

A evolução dos painéis de LED:



história



tecnologia



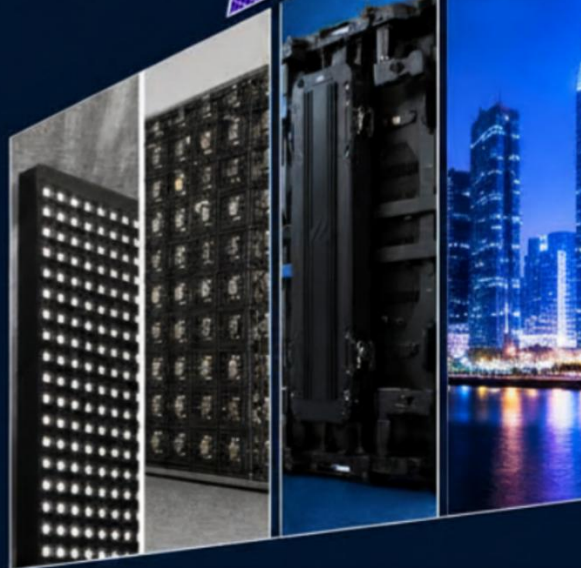
eficiência energética



manutenção



aplicações
contemporâneas



DOUGLAS FERNANDES SODRÉ

A EVOLUÇÃO DOS PAINÉIS DE LED

História, tecnologia, eficiência energética, manutenção e aplicações contemporâneas

1ª Edição



AUTOR

Douglas Fernandes Sodré

10.47538/AC-2026.73



Ano 2026

A EVOLUÇÃO DOS PAINÉIS DE LED

História, tecnologia, eficiência energética, manutenção e aplicações contemporâneas

1ª Edição

**CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ**

S663e

Sodré, Douglas Fernandes

A evolução dos painéis de LED [recurso eletrônico] : história, tecnologia, eficiência energética, manutenção e aplicações contemporâneas / Douglas Fernandes Sodré. - 1. ed. - Natal [RN] : Amplamente, 2026.
recurso digital

Formato: ebook

Modo de acesso: world wide web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5321-149-0 (recurso eletrônico)

1. Diodos emissores de luz. 2. Iluminação elétrica. 3. Livros eletrônicos. I. Título.

26-106875.0

CDD: 621.3815

CDU: 621.382



Carla Rosa Martins Gonçalves - Bibliotecária - CRB-7/4782

Editora Amplamente
Empresarial Amplamente Ltda.
CNPJ: 35.719.570/0001-10
E-mail:
publicacoes@editoraamplamente.com.br
www.editoraamplamente.com
Telefone: (84) 999707-2900
Caixa Postal: 3402
CEP: 59082-971
Natal- Rio Grande do Norte – Brasil
Copyright do Texto © 2026 Os autores
Copyright da Edição © 2026 Editora
Amplamente
Declaração dos autores/ Declaração da
Editora: disponível em:
<https://www.amplamentecursos.com/politicas-editoriais>

Editora-Chefe: Dayana Lúcia Rodrigues de Freitas
Assistentes Editoriais: Caroline Rodrigues de F. Fernandes; Margarete Freitas Baptista
Projeto Gráfico, Edição de Arte e Diagramação: Luciano Luan Gomes Paiva; Caroline Rodrigues de F. Fernandes
Capa: Canva®/Freepik®

Parecer e Revisão por pares: Revisores
CONSULTORIA TÉCNICA E
REVISÃO CRÍTICA: Rita de Cássia Soares Duque

Creative Commons. Atribuição-
NãoComercial-SemDerivações 4.0
Internacional (CC-BY-NC-ND).



Ano 2026

SUMÁRIO

SOBRE O AUTOR	6
AGRADECIMENTOS.....	8
APRESENTAÇÃO	10
INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO I	18
A LUZ QUE SE TRANSFORMOU EM IMAGEM	
CAPÍTULO II.....	27
OS PRIMEIROS PAINÉIS E A ERA DIP	
CAPÍTULO III	36
A VIRADA TECNOLÓGICA COM O SMD	
CAPÍTULO IV.....	46
PITCH, RESOLUÇÃO E DENSIDADE VISUAL	
CAPÍTULO V	56
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E NOVOS CRITÉRIOS DE PROJETO	
CAPÍTULO VI.....	67
A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO DOS PAINÉIS DE LED	
CAPÍTULO VII	78
GOB, COB, MINILED E MICROLED COMO NOVAS RESPOSTAS TECNOLÓGICAS	
CAPÍTULO VIII.....	92
PAINÉIS DE LED NOS PROJETOS CONTEMPORÂNEOS	



Ano 2026

CAPÍTULO IX.....	104
DO PAINEL CONECTADO AO SISTEMA RESPONSIVO	
CAPÍTULO X	115
O FUTURO DA INDÚSTRIA VISUAL E O NOVO PERFIL PROFISSIONAL	
CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

SOBRE O AUTOR

Douglas Fernandes Sodré é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Paulista, técnico em Eletrônica pela Etec Gildo Marçal Bezerra Brandão e possui formação continuada em Energia Solar e Tecnologias pelo Senai Jorge Mahfuz. Sua qualificação reúne eletrônica, sistemas elétricos, manutenção, desenvolvimento de circuitos e tecnologias energéticas, campos que sustentam uma trajetória construída na convergência entre conhecimento técnico, aplicação industrial e resolução de problemas operacionais.

Desde 2014, desenvolve atividades relacionadas aos painéis de LED e às infraestruturas elétricas e eletrônicas que garantem seu funcionamento. Iniciou sua atuação profissional na LEDCOM Soluções em LED, realizando análise de diagramas, substituição de componentes, soldagem SMD, testes de painéis, instalações elétricas e manutenção mecânica. Esse contato direto com equipamentos e falhas de campo formou uma base técnica que seria ampliada em funções posteriores.

