

ANÁLISES DE TÉCNICAS DE ROTEAMENTO DE PLACAS ELETRÔNICAS COM FOCO EM MELHORIAS DA DISSIPAÇÃO DE CALOR DECORENTE DE CORRENTES ELÉTRICAS EM TRILHAS

ANALYSIS OF PCB ROUTING TECHNIQUES FOCUSED ON IMPROVING HEAT DISSIPATION CAUSED BY ELECTRICAL CURRENTS IN TRACES

Lethycia Sant' Anna Oliveira^{1, i}
Leandro Poloni Dantas^{2, ii}

RESUMO

Este artigo analisa a eficácia dos métodos de design de placas eletrônicas com foco na melhoria da dissipação de calor causado pela passagem de correntes elétricas pelas trilhas de placas de circuito impresso (PCBs, *Printed Circuit Boards*). O estudo considera o projeto de equipamentos médicos/hospitalares em UTIs neonatais, como incubadoras e berço aquecidos. As normas aplicadas a esse tipo de equipamentos, além de exigirem robustez para a aprovação em ensaios de EMC/EMI (Compatibilidade Eletromagnética e Interferência Eletromagnética) e segurança elétrica, também precisam ser projetados para atuarem em ambientes onde sua fixação mecânica compromete o tamanho máximo da área de roteamento. Dessa forma, estratégias para o trilhamento precisam ser adotadas para que correntes elétricas altas possam fluir pelo condutor sem prejudicar a vida útil ou segurança do produto. Como ferramenta auxiliar de projeto, utilizou-se o simulador PDN Analyzer, que permitiu prever a densidade de corrente, e através de cálculos, a temperatura na placa analisada. Seus resultados foram confrontados com ensaios realizados na placa física confeccionada. Os resultados mostram que, as técnicas de roteamento usando polígonos ao invés de trilhas são as mais eficazes quando se trata da passagem de correntes altas. Rotear a face superior (*top*) e inferior (*bottom*) da PCB também se mostraram técnicas benéficas para evitar o aquecimento das trilhas, porém os usos de vias para interligação desses planos mostraram resultados mais sutis, por vezes imperceptíveis. Além destes resultados, comprovou-se a eficácia do uso de simulações em ambientes virtuais para prever e definir as melhores técnicas de roteamento.

Palavras-chave: roteamento, simulação de calor, equipamentos médico/hospitalares

ABSTRACT

This paper analyzes the effectiveness of electronic circuit board design methods focused on improving heat dissipation caused by the flow of electric currents through PCB (Printed Circuit Board) traces. The study considers the design of medical/hospital equipment used in neonatal ICUs, such as incubators and radiant warmers. The standards applicable to these types of equipment not only require robustness to pass EMC/EMI (Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Interference) and electrical safety tests, but also demand mechanical fixation strategies that often

¹ Pós-graduanda em Sistemas Embarcados no Centro Universitário SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: emaildalethycia@gmail.com

² Professor Dr. no Centro Universitário SENAI São Paulo – Campus “Anchieta” e do Insper. E-mail: leandro.poloni@sp.senai.br.

constrain the maximum available routing area. Therefore, specific routing strategies must be adopted to ensure that high currents can flow through the conductors without compromising the product's safety or lifespan. As a design aid, the PDN Analyzer simulator was employed to predict current density and, through calculations, estimate the resulting temperature on the analyzed PCB. These results were then compared with measurements obtained from tests conducted on a fabricated physical board. The findings indicate that routing techniques using polygons instead of standard traces are more effective in handling high current flow. Utilizing both the top and bottom PCB layers for routing also proved beneficial in reducing thermal buildup in traces. However, the use of vias to interconnect these planes showed more subtle — and sometimes negligible — effects. In addition to these findings, the study confirmed the effectiveness of virtual simulation tools in predicting and defining optimal routing techniques.

Keywords: routing, heat simulation, medical/hospital equipment

1 INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso são parte fundamental de qualquer equipamento eletrônico. O avanço da inteligência artificial (IA) e a crescente demanda por sistemas embarcados robustos, criam forte demanda por placas eletrônicas confiáveis e bem projetadas. Na internet, encontram-se muitos tutoriais sobre desenvolvimento, roteamento e boas práticas para o projeto de PCBs. Porém, diante dessa abundância, é comum que técnicas sejam simplesmente copiadas, sem a compreensão dos conceitos fundamentais envolvidos.

Cada decisão tomada durante o *layout* da PCB deve estar baseada em funções definidas, sempre alinhadas com as especificações dos componentes descritas em seus respectivos *datasheets*. O objetivo deve ser sempre otimizar o projeto da placa, respeitando as especificações elétricas, térmicas e mecânicas do sistema. Entretanto, observa-se com frequência a aplicação de múltiplas técnicas sem o entendimento do porquê de suas utilizações, o que deixa uma ilusão de uma placa robusta. Porém, por vezes não sendo uma realidade, resultando no comprometimento do desempenho e da segurança do produto.

Além disso, é importante destacar a diferença entre o hardware desenvolvido em ambientes educacionais (como escolas e universidades) e aquele projetado para aplicações industriais. No contexto profissional, as exigências são significativamente maiores, não apenas no que se refere à robustez das placas, mas também à conformidade com normas técnicas nacionais e internacionais específicas ao setor de aplicação. Entre as áreas mais desafiadoras em relação ao desenvolvimento eletrônico na engenharia destacam-se os setores nucleares, aeroespacial, biomédico, químico e civil (Shikasha Study Abroad, 2025).

