:** Stackup, posicionamento, roteamento, verificação;
- **Fabricação:** Preparação de arquivos de fabricação, orçamento, fabricação, gravação de firmware e testes funcionais;
- **Homologação e certificação.**

**PROJETO DE PCB PARA
SISTEMAS EMBARCADOS**



Contato

- Eng. André A. M. Araújo
 - [linkedin.com/in/andremdaraujo/](https://www.linkedin.com/in/andremdaraujo/)
 - github.com/andremdaraujo
 - github.com/MechatronicsLab
 - [instagram.com/MechatronicsLab](https://www.instagram.com/MechatronicsLab)



OBRIGADO!



Patrocinado por



www.embarcados.com.br



linkedin.com/embarcados



[@portalembarcados](https://instagram.com/portalembarcados)



[youtube/Embarcados TV](https://youtube.com/EmbarcadosTV)