Na Just LED, assumiu a supervisão de manutenção elétrica, com responsabilidades relacionadas ao treinamento de equipes, ao acompanhamento das intervenções e à identificação das necessidades do setor. Na RC LED, atuou no diagnóstico, na instalação e na manutenção preventiva e corretiva de infraestruturas elétricas e eletrônicas, além da avaliação da qualidade dos equipamentos. A progressão para a função de projetista eletroeletrônico na Mister Led incorporou o desenvolvimento de placas e circuitos, os testes de equipamentos, a elaboração de relatórios técnicos e o suporte a clientes.

Em novembro de 2023, ingressou na Engebras Tecnologia como engenheiro eletrônico, no segmento de sistemas de

monitoramento rodoviário. Nesse ambiente, passou a trabalhar com desenvolvimento de placas eletrônicas, circuitos elétricos, prototipagem e suporte técnico, expandindo sua experiência para sistemas destinados a operações de infraestrutura e sinalização. Sua formação inclui ainda capacitações em segurança para serviços elétricos e trabalhos em altura, conhecimentos em AutoCAD e domínio avançado da língua inglesa, além de espanhol em nível intermediário.

A experiência acumulada entre manutenção, supervisão, projetos e engenharia oferece a Douglas uma visão integrada do ciclo tecnológico dos painéis de LED. Sua produção autoral nasce desse percurso e organiza conhecimentos construídos em diferentes etapas da carreira, relacionando evolução dos componentes, eficiência energética, reparabilidade, dimensionamento e novas aplicações. Ao converter experiência técnica em conteúdo sistematizado, o autor contribui para aproximar estudantes, profissionais e leitores das mudanças que orientam o futuro da indústria audiovisual e da sinalização eletrônica.

AGRADECIMENTOS

A realização deste livro representa o resultado de uma trajetória construída por meio do estudo, da experiência profissional e do contato contínuo com pessoas que contribuíram para minha formação. Agradeço a todos que estiveram presentes nesse percurso, oferecendo incentivo, confiança e condições para que o conhecimento adquirido ao longo dos anos pudesse ser organizado e compartilhado.

Registro minha gratidão aos profissionais com quem trabalhei e às equipes das quais participei. As experiências compartilhadas, os desafios técnicos e as soluções desenvolvidas no cotidiano ampliaram minha compreensão sobre eletrônica, manutenção, projetos e sistemas de painéis de LED. Cada ambiente profissional acrescentou novas perspectivas e fortaleceu uma forma de pensar orientada pela precisão, pela responsabilidade e pelo aperfeiçoamento permanente.

Agradeço também aos professores, instrutores e colegas que participaram de minha formação acadêmica e técnica. Os conhecimentos transmitidos, as perguntas formuladas e as experiências compartilhadas contribuíram para que a prática profissional fosse acompanhada por investigação, atualização e reflexão sobre as transformações tecnológicas do setor.

À minha família e às pessoas que acompanharam a elaboração desta obra, expressei meu reconhecimento pelo apoio, pela compreensão e pelo incentivo durante todo o processo de escrita. A presença de cada uma tornou possível transformar anos de aprendizagem e atuação profissional em um registro capaz de alcançar outros leitores.

Por fim, agradeço aos estudantes, técnicos, engenheiros, instaladores, gestores e demais profissionais interessados na

evolução dos painéis de LED. Este livro foi escrito com o propósito de reunir conhecimentos que possam ampliar a compreensão sobre essa tecnologia e estimular novas formas de pensar sua instalação, sua manutenção e suas possibilidades futuras.

Douglas Fernandes Sodré

APRESENTAÇÃO

Antes de uma imagem surgir em uma fachada, iluminar um palco ou transmitir uma mensagem em uma rodovia, existe uma trajetória de invenções, escolhas e conhecimentos que o público raramente percebe. O resultado parece imediato, mas condensa décadas de desenvolvimento e depende de uma estrutura cuja confiabilidade é construída fora do campo visual do observador.

A presença cotidiana dos painéis de LED tornou essa complexidade quase invisível. As telas aumentaram, os pixels diminuíram e a imagem aproximou-se do observador com uma definição que, durante muito tempo, parecia incompatível com grandes formatos. Por trás dessa transformação, ocorreram mudanças profundas na fabricação dos componentes, no consumo energético, na instalação, na manutenção e nas competências exigidas dos profissionais.

Foi dessa percepção que nasceu este livro. Seu percurso acompanha como os painéis chegaram às configurações atuais e examina porque cada avanço alterou os projetos, as formas de intervenção técnica e os espaços ocupados pela imagem eletrônica.

A história dos painéis de LED pode ser observada como uma história de aproximação. Os pontos luminosos tornaram-se menores e mais numerosos, as distâncias de visualização foram reduzidas e as telas avançaram para ambientes nos quais qualquer irregularidade se torna perceptível. Ao mesmo tempo, a integração entre os componentes modificou as possibilidades de reparo e tornou mais estreita a relação entre desempenho visual, arquitetura eletrônica e precisão técnica.

A trajetória de Douglas Fernandes Sodré confere à obra uma perspectiva construída no encontro entre tecnologia e prática. Sua atuação no setor orienta a leitura de situações em que

especificações precisam ser interpretadas e decisões técnicas produzem consequências sobre o funcionamento do sistema.

O conhecimento acumulado em campo mostra que a evolução não elimina os problemas, mas altera sua natureza. Falhas antes concentradas em componentes acessíveis passam a envolver módulos integrados, sistemas de controle, configurações, conexões e limites de reparabilidade. O profissional deixa de observar elementos isolados e passa a interpretar relações, reconhecendo que uma anomalia visível pode ter origem distante do ponto em que se manifesta.

O mesmo raciocínio alcança as escolhas de projeto. Cada contexto atribui pesos distintos à definição, ao brilho, à resistência e à continuidade operacional. A qualidade da decisão decorre da correspondência entre tecnologia, ambiente e finalidade comunicacional.