Neste artigo, é abordado o desenvolvimento de PCBs voltadas para o ambiente hospitalar neonatal, focado em incubadoras e berços aquecidos para recém-nascidos prematuros. Serão discutidas técnicas de roteamento para condução de corrente elétrica acima de 5 A, simulações eletrotérmicas, e o levantamento das normas regulamentadoras aplicáveis, além das limitações mecânicas impostas pelo ambiente aplicado.

Na área hospitalar, em especial, os requisitos de segurança são rigorosos, demandando formas de proteção elétrica ao paciente (recém-nascido) e operador (médicos e enfermeiros) o que em geral é resolvido nas placas eletrônicas e cabos do equipamento. As proteções são contra risco de choque elétrico em

quaisquer partes acessíveis ao usuário e operador do produto.

Dessa forma, o isolamento elétrico torna-se um fator crítico no projeto, exigindo atenção especial no desenho de layout da PCB. Na área hospitalar, os principais desafios durante o desenvolvimento são: a segurança elétrica do equipamento e a compatibilidade eletromagnética (EMC/EMI). Por vezes estratégias usadas para solucionar uma dessas questões podem impactar na outra. Entre essas questões ainda estão outros pontos importantes como: limitações mecânicas e gerenciamento da energia AC e DC para o acionamento de resistências e outros atuadores.

A pesquisa confronta os dados obtidos por simulações com ensaios práticos, a fim de validar a eficácia das técnicas aplicadas. São analisados os tipos de roteamento em cada etapa do desenvolvimento do *layout* da PCB até a versão final fabricada, onde os testes práticos foram conduzidos, medindo a temperatura nos pontos de maiores densidades de corrente identificados durante as simulações.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa é baseada em uma placa eletrônica aplicada em um berço aquecido de uso em UTI neonatal. Seu papel é gerenciar a energia proveniente de uma fonte de 13,8 VDC para o uso estacionário do produto, e da bateria de 12 V para manter o equipamento em funcionamento durante o transporte intra-hospitalar. Além disso, faz o chaveamento do tipo de alimentação DC do produto, controla a carga da bateria e alimenta a IHM do berço aquecido.

Por possuir tamanha importância é essencial que esta placa seja robusta para suportar a passagem de corrente durante toda sua vida útil, portanto seu roteamento deve ser feito de forma assertiva para o propósito da PCB, e por isso foi escolhida para a validação dos questionamentos deste artigo.

O método utilizado foi analisar cada etapa do desenvolvimento do roteamento da PCB usando a simulação do software Altium Design (Altium.com, 2025) para a distribuição de energia na placa. Verificando a densidade de corrente e vários pontos da PCB. Após isso, com a placa fabricada e em bancada foram medidos os mesmos pontos para verificar a temperatura atingida durante seu funcionamento com carga, desta forma sendo possível confrontar os valores de aquecimento simulado e real.

Nesta PCB são conectados os seguintes itens:

- Bateria de 12 V;
- Fonte de alimentação;
- Chicote de saída da alimentação do equipamento.

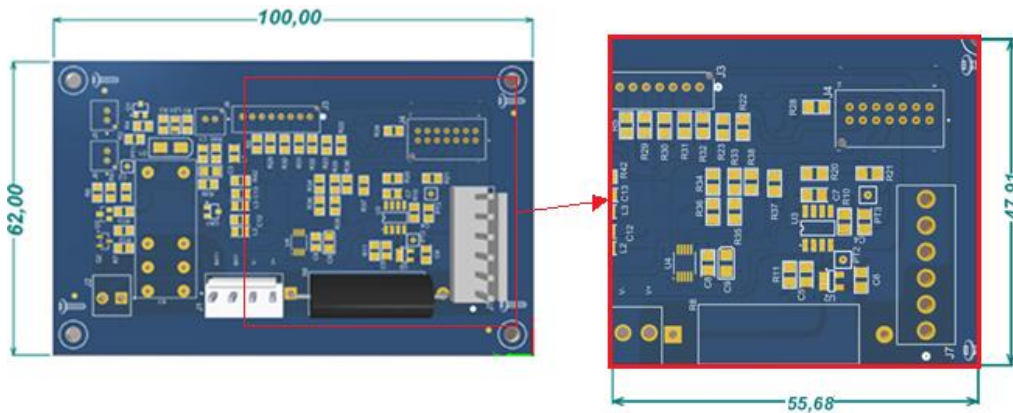
Sua versão final fabricada possui as seguintes características:

- Camadas (*layers*): 2
- Espessura do cobre: 1 oz
- Espessura da PCB: 1,62 mm
- Tamanho: 100 x 62 mm.
- Área útil de circuito: 84 x 46 mm
- Tensão de trabalho: 13,8 V
- Corrente elétrica de trabalho: 8 A
- Temperatura do ambiente da PCB no equipamento 35 °C

A Figura 1 ilustra a PCB estudada e seu dimensionamento, destacando o *layout* da camada superior. A critério de estudo, foram populados somente os componentes

referentes a malha por onde passa uma corrente de 8 A.

Figura 1 - Vista superior da PCB - Cotas em milímetros



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A fim de proteção de detalhes industriais e evitar poluição visual, a plotagem das imagens das simulações evidenciará somente a área da malha analisada. Isso é destacado na Figura 1.

O dimensionamento da PCI é sempre um fator importante devido as limitações mecânicas para sua fixação. Além disso, outro ponto relevante a ser avaliado é a relação da área útil do circuito, que geralmente é menor que a área total da PCB, demanda essa baseada na norma de equipamentos hospitalares a IEC 60601-1. (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 2009)

Em seu capítulo 8, subcláusula 8.9, é citado que os circuitos devem possuir uma distância de escoamento de 8 mm de qualquer chapa metálica do equipamento, pois se ocorrer alguma descarga e esta for conduzida pela chapa, os circuitos estarão a uma distância segura e não serão afetados por essa anomalia.

Durante o desenvolvimento de um produto, é comum que a equipe mecânica não entenda de segurança elétrica, e a fim de otimizar espaço, as placas são posicionadas de maneira a favorecer o maior agrupamento de componentes dentro de um conjunto, o que resulta em PCBs próximas de chapas aterradas no equipamento. Então, como uma forma de proteger os circuitos, os engenheiros de hardware podem adotar uma borda de 8 mm na PCB. Uma margem sem cobre, dessa forma, se essa placa for aplicada em outro equipamento onde ela encoste em partes condutoras de energia, ainda conterà a distância de escoamento protegendo os circuitos.

Sendo assim, levando-se em conta as limitações mecânicas e normativas, foi preciso estudar as melhores formas de rotear a PCB para que suportasse corrente de 8 A sem danificar suas trilhas. Algumas estratégias de roteamento foram aplicadas com esse intuito.

A validação das técnicas adotadas foi baseada em três etapas:

- Simulação: uso do Altium Designer para a análise da rede de distribuição de energia (PDN Analyzer), que simula a passagem de corrente de determinada malha, a partir das informações fornecidas de cada componentes, tensão e corrente de alimentação, bem como o consumo da carga;
- Testes em bancada aplicado à última versão da PCB fabricada: inserção de uma carga para consumo de 8 A, e uso de termopares para medição dos pontos que poderiam aquecer com a

passagem de corrente. Esses pontos foram escolhidos a partir da simulação, que indicou os locais com potencial de temperatura elevada;

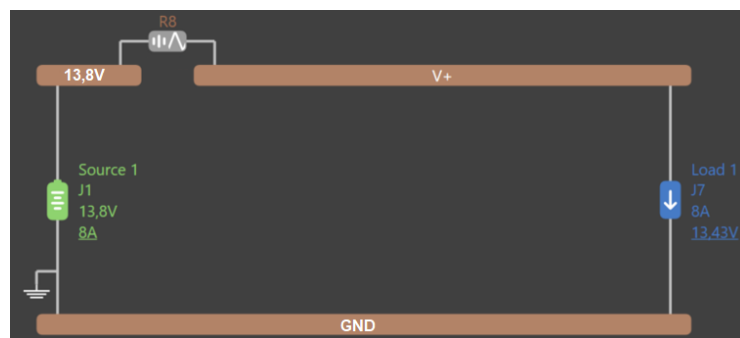
- O confronto entre dados de simulação e testes em bancada: verificação dos pontos de maior densidade de corrente .

2.1 Simulação

O software Altium Designer realiza simulações para análise da rede de distribuição de energia (PDN Analyzer), onde são investigados os pontos de maiores densidade de corrente, e plota em forma quantitativa e gráfica na PCB os pontos onde podem ocorrer estrangulamento na passagem de corrente. Durante a simulação, de forma a ser mais preciso os apontamentos, são analisados pontos específicos da PCB. Por exemplo: dentro de uma via ou determinada área minúscula. Para isso, é preciso definir a malha do circuito por onde a corrente irá circular, e a espessura da PCB.

Na Figura 2, é plotado o modelo de como foi realizada a montagem da malha estudada no software. Para isso, foi considerada uma tensão de alimentação de 13,8 V, corrente de 8 A e espessura de cobre de 1 oz (34,8 μm).

Figura 2 - Malha do circuito analisado

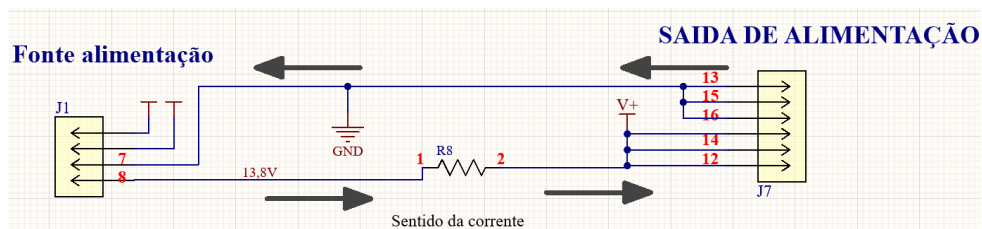


Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Durante o desenvolvimento dessa placa, quatro versões foram projetadas, aplicando diferentes técnicas de roteamento. Todas foram simuladas considerando os mesmos parâmetros apresentados.