Compreender os painéis de LED exige, portanto, ultrapassar a superfície luminosa sem perder de vista aquilo que ela comunica. História, engenharia, manutenção e experiência visual pertencem ao mesmo percurso. Quando essas dimensões são examinadas em conjunto, a evolução deixa de parecer uma sequência de novidades comerciais e passa a revelar as decisões que redefiniram a indústria, as profissões e os modos de ocupar o espaço com imagens.

Este livro se dirige a profissionais do setor, estudantes, técnicos, engenheiros, gestores, projetistas e leitores interessados em conhecer o que existe por trás dessas telas. Não se exige domínio prévio de todas as áreas envolvidas. Exige-se curiosidade para perceber que cada pixel participa de uma estrutura maior e que cada mudança tecnológica carrega possibilidades, restrições e novos critérios de responsabilidade.

O convite que abre esta obra é, portanto, o de olhar novamente para uma tecnologia que se tornou familiar. Ao avançar pela leitura, o painel deixa de ser uma superfície pronta e passa a

revelar sua trajetória, sua arquitetura e seus compromissos técnicos. Quando a última página for alcançada, espera-se que nenhuma tela de LED seja observada do mesmo modo, porque sua imagem terá deixado de esconder a história, o conhecimento e as decisões que a tornaram possível.

INTRODUÇÃO

Os painéis de LED tornaram-se parte recorrente da paisagem contemporânea. Estão presentes em rodovias, fachadas comerciais, vitrines, auditórios, estúdios, eventos, espaços públicos e ambientes corporativos. Embora sejam reconhecidos pela luminosidade e pela capacidade de formar imagens em grandes superfícies, seu funcionamento depende de uma estrutura técnica pouco percebida pelo observador. Atrás de cada conteúdo exibido coexistem componentes luminosos, circuitos, fontes de alimentação, sistemas de controle, conexões, mecanismos de dissipação térmica e decisões relacionadas à instalação.

A naturalização dessas telas pode produzir a impressão de que sua evolução ocorreu por meio do aumento da resolução e da redução do tamanho dos pixels. O percurso histórico demonstra uma transformação mais extensa. As mudanças introduzidas na fabricação dos LEDs, na disposição dos componentes, no encapsulamento, no processamento da imagem e na organização dos módulos alteraram a aparência dos painéis, suas possibilidades de aplicação e as condições necessárias para mantê-los em funcionamento.

Nas configurações baseadas em componentes DIP, a distância entre os pontos luminosos, o consumo energético e as limitações de resolução condicionavam o uso das telas a determinadas escalas e distâncias de observação. A adoção de componentes SMD ampliou a densidade de pixels e favoreceu a formação de imagens mais uniformes. Posteriormente, soluções como GOB, COB e MicroLED intensificaram a integração construtiva, modificando a proteção dos componentes, a proximidade visual e os limites de intervenção técnica.

Essas mudanças não representam etapas isoladas de uma sequência em que uma tecnologia simplesmente elimina a anterior. Diferentes arquiteturas permanecem em uso porque respondem a condições específicas de ambiente, custo, brilho, resistência, resolução e manutenção. Um painel instalado em uma rodovia está submetido a exigências distintas daquelas encontradas em uma vitrine, em um estúdio de produção audiovisual ou em um palco. A tecnologia adequada depende da relação entre o equipamento, o espaço e a finalidade da comunicação.

A finalidade deste livro consiste em compreender como a evolução dos painéis de LED reorganizou a produção da imagem, o consumo de energia, a instalação, a manutenção e as aplicações desses sistemas. O interesse não se restringe à identificação das tecnologias que surgiram ao longo do tempo. Busca-se interpretar porque determinadas mudanças ocorreram, quais problemas procuraram responder e quais novos compromissos técnicos foram introduzidos com o avanço da integração.

A obra também examina uma questão que acompanha toda inovação construtiva. À medida que os componentes se tornam menores, mais próximos e mais integrados, a qualidade visual tende a aumentar, mas os procedimentos de diagnóstico e reparo podem tornar-se mais complexos. A evolução da tela modifica, portanto, o trabalho realizado fora de seu campo visível. Instalar, configurar e manter um painel contemporâneo exige compreender a interação entre imagem, eletricidade, comunicação de dados, temperatura, estrutura física e condições ambientais.

A trajetória profissional de Douglas Fernandes Sodré oferece a perspectiva autoral pela qual essas transformações são interpretadas. Sua experiência em eletrônica, sistemas elétricos, locação e instalação de painéis, manutenção preventiva e corretiva, soldagem de componentes SMD, desenvolvimento de placas, suporte técnico, supervisão de equipes e energia solar permite observar a tecnologia a partir das condições encontradas em

operação. Esse repertório aproxima a evolução histórica das decisões tomadas diante de falhas, incompatibilidades, limitações de acesso, variações de consumo e exigências específicas de cada projeto.

A construção do livro foi orientada por uma metodologia histórico-técnica que articula literatura especializada, registros históricos, artigos científicos, livros, normas, legislação, documentos institucionais e manuais de fabricantes. As fontes foram selecionadas conforme sua relação com os marcos tecnológicos e com os aspectos visuais, elétricos, construtivos e operacionais examinados. Documentos de fabricantes foram empregados para demonstrar características de equipamentos e soluções comerciais determinadas, sem transformar especificações particulares em regras universais para todo o setor.

Esse conjunto documental foi confrontado com a experiência profissional do autor, utilizada como eixo de interpretação das relações entre desenvolvimento tecnológico e prática de campo. A experiência não substitui a fundamentação técnica nem assume a função de comprovação científica. Ela orienta a formulação das questões que atravessam a obra, especialmente aquelas relacionadas à escolha dos equipamentos, ao comportamento dos sistemas durante a operação, aos limites de reparabilidade e à circulação do conhecimento entre profissionais.

A organização do conteúdo privilegia uma narrativa capaz de acompanhar a transformação dos painéis sem reproduzir o formato de catálogo tecnológico ou manual operacional. Por esse motivo, o livro não apresenta instruções destinadas à execução autônoma de instalações, reparos ou intervenções elétricas. Normas e requisitos de segurança são tratados como referências para a compreensão das responsabilidades envolvidas, permanecendo a execução dos serviços condicionada à formação, à qualificação e às atribuições profissionais correspondentes.

O percurso temático parte da formação histórica do LED e dos processos que permitiram converter a emissão luminosa em sistemas de exibição. A análise alcança a passagem das arquiteturas DIP para configurações de maior integração, examinando como encapsulamento, disposição dos componentes e densidade alteraram a imagem e aproximaram as telas do observador. Essa base permite compreender o pixel pitch, a resolução, a distância de visualização, a uniformidade e os demais elementos que influenciam a percepção visual.

A discussão prossegue pela arquitetura elétrica e energética dos painéis. Consumo, fontes de alimentação, perdas, distribuição de carga, ventilação e dissipação térmica são examinados como partes interdependentes do funcionamento. A possibilidade de integração com geração fotovoltaica também é abordada dentro dessa lógica, considerando que a origem da energia precisa ser compatibilizada com a demanda efetiva, o regime de operação, o armazenamento e a autonomia pretendida.

A manutenção ocupa uma posição própria nesse percurso porque permite observar como a evolução construtiva modifica as formas de diagnóstico. Modularidade, acesso físico, rastreabilidade, documentação, substituição de componentes e reparos em placas são relacionadas às condições de intervenção. O aumento da integração desloca parte do conhecimento técnico da troca pontual de componentes para a interpretação do conjunto, exigindo que o profissional reconheça tanto as possibilidades quanto os limites de cada procedimento.

As aplicações examinadas ao longo da obra demonstram como as características técnicas adquirem sentidos distintos conforme o contexto. Brilho, resolução, resistência, mobilidade, sincronização e continuidade operacional não possuem o mesmo peso em todos os projetos. Examinar essas diferenças impede que a escolha do painel seja reduzida à comparação de especificações isoladas.

Os capítulos finais voltam-se à integração dos painéis com sensores, redes, sistemas de gerenciamento, geração de energia e estruturas responsivas, bem como às tendências que podem influenciar a continuidade da indústria. Sustentabilidade, eficiência, reparabilidade, qualificação profissional e atualização normativa compõem uma discussão em que o futuro não é apresentado como previsão fechada, mas como campo de decisões técnicas, econômicas e profissionais.

Ao reunir história, tecnologia e experiência de campo, este livro propõe uma leitura integrada dos painéis de LED. A tela deixa de ser compreendida como superfície autônoma e passa a ser examinada como resultado de relações entre materiais, circuitos, energia, controle, ambiente, manutenção e finalidade comunicacional. É nessa articulação que a evolução tecnológica revela sua dimensão concreta e permite compreender por que a qualidade da imagem começa muito antes de sua aparição diante do público.

CAPÍTULO I

A LUZ QUE SE TRANSFORMOU EM IMAGEM

Uma imagem luminosa parece nascer pronta quando ocupa uma fachada, acompanha um espetáculo ou transmite informações em uma via pública. A superfície acesa oculta, contudo, uma história iniciada muito antes dos grandes painéis. Em sua origem, havia um cristal, dois contatos elétricos e um brilho cuja utilidade ainda não podia ser reconhecida. Entre essa emissão incipiente e a imagem eletrônica existe um percurso marcado por descobertas científicas, limitações materiais e escolhas de engenharia.

O diodo emissor de luz formou-se por meio de contribuições científicas distribuídas ao longo de várias décadas. Durante parte desse percurso, o fenômeno já podia ser observado, embora sua explicação permanecesse incompleta e os processos industriais ainda fossem incapazes de reproduzi-lo com regularidade. A história do LED revela, assim, o intervalo que frequentemente separa uma possibilidade física de sua conversão em tecnologia estável, escalável e socialmente incorporada.

Compreender essa origem modifica a percepção do painel contemporâneo. Cada ponto luminoso conserva o princípio de converter energia elétrica em radiação visível, mas a imagem surge quando a emissão deixa de ser um efeito disperso e passa a ser controlada em cor, intensidade, posição e tempo. A passagem do brilho à linguagem visual constitui o eixo deste capítulo.

UM BRILHO SEM APLICAÇÃO DEFINIDA

Em 1907, Henry Joseph Round publicou uma breve nota na revista *Electrical World* relatando a emissão de luz em cristais de

carbeto de silício, então conhecido como carborundum. Durante experiências com contatos elétricos, Round percebeu tonalidades distintas conforme as condições aplicadas ao material. A observação é reconhecida como o registro inicial de luz eletricamente gerada em um dispositivo de estado sólido (Zheludev, 2007; Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

O episódio possuía grande alcance científico, embora sua aparência fosse modesta. Não havia um componente comercial, uma teoria madura dos semicondutores ou um processo capaz de fabricar dispositivos equivalentes em série. O que se via era um ponto luminoso fraco, irregular e difícil de controlar. A descoberta revelava uma propriedade da matéria, mas ainda não configurava a tecnologia que mais tarde receberia o nome de LED.

Nas décadas de 1920 e 1930, Oleg Losev examinou a luminescência do carbeto de silício de modo sistemático e divulgou seus resultados em periódicos internacionais. Seus estudos distinguiram a emissão observada de um simples aquecimento do material e trataram o contato cristalino como dispositivo capaz de produzir luz. Zheludev (2007) recupera essa contribuição ao demonstrar que Losev investigou o fenômeno muito antes de a eletrônica de semicondutores alcançar maturidade industrial.