A Figura 3 ilustra o esquema elétrico da malha analisada. Nela, os números destacados em vermelhos são uma referência aos mesmos pontos apresentados nas simulações a seguir.

Figura 3 - Esquemático da malha analisada



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.1.1 Primeira versão da PCB

O roteamento foi feito apenas no *bottom layer*, usando trilhas com largura de 3,5 mm com curvas.

É importante lembrar que, para placas com espessura de cobre

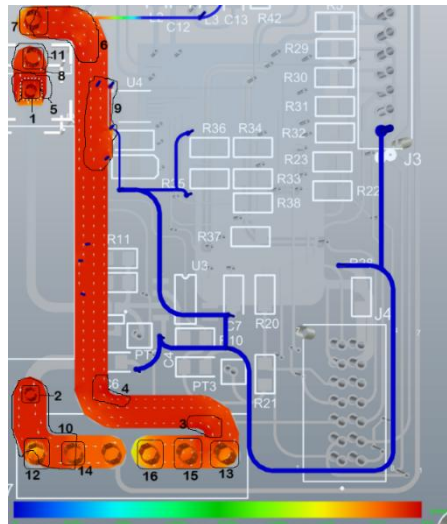
de 1 oz, a largura da trilha deve ser de 0,3 mm para cada ampere (INSTITUTE FOR PRINTED CIRCUITS OR ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC), 2012). Logo, nesse caso a trilha suportaria 11 A.

Por se tratar de uma placa roteada somente em uma camada, toda a concentração de corrente fluiria pelo *bottom layer*.

Na simulação apresentada na Figura 4, é possível verificar de maneira visual o resultado da passagem de corrente pelas trilhas na camada inferior da PCB. Além disso, o software plota o sentido do fluxo de corrente com setas brancas muito pequenas para identificação clara na Figura, porém segue o sentido ilustrado na Figura 3.

Os pontos evidenciados, tratam-se da indicação das 16 maiores concentrações de densidade de corrente na PCB. A escala colorida na parte inferior da Figura 4, representa a densidade de corrente que varia de 0 A/mm² (cor azul) a 119 A/mm² (cor vermelha escura). É possível perceber que, as trilhas analisadas possuem somente os valores mais altos na escala.

Figura 4 - Versão 1 do roteamento da PCB (Bottom Layer)



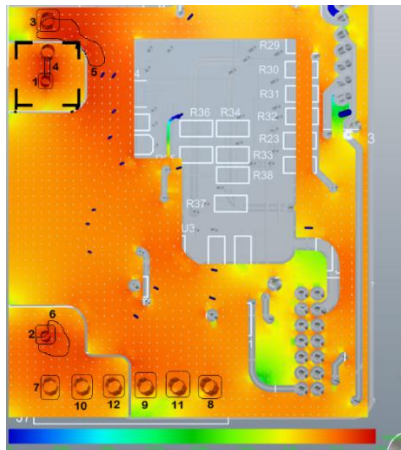
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.1.2 Segunda versão da PCB

Nesta versão, se manteve apenas uma camada de cobre. Porém, para otimizar a passagem de corrente, as trilhas na camada inferior foram substituídas por polígonos, que passaram a realizar a interligação dos componentes na malha de alta corrente.

Na Figura 5, é ilustrado os pontos com maiores densidades de corrente. Novamente a escala de cor varia de 0 A/mm² (cor azul) a 119 A/mm² (cor vermelha escura). Nesse cenário, nota-se cores mais próximas do laranja e vermelho, o que indica novamente maiores valores de densidade de corrente devido o roteamento somente em uma camada da PCB.

Figura 5 - Versão 2 do roteamento da PCB (Bottom Layer)



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O sentido da corrente se manteve o apresentado na Figura 3 para todas as versões da PCB, uma vez que somente o tipo de trilhamento foi alterado.

2.1.3 Terceira versão da PCB

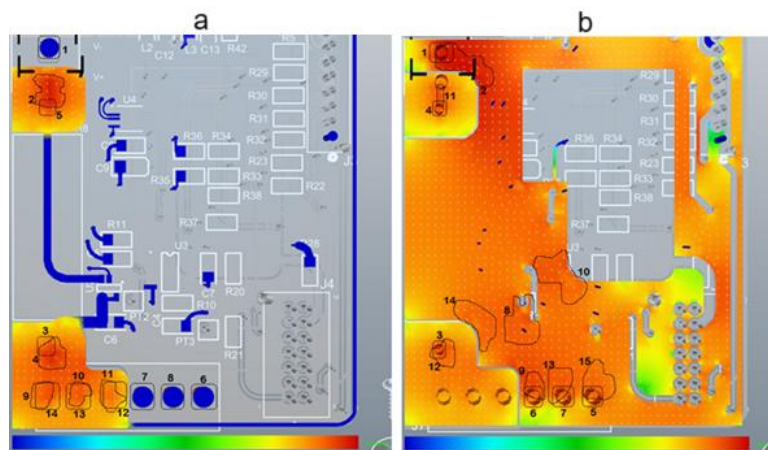
Para esta versão foi adotado o roteamento na camada superior e inferior da PCB (*top e bottom layers*). Devido o posicionamento dos componentes na camada superior da placa, somente o VCC foi roteado nesta camada. O mesmo polígono usado na camada inferior foi copiado na camada superior, logo possuem as mesmas áreas.