A distância temporal entre os trabalhos de Round e Losev e a fabricação comercial dos LEDs revela uma característica recorrente da história técnica. O domínio do fenômeno exigia compreender a estrutura eletrônica dos materiais, controlar impurezas, produzir junções com comportamento previsível e extrair do cristal uma emissão luminosa compatível com aplicações concretas. Esses avanços converteram a eletroluminescência de ocorrência experimental em base física de um componente reproduzível.

A trajetória distribui-se entre pesquisadores que atuaram em momentos distintos. Round registrou a emissão, Losev aprofundou sua investigação e outras equipes construíram as

condições científicas e materiais necessárias à conversão do fenômeno em componente. Cada contribuição enfrentou uma limitação herdada do estágio anterior, compondo uma cadeia de descobertas que impede a redução dessa história ao nome de um inventor isolado.

QUANDO A FÍSICA EXPLICOU O BRILHO

O avanço da física do estado sólido, sobretudo durante as décadas de 1940 e 1950, forneceu a linguagem necessária para explicar o que os experimentos com carborundum haviam revelado. A compreensão dos semicondutores e das junções p-n permitiu relacionar corrente elétrica, movimento de portadores de carga e emissão de fótons. Em 1951, Kurt Lehovec e seus colaboradores interpretaram a eletroluminescência do carbeto de silício a partir da injeção de portadores e da recombinação radiativa (Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

O brilho anteriormente percebido como ocorrência irregular passou a ser interpretado a partir do comportamento elétrico dos semicondutores. A composição do material, o controle de impurezas e a formação de regiões com propriedades distintas permitiam modificar esse comportamento. Nas regiões do tipo n predominavam elétrons disponíveis para condução, enquanto as regiões do tipo p apresentavam lacunas, correspondentes à ausência de elétrons em determinados estados.

A formação de uma junção entre essas regiões tornou possível conduzir elétrons e lacunas para uma área comum mediante polarização direta. Durante a recombinação, parte da energia liberada pode emergir na forma de fótons. A energia desses fótons, determinada pelas propriedades eletrônicas do material, define o comprimento de onda emitido e influencia a cor percebida (Schubert, 2006).

Esse mecanismo estabeleceu uma diferença física entre o LED e as fontes luminosas baseadas no aquecimento de filamentos. No diodo, a emissão decorre das transições eletrônicas ocorridas no interior do semicondutor. Perdas energéticas e produção de calor continuam presentes nos dispositivos reais, mas a origem da luz encontra-se na recombinação dos portadores de carga.

A eficiência desse processo varia conforme a estrutura de bandas do semicondutor. Nos materiais de banda proibida direta, a recombinação entre elétrons e lacunas apresenta maior probabilidade de produzir fótons. Nos semicondutores de banda proibida indireta, a conservação do momento exige a participação de fônons da estrutura cristalina, reduzindo a probabilidade de emissão radiativa. Essa diferença orientou a procura por compostos capazes de gerar luz com intensidade, estabilidade e faixa espectral adequadas (Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

A cor adquiria, com isso, uma base material controlável. Sua formação relacionava-se à largura da banda proibida, também denominada *bandgap*, que estabelece a energia envolvida nas transições eletrônicas. Alterações na composição do semicondutor permitiam deslocar o comprimento de onda emitido. A formação da imagem eletrônica começava a receber sustentação científica, embora parte do espectro visível ainda permanecesse tecnicamente inacessível.

A ENTRADA DO LED NO ESPECTRO VISÍVEL

Os compostos formados por elementos dos grupos III e V da tabela periódica ganharam espaço nas pesquisas por apresentarem propriedades favoráveis à emissão luminosa. O arseneto de gálio, GaAs, mostrou bom desempenho em junções p-n, mas sua emissão situa-se predominantemente no infravermelho.

Sua utilidade para dispositivos emissores já estava demonstrada, embora ainda fosse necessário modificar as propriedades do material para alcançar a região visível do espectro.

A formação de ligas semicondutoras compostas por gálio, arsênio e fósforo, representadas por GaAsP, permitiu alterar a banda proibida e deslocar a emissão para comprimentos de onda visíveis. Pesquisas conduzidas no final da década de 1950 obtiveram emissão LED em junções desse material. Em 1962, Nick Holonyak Jr. e S. F. Bevacqua publicaram o resultado de uma emissão coerente vermelha, próxima de 710 nm, produzida por uma junção de GaAsP. O experimento correspondia à emissão de um diodo laser, distinta daquela produzida por um LED convencional, embora derivasse do mesmo avanço no domínio das ligas semicondutoras visíveis (Holonyak Jr.; Bevacqua, 1962; Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

Esses resultados demonstraram que a composição do semicondutor poderia ser projetada para alcançar regiões determinadas do espectro. A engenharia de materiais passava a controlar propriedades anteriormente encontradas por experimentação dispersa, convertendo o comprimento de onda emitido em parâmetro suscetível de reprodução e aperfeiçoamento. O desenvolvimento industrial dos LEDs vermelhos formou-se nesse ambiente científico, sem que a emissão LED e a emissão laser fossem tratadas como fenômenos equivalentes.

LEDs vermelhos e verdes baseados em diferentes composições passaram a ser fabricados no final da década de 1960. As intensidades ainda eram modestas, e o custo restringia usos iniciais. Mesmo assim, o LED encontrou espaço em indicadores de estado, mostradores numéricos e equipamentos eletrônicos. Nessas aplicações, a luz assumia função informacional, pois podia representar uma condição, um número ou uma resposta do circuito (Schubert, 2006).

Esse deslocamento merece atenção. Uma fonte luminosa ilumina objetos ou espaços. Um emissor controlado eletronicamente também pode carregar informação. Ao acender, apagar ou variar em resposta a um comando, o LED aproxima eletrônica e percepção visual. A imagem dependeria da multiplicação desses pontos e de sua coordenação, mas a unidade física já estava formada.

A expansão cromática continuava limitada por um obstáculo persistente. Vermelho e verde podiam ser obtidos com desempenho crescente, enquanto o azul de alta eficiência permanecia fora do alcance industrial. Essa ausência impedia a composição equilibrada de um espectro de cores e restringia o que os emissores semicondutores poderiam representar visualmente.

O DESAFIO DA LUZ AZUL

A produção de luz azul exige fótons de maior energia que os associados ao vermelho e ao verde. Por essa razão, os pesquisadores necessitavam de semicondutores com lacuna de energia mais elevada. O nitreto de gálio, GaN, apresentava propriedades compatíveis com essa meta, porém seu desenvolvimento esbarrava em problemas de crescimento cristalino e dopagem. Durante anos, produzir camadas com qualidade suficiente e formar material do tipo p mostrou-se uma tarefa resistente às técnicas disponíveis (Akasaki, 2007).

O reconhecimento das propriedades promissoras do GaN abria uma etapa de engenharia ainda mais exigente. Defeitos cristalinos, irregularidades superficiais e dificuldades de controle elétrico comprometiam a formação e o funcionamento da junção p-n. A história do LED azul demonstra que o desempenho de um material depende de sua pureza, de sua estrutura cristalina, das interfaces produzidas e dos processos empregados na fabricação. A combinação desses fatores define a passagem entre uma

propriedade prevista teoricamente e sua realização em escala tecnológica.

Em 1986, Hiroshi Amano, Norikatsu Sawaki, Isamu Akasaki e Yasuhiro Toyoda relataram o crescimento de filmes de GaN de alta qualidade sobre safira com o emprego de uma camada intermediária de nitreto de alumínio. O método reduziu problemas que prejudicavam a formação do cristal e abriu caminho para estruturas mais estáveis (Amano et al., 1986). Em 1989, o grupo associado a Akasaki e Amano obteve condução do tipo p e uma junção de GaN capaz de emitir nas regiões azul e ultravioleta (Akasaki, 2007).

Shuji Nakamura desenvolveu soluções complementares para o crescimento e a ativação do GaN, além de explorar ligas e heteroestruturas baseadas em nitreto de índio e gálio. Em 1994, Nakamura, Mukai e Senoh publicaram resultados de um LED azul de alto brilho com estrutura dupla de InGaN e AlGaIn. O dispositivo superava uma candela de intensidade luminosa e apresentava eficiência quântica externa de 2,7% nas condições relatadas pelos autores (Nakamura; Mukai; Senoh, 1994).

O reconhecimento concedido a Akasaki, Amano e Nakamura pelo Prêmio Nobel de Física de 2014 correspondeu a um processo acumulativo. Crescimento de cristais, dopagem, formação de junções, heteroestruturas e controle da emissão precisaram avançar em conjunto. A Academia Real Sueca de Ciências descreveu o LED azul eficiente como resultado de uma longa sequência de progressos em física de materiais, fabricação de cristais e arquitetura de dispositivos (Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

Com o azul, a luz semicondutora ganhou uma faixa cromática que alterou os limites dos sistemas visuais. A combinação de emissores vermelhos, verdes e azuis permite formar numerosas cores por síntese aditiva, variando a intensidade relativa de cada componente. A conquista possuía efeitos diretos

sobre iluminação, sinalização e reprodução de imagens, sem que esses campos precisassem compartilhar a mesma configuração construtiva.

QUANDO A LUZ PASSOU A COMPOR IMAGENS

A conversão da luz semicondutora em imagem ocorreu de maneira gradual. Os LEDs ingressaram nos equipamentos eletrônicos como indicadores de estado, passaram a compor mostradores numéricos e alfanuméricos e, posteriormente, foram organizados em conjuntos monocromáticos ou cromaticamente limitados. A coordenação de unidades luminosas posicionadas e comandadas individualmente permitiu formar textos, contornos e movimentos antes da disponibilidade do azul eficiente. Com a consolidação desse emissor, os sistemas RGB alcançaram uma reprodução cromática muito mais ampla.

A síntese aditiva forneceu a base cromática dos sistemas de cores plenas. Emissores vermelhos, verdes e azuis, controlados em diferentes proporções, estimulam a percepção de numerosas tonalidades pelo sistema visual humano. A cor apresentada passa, assim, a depender da intensidade relativa atribuída eletronicamente a cada componente, em vez de permanecer fixada na emissão de um único material (Schubert, 2006).

Essa mudança reúne duas histórias que durante muito tempo avançaram separadamente. Uma delas pertence aos materiais capazes de emitir luz. A outra corresponde aos circuitos aptos a comandar sinais, endereçar posições e alterar estados com rapidez. O painel eletrônico surge quando emissão e controle passam a integrar o mesmo sistema visual.

A resposta direta ao comando elétrico e as dimensões reduzidas dos LEDs favoreceram sua disposição em conjuntos luminosos. Em um painel contemporâneo, contudo, a imagem percebida resulta de uma arquitetura na qual uniformidade,

alinhamento, alimentação, processamento do sinal e proteção física atuam de modo coordenado. Para quem examina o painel por sua constituição técnica, cada conteúdo exibido manifesta a integração entre emissão, comando eletrônico e organização estrutural. A luz tornou-se matéria de imagem quando essas dimensões passaram a operar como partes interdependentes de um mesmo sistema.

O ponto luminoso observado no carbetto de silício em 1907 ainda estava distante das estruturas que seriam reconhecidas como telas. O princípio físico da emissão semicondutora, entretanto, atravessou toda a evolução posterior. O domínio crescente dos materiais, do espectro, da eficiência e dos sistemas de comando converteu um fenômeno instável em componente de uma arquitetura visual programável. A história do LED pode ser compreendida como a progressiva aproximação entre descoberta científica, fabricação controlada e projeto tecnológico.