A Figura 6(a), apresenta o resultado da densidade de corrente na camada superior, e a Figura 6(b), na camada inferior.

A escala de densidade de corrente utilizada na camada superior varia de 0 A/mm² a 82,6 A/mm². Nota-se que a densidade de corrente é mais baixa em relação as duas primeiras versões, por mais que a cor esteja entre laranja e vermelho, o valor do gráfico indica uma densidade menor de corrente. Isso ocorre por conta do roteamento duplo entre as camadas.

Na camada inferior, a escala de densidade de corrente é a mesma. Novamente, nota-se que a densidade de corrente está mais baixa em relação as duas primeiras versões, atingindo o tom de amarelo em algumas extremidades, devido o roteamento duplo entre as camadas.

Figura 6 - Versão 3 do roteamento da PCB. (a) Camada superior. (b) Camada inferior



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O termopar de número 11 não foi especificado na figura, mas trata-se do termopar que monitorou a temperatura do ambiente do ensaio.

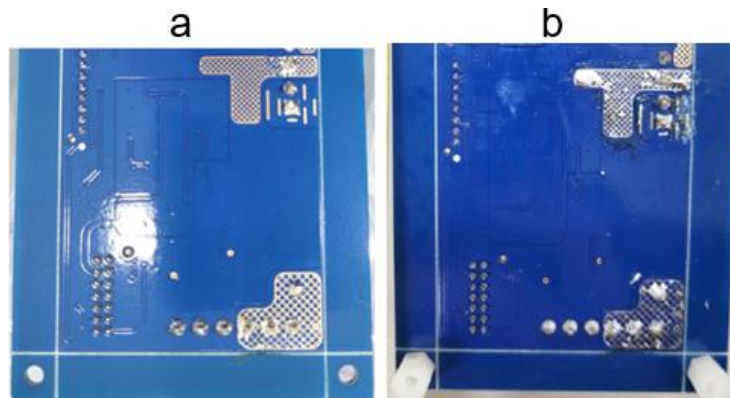
Para a alimentação do sistema foi utilizada a mesma fonte utilizada no equipamento, fornecendo uma tensão de 13,8 V. Por razões de sigilo industrial, a fonte não é mostrada.

O resistor de potência usado como carga foi ajustado para que a corrente consumida fosse de 8 A.

O ensaio foi realizado duas vezes, a primeira com a máscara de solda da PCB no cobre, vide Figura 9(a), e a segunda com estanho na máscara, vide Figura 9(b). O intuito deste teste foi verificar qual a melhor forma de dissipar o calor, com a máscara aberta ou fechada com estanho.

Os ensaios duraram cerca de 20 minutos colhendo as temperaturas nos pontos citados a cada segundo.

Figura 9 - Camada inferior da PCB. (a) máscara de solda aberta em cobre. (b) máscara de solda fechada com estanho



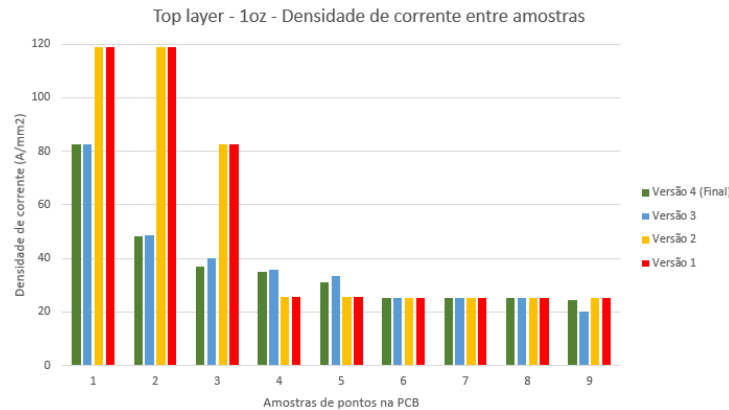
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados das simulações

Durante as simulações descritas no item 2.1 foram colhidos os maiores valores de densidade de corrente em alguns pontos da PCB.

No gráfico da Figura 10, é possível observar os 9 pontos da densidade de corrente na camada superior das quatro versões da PCB. Na primeira e segunda versão da PCB não houve trilhamento nesta camada, por isso quando simulado, o software identificou somente os terminais dos conectores e resistor que foram plotados no gráfico.

Figura 10 - Comparações dos de teste da camada superior das quatro versões da PCB

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Nota-se valores altíssimos nas versões de roteamento 1 e 2, nos primeiros três maiores pontos de concentração, depois é possível perceber que as densidades ficam mais uniformes em todas as versões.

É importante salientar que o ponto 1 trata-se da conexão da alimentação da PCB bem como a condução da corrente pelo resistor de potência antes de ser distribuído para o restante da placa e periféricos externos.

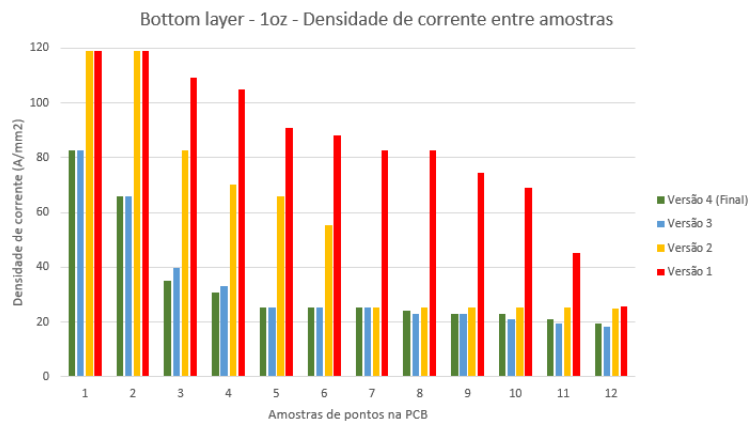
Tabela 1 - Percentual de melhoria da versão 4 em relação as outras versões (Camada superior)

Pontos	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	6 (%)	7 (%)	8 (%)	9 (%)
V3	0	1	7,5	2,8	7,2	0	0	0	-19,7
V2	30,6	59,5	55,3	-36,9	-19,8	0	0	0	3,2
V1	30,6	59,5	55,3	-36,9	-19,8	0	0	0	3,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 1 mostra a relação percentual da densidade de corrente entre a versão 4 e as restantes na camada superior, os valores positivos são o quanto por cento de melhoria houve no ponto, os valores negativos mostram o quanto piorou.

Na Figura 11, são apresentados os resultados dos pontos de amostragem da densidade de corrente na camada inferior das placas. Neste caso, houve roteamento desde a primeira versão. Observa-se que as duas primeiras versões possuíam maiores aglomerados de corrente.

Figura 11 - Comparações dos pontos na camada inferior entre as quatro versões de PCB

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 2 - Percentual de melhoria da versão 4 em relação as outras versões (Camada inferior)

Pontos	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	6 (%)	7 (%)	8 (%)	9 (%)
V3	0	0	12,5	7,2	0	0	0	-5,2	-1,3
V2	30,6	44,8	57,7	55,9	61,5	54,2	0,8	4,0	8,7
V1	30,6	44,8	68	70,6	72,1	71,3	69,4	70,6	69,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

É perceptível que não houve mudanças bruscas entre a terceira e quarta versão de PCB, onde a diferença foi a inserção das vias para interligação dos planos, em alguns pontos a densidade de corrente ficou até menor na terceira versão que na quarta, como mostra a Tabela 2, onde os valores positivos foram o quando melhorou da versão anterior para a versão 4, e os valores negativos o quanto piorou.

Os valores de densidade de corrente registrados foram convertidos em temperatura.

Essa conversão se baseou no procedimento descrito a seguir.

Esta grandeza relaciona a corrente pela área da trilha, vide equação 1 (David Halliday; Robert Resnick; Jearl Walker, 2016).

No Altium os valores da área são dados em amperes por milímetros quadrados.

$$J = \frac{I}{A} \quad (1)$$

onde **J** é a densidade de corrente (A/m²), **I** a Corrente Elétrica (A) e **A** é a área da sessão transversal (m²).

Com os valores da densidade de corrente pode-se calcular a geração de calor por unidade de volume, expressão dada a partir da forma diferencial do aquecimento por efeito Joule, ver equação 2 (Multiphysics Learning & Networking, 2025):

$$q''' = J^2 \rho \quad (2)$$

onde **q'''** é a geração de calor por unidade de volume (W/m³), **J** já foi descrito acima e **ρ** é a resistividade elétrica do material (Ω·m).

Como a geração de calor ocorre em uma trilha é preciso levar em consideração sua espessura, como ilustrado na equação 3 (Frank P. Incropera et al., 2011):

$$q'' = J^2 \rho h \quad (3)$$

onde **q''** é a geração de calor por unidade de área (W/m²), **J** e **ρ** já foram descritos acima, e **h** é a espessura da trilha (m).

Usando o conceito da condução térmica estacionária, é obtido a expressão aplicada para descobri a variação de temperatura causada pela potência dissipada, que depende da resistência térmica do condutor, equação 4 (Bahrami, [S.d.]):

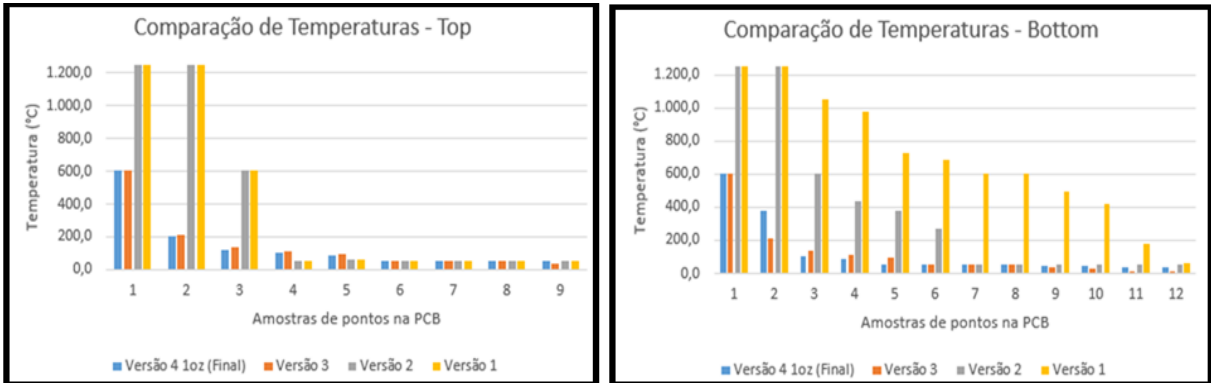
$$\Delta T = q'' \theta = J^2 \rho h \theta \quad (4)$$

onde **ΔT** é a variação da temperatura (°C), **θ** é a resistência térmica para o ambiente (°C/W·m²), e **q''**, **J**, **ρ** e **h** já foram descritos acima.