Quando os emissores passaram a ser produzidos com maior regularidade, surgiu uma nova questão industrial. Era preciso encapsulá-los, conectá-los, protegê-los e organizá-los em conjuntos capazes de ocupar áreas maiores. A resposta inicial a esse desafio deu forma aos painéis baseados em componentes de inserção, conhecidos pela sigla DIP. A luz já podia carregar informação. Restava convertê-la em estrutura visual ampliada.

CAPÍTULO II

OS PRIMEIROS PAINÉIS E A ERA DIP

Transformar o LED em fonte de imagem exigiu uma mudança de escala. O componente que antes sinalizava o estado de um circuito precisou ser repetido, endereçado e integrado a uma estrutura capaz de apresentar informações sobre uma área maior. Esse percurso começou com mostradores compactos e alcançou painéis formados por milhares de emissores, nos quais eletrônica, óptica e construção física passaram a determinar conjuntamente o que o observador conseguia ver.

O encapsulamento de inserção conhecido no setor pela sigla DIP ocupou uma posição central nesse processo. Sua forma permitia fixar LEDs individuais em placas de circuito impresso, orientar a emissão luminosa e construir conjuntos resistentes. A solução favoreceu painéis destinados à sinalização e à visualização em ambientes externos, embora a dimensão dos componentes e a separação física entre as cores impusessem limites à densidade da imagem.

A era DIP consolidou uma arquitetura capaz de ampliar o alcance visual dos LEDs e sustentar a montagem de superfícies modulares de grandes dimensões. As escolhas construtivas que favoreceram brilho, resistência e visibilidade a distância também estabeleceram limites para a densidade de pixels, a uniformidade cromática e a quantidade de conexões. Essas condições prepararam a procura por componentes menores e processos de montagem mais compactos.

DOS MOSTRADORES ÀS MATRIZES LUMINOSAS

Os displays comerciais iniciais baseados em LED apresentavam números e sinais simples. Em 1969, a Hewlett-Packard descreveu o modelo 5082-7000, um indicador numérico formado por 28 diodos vermelhos de GaAsP, dos quais 27 compunham uma matriz destinada aos algarismos e um funcionava como ponto decimal. O módulo recebia sinais em código decimal binário e utilizava circuito integrado para selecionar os pontos correspondentes a cada número (Borden; Pighini, 1969).

Esse dispositivo ainda não correspondia a um painel de vídeo, mas reuniu princípios que permaneceriam na evolução posterior. Os emissores ocupavam posições determinadas, o circuito traduzia dados em padrões luminosos e a informação surgia da ativação coordenada dos pontos. A relevância histórica do módulo reside na associação entre matriz emissora e comando eletrônico, relação que permitiria ampliar o repertório de caracteres e, depois, construir imagens em movimento.

Em 1970, Howard Borden e Robert Steward apresentaram displays alfanuméricos de operação dinâmica. As linhas das matrizes eram selecionadas sucessivamente, enquanto os circuitos de coluna determinavam quais LEDs deveriam emitir em cada intervalo. Em frequências superiores ao limite de percepção da cintilação, a sucessão de pulsos produzia a aparência de caracteres continuamente iluminados (Borden; Steward, 1970).

A varredura permitia compartilhar circuitos de temporização, memória e geração de caracteres entre diferentes posições do display. Esse arranjo reduzia o número de terminais e de circuitos dedicados, tornando viável o controle de matrizes maiores. Com o aumento da quantidade de pontos, dados, frequência de atualização e corrente de acionamento passaram a constituir dimensões inseparáveis do desempenho visual.

Os mostradores numéricos, as matrizes alfanuméricas e os letreiros eletrônicos pertencem, portanto, à formação histórica dos painéis de LED. Eles demonstraram que a superfície luminosa poderia ser composta por unidades repetíveis e comandada por informação digital. A ampliação dessa superfície dependeria de componentes que reunissem emissão eficiente, montagem industrial e resistência física, condições nas quais os LEDs de inserção ganharam espaço.

O ENCAPSULAMENTO QUE DEU FORMA AO PAINEL

Na eletrônica, DIP corresponde originalmente a dual in-line package, encapsulamento caracterizado por duas fileiras paralelas de terminais. O módulo alfanumérico HP 5082-7102, descrito em 1970, utilizava essa configuração. No setor de painéis, contudo, a sigla adquiriu emprego mais amplo e passou a identificar LEDs discretos montados por inserção, também denominados through-hole. Nessa montagem, os terminais atravessam os furos da placa de circuito impresso e recebem solda na face oposta (Borden; Steward, 1970; Cree LED, [s.d.]).

O componente visível possui uma arquitetura interna delicada. O chip semiconductor é fixado a uma base condutora, ligado aos terminais por conexões metálicas e envolvido por material transparente. O encapsulante protege o conjunto e participa do desempenho óptico, pois sua geometria interfere na extração e na direção da luz. A forma externa semelhante a uma pequena lente integra proteção mecânica e distribuição luminosa em uma mesma peça (Liu; Luo, 2011; Moreno; Bermúdez; Avendaño-Alejo, 2010).

Essa configuração favoreceu a produção de módulos constituídos por numerosos emissores discretos. Os terminais atravessavam a placa, recebiam solda e estabeleciam uma fixação mecânica associada à conexão elétrica. Na face frontal, o corpo do

LED permanecia saliente e podia ser combinado com superfícies escuras, máscaras e elementos de sombreamento destinados a preservar o contraste sob iluminação ambiente.

O formato da lente também permitia direcionar a intensidade para faixas de observação específicas. Componentes redondos ou ovais podiam distribuir a luz de modo diferente nos eixos horizontal e vertical, propriedade útil quando o painel precisava alcançar espectadores espalhados lateralmente sem desperdiçar a mesma intensidade em todas as direções. A óptica do encapsulamento passou, com isso, a integrar a arquitetura do painel, em vez de atuar como acabamento externo.

A adequação dos LEDs de inserção a condições ambientais exigentes tornou-se uma das vantagens duradouras dessa arquitetura. A documentação contemporânea da Cree LED apresenta componentes through-hole com epóxi de grau óptico formulado para resistência a temperaturas elevadas e umidade, destinados a painéis de vídeo, letreiros digitais e sistemas de informação externos (Cree LED, [s.d.]). Sua permanência nessas aplicações demonstra que a sucessão tecnológica ocorre por redistribuição de usos, e não por desaparecimento imediato das soluções anteriores.

QUANDO TRÊS CORES FORMARAM O PIXEL

Nos sistemas monocromáticos, cada posição podia ser representada por um emissor vermelho, âmbar ou verde. A informação dependia principalmente da presença, da ausência ou da variação de intensidade desse ponto. Textos, números e símbolos exigiam menos diversidade cromática que uma imagem de vídeo, razão pela qual os letreiros e placares figuraram entre as aplicações compatíveis com as cores disponíveis nas décadas iniciais.

A consolidação do LED azul de alto brilho, durante a década de 1990, completou o conjunto de emissores necessário à formação eficiente de sistemas RGB. Os painéis monocromáticos e cromaticamente limitados já possuíam trajetória industrial, mas a combinação entre vermelho, verde e azul ampliou expressivamente a reprodução de tonalidades. Nos painéis DIP de cores plenas, cada pixel era formado por lâmpadas fisicamente separadas, cuja quantidade e disposição variavam entre projetos. O controle das intensidades relativas convertia esse agrupamento em uma unidade cromática percebida pelo observador (Royal Swedish Academy of Sciences, 2014).

A palavra pixel designa a menor unidade controlável da imagem, mas sua constituição física varia entre tecnologias. Em uma estrutura DIP RGB, o pixel não corresponde necessariamente a um corpo único. Ele resulta da coordenação de componentes próximos, cada um responsável por uma cor primária. O sistema precisa fazer com que três fontes espacialmente separadas sejam percebidas como uma unidade cromática coerente.

Essa integração depende da distância. Quando o observador se afasta, o ângulo visual entre os emissores diminui e as cores tendem a se combinar perceptualmente. Em uma observação próxima, os componentes individuais e os intervalos entre eles tornam-se mais perceptíveis. A qualidade da imagem não se encontra, portanto, inteiramente no painel. Ela surge da relação entre dimensões físicas, conteúdo exibido e posição do público.

O agrupamento RGB também introduziu exigências de calibração. Diferenças de intensidade entre lotes, variações de comprimento de onda e alterações de desempenho ao longo do uso podiam deslocar o equilíbrio cromático. A formação de branco ou de tons intermediários dependia da correspondência entre emissores que possuíam materiais, tensões e respostas luminosas distintas. A estabilidade do pixel exigia, portanto, coordenação elétrica e óptica.

A IMAGEM DESENHADA PARA A DISTÂNCIA

Os painéis de grande área dessa fase devem ser avaliados de acordo com a distância para a qual foram concebidos. Rodovias, fachadas, arenas, placares e publicidade exteriores oferecem condições de observação distintas daquelas encontradas diante de uma tela próxima. Um espaçamento que revela pontos separados de perto pode formar letras e imagens reconhecíveis quando visto da posição prevista pelo projeto.

O espaçamento entre os centros de pixels, denominado pixel pitch, condiciona a quantidade de pontos distribuídos em determinada área. Nos painéis DIP, o diâmetro dos encapsulamentos, os furos destinados aos terminais e a disposição separada das lâmpadas RGB limitavam a aproximação física entre os pixels. A resolução disponível resultava da relação entre as dimensões do painel e o número de unidades luminosas comportadas pela estrutura.

Um pixel pitch amplo podia constituir uma escolha coerente para mensagens breves, números, logotipos e imagens observadas a longa distância. Nessas condições, intensidade luminosa, contraste e reconhecimento rápido possuíam maior peso do que a reprodução de detalhes finos. Os componentes salientes e as lentes direcionais dos LEDs DIP mostravam-se compatíveis com aplicações de grande escala concebidas para leitura distante.

A modularidade tornou possível ampliar os displays pela repetição de unidades padronizadas. Placas, módulos e gabinetes podiam ser combinados conforme as dimensões requeridas, enquanto estruturas maiores distribuíam alimentação, dados e sustentação. A escala do painel passou a resultar da integração entre unidades menores, condição que também distribuiu as etapas de fabricação, instalação, diagnóstico e substituição de componentes.

Essa arquitetura permitiu adaptar largura, altura e formato às condições de uso, mas também incorporou as emendas ao desempenho visual. Desalinhamentos entre módulos, diferenças de brilho e variações cromáticas podiam revelar a divisão interna da tela. A superfície percebida como contínua era produzida por uma construção descontínua, cujo resultado dependia da precisão com que as partes eram instaladas e ajustadas.

O CUSTO TÉCNICO DA ESCALA

A multiplicação dos pontos luminosos ampliou simultaneamente o número de conexões. Cada LED inserido acrescentava terminais, furos e juntas de solda à placa. Sob o olhar de quem projeta, testa ou repara um módulo, a imagem se revela como uma rede de componentes, trilhas, soldas e circuitos interdependentes. Quanto maior a tela, maior era a quantidade de elementos sujeitos a diferenças de fabricação, esforço mecânico, umidade, aquecimento e envelhecimento.

Essa característica influenciava a manutenção. A falha de um emissor podia produzir um ponto apagado ou alterar uma cor específica, enquanto problemas em circuitos de linha, coluna ou alimentação atingiam conjuntos maiores. O diagnóstico precisava reconhecer a escala do defeito antes da intervenção. A evolução desse trabalho será examinada em capítulo