Aplicando as equações 5 e 6 nos valores gerados pelo software Altium Design

em cada ponto indicado nas Figuras das simulações, foram obtidas as possíveis variações de temperatura nas trilhas. A Figura 12 ilustra os gráficos, sendo à esquerda referente ao top layer e a direita ao bottom layer.

Figura 12 - Gráfico das temperaturas nos pontos da PCB na camada superior (*top*) e inferior (*bottom*)



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Na análise da simulação, é importante salientar que, não é considerado o corpo do terminal dos conectores, porém na PCB física esses são soldados, com uma quantidade de estanho para fixação, o que contribui significativamente para a dissipação do calor gerado pela passagem da corrente elétrica. O que justifica os valores mais altos de temperatura nos três primeiros pontos apresentados na Figura 12.

Conforme esperado as versões 3 e 4 da PCB apresentaram menores variações de temperatura. Percebe-se também que a inserção de vias de interligação de planos na versão 4 da PCB não gerou diferença significativa de temperatura em relação a versão 3. De fato, em alguns pontos, temperaturas menores foram observadas.

3.2 Resultados dos ensaios físicos em bancada

Os ensaios da PCB com a máscara aberta e fechada duraram cerca de 20 minutos no primeiro ensaio e 28 minutos no segundo ensaio, com 8 A de corrente fluindo pelo circuito indicado na Figura 4 citada na seção 2.1.1.

A Tabela 3 indica os valores máximos dos pontos de monitoramento apresentados na Figura 8.

Tabela 3 - Valores máximo dos ensaios em bancada na PCB fabricada

Termopar	PCB com Máscara aberta - Cobre (°C)	PCB com Máscara fechada – Estanho (°C)	Percentual da diminuição de temperatura na PCB com cobre (%)
1	46,2	47,8	3,3
2	39,7	38,6	-2,8
3	51,7	63,9	19,1
4	56,7	44,1	28,6
5	38,4	44,9	14,5
6	37,8	49,9	24,2
7	39,3	41,7	5,8
8	51,8	51,9	0,2
9	46,8	52,6	11
10	43,9	44,7	1,8
12	26,6	26,6	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em ambos os ensaios, todos os pontos na PCB partiram de temperatura ambiente de 26 °C.

Analisando a coluna de percentual na Tabela 3 é perceptível que, o teste com a PCB com a máscara em cobre obteve a maior parte dos valores menores de temperatura (conforme indicado na coluna de percentual na Tabela 3). Isso ocorre devido a melhor condutividade térmica do cobre. Esse fato poderia ser decisivo quanto a escolha do tipo de acabamento para dissipar calor, porém há fatores no processo de fabricação e vida útil da PCB a serem estudados.

É preferível manter a PCB com estanho nas áreas abertas pois o cobre oxida com facilidade quando exposto ao ar. Quando isso não é feito, há a necessidade de envernizar a PCB para prevenir essa ação química, que, em contrapartida, piora a condutividade térmica. Além disso, o estanho protege as trilhas contra corrosão e umidade aumentando a vida útil da PCB.

3.3 Confronto entre simulação e ensaios em bancada

Após obter os valores de temperatura a partir das simulações do Altium Design e com os ensaios em bancada, foi possível compará-las. A Tabela 4 relaciona os dados obtidos.

Tabela 4 – Temperaturas obtidas através de simulação e testes em bancada

Pontos	Temperatura simulada na Versão 4 - Bottom (°C)	Temperatura medidos fisicamente nos testes no Bottom layer		Percentual de redução de temperatura	
		PCB máscara aberta (°C)	PCB máscara fechada (°C)	PCB mascara aberta e simulação (%)	PCB mascara fechada e simulação (%)
1	601,8	46,2	47,8	92,3	92,1
2	380,7	39,7	38,6	89,6	89,9
3	107,4	56,7	44,1	47,2	58,9
4	84,2	51,7	63,9	38,6	24,1
5	56,5	38,4	44,9	32,0	20,5
6	52,1	46,8	52,9	10,2	-1,5
7	45,8	39,3	41,7	14,2	9,0
8	33,5	43,9	44,7	-31,0	-33,4
9	24,0	51,8	51,9	-115,8	-116,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

A comparação entre os valores obtidos de temperatura através de simulação e ensaios físicos em bancada na PCB, considerando a máscara de solda aberta (cobre) e fechada (estanho), foi feita somente na camada interior. Durante os ensaios físicos, não foi possível medir pontos na camada superior devido ao posicionamento dos componentes previamente soldados.

Analisando os resultados é possível perceber que os valores de temperatura da simulação ficaram, na maioria das vezes, maiores em relação aos testes físicos. Os pontos 1, 2, 3 e 4 tratam-se dos pontos iniciais por onde a corrente fluirá, sendo eles pontos dos terminais de conectores e resistor de potência da placa. Isso justifica as altas temperaturas simuladas. Os pontos seguintes indicam áreas de cobre maiores ou por onde a corrente tem espaço para se dissipar. Com a coluna de comparação percentual entre o simulado e os testes em bancada é possível observar as diferenças de valores.

Apesar da simulação indicar pontos de temperatura muito mais

altos nos conectores de alimentação da PCB que os verdadeiramente observados, contribuiu para prever onde ocorreria as maiores concentrações de corrente. Isso auxilia o desenvolvimento do trilhamento da placa, indicando os pontos onde deve-se ter mais atenção, sendo assim uma ferramenta confiável para o *design* do projeto.

A mudança de roteamento de trilhas de 3,5 mm para o uso de polígono provocou grande mudança, pois aumentou a área por onde a corrente elétrica passaria. Entretanto, segundo os indicadores, na versão 2 da PCB, alguns pontos poderiam alcançar temperaturas acima de 100 °C em casos extremos, logo a alteração seguinte, rotear a camada superior com os mesmos polígonos (possíveis), melhorou essa distribuição de densidade de corrente. O que levou a uma queda brusca nas temperaturas, como mostra os gráficos nas Figuras 10, 11 e 12.

A última alteração, inserir vias para interligar os planos, não se mostrou muito eficaz para esta aplicação, isso ocorre por conta da perda de área de cobre para a inserção da via. Analisando os gráficos das versões 3 e 4, é possível perceber que houve uma redução mínima de temperatura, de maneira geral se manteve equilibrada.

4 CONCLUSÃO

A proposta deste artigo foi avaliar o uso de simulação como uma ferramenta para a análise dissipação da corrente elétrica no desenvolvimento de placas eletrônicas. Bem como analisar os benefícios de cada técnica de roteamento para esse mesmo objetivo.

Após uma série de testes e análises foi possível comprovar que a simulação é uma ferramenta confiável para o desenvolvimento do roteamento da PCB. O software, no caso Altium Design, indicou valores próximos do real, porém nem sempre iguais, podendo ser até maiores, devido a omissão de algumas variáveis, como o calor gerado por resistores de potência, outros tipos de chips, ou o estanho usado para a fixação dos terminais dos componentes na placa, além de outros pontos que são encontrados durante os testes físicos em bancada. Ainda assim as estimativas obtidas no software são de extrema importância para a prevenção de superaquecimentos, o que pode encurtar a vida útil de uma placa eletrônica.

As técnicas aplicadas para a melhoria na dissipação da corrente elétrica na PCB se mostraram eficazes. Conforme as versões de PCB foram se desenvolvendo as variações de temperaturas que poderiam ocorrer, segundo os cálculos, foram diminuindo, e se tornando mais sutis. Como o caso da versão 4. Em uma análise preliminar, pode parecer que seria melhor não usar as vias, mas analisando um contexto geral é notável a ligeira queda de temperatura provocada pelo seu uso.

Quando se desenvolve uma PCB deve-se buscar técnicas que apresentem grande eficiência para a melhoria da passagem da corrente. Porém, após avançar vários estágios, as melhorias aplicadas, provocam mudanças sutis, mas que se mostram eficazes para a vida útil da PCB.

REFERÊNCIAS

- ALTIUM.COM. **Altium Designer - PDN Analyzer (by CST)**.
 BAHRAMI, M. **Steady Conduction Heat Transfer (SFU Lecture Notes)**.
 DAVID HALLIDAY; ROBERT RESNICK; JEARL WALKER. **Fundamentos de Física Eletromagnetismo**. 10^a ed. [S.l.]: LTC, 2016. v. 3
 FRANK P. INCROPERA *et al.* **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7^a ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

INSTITUTE FOR PRINTED CIRCUITS OR ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-2221: Generic Standard on Printed Board Design**. IPC, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60601-1: Medical electrical equipment – Part 1: General requirements for basic safety and essential performance**. IEC, 2009.

MULTIPHYSICS LEARNING & NETWORKING. **Multiphysics Learning & Networking - Thermoelectromagnetics**.

SHIKASHA STUDY ABROAD. **Top 10 Most Difficult Engineering Courses in the World 2025**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu grande amigo Gustavo que fez a Pós-graduação junto comigo, me ajudou em cada dificuldade e sempre esteve me incentivando a seguir em frente.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

i LETHYCIA SANT' ANNA OLIVEIRA



Engenheira de Automação e Controle pela Universidade Paulista UNIP (2020), cursando a Pós-Graduação em Sistemas Embarcados pelo Centro Universitário SENAI São Paulo. Engenheira de desenvolvimento de produtos para UTI Neonatal, sendo responsável pelo design das plataformas de hardware dos equipamentos. <https://orcid.org/0009-0003-3652-8667>

ii LEANDRO POLONI DANTAS



Engenheiro (2004) e Doutor (2018) em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI. Atuou por 15 anos na indústria eletrônica no desenvolvimento de novos produtos. Desde 2009, vem lecionando em cursos de pós-graduação, graduação e de nível técnico em diferentes instituições paulistanas. Atualmente é professor no Centro Universitário SENAI São Paulo e no Insper. <https://orcid.org/0000-0003-3674-336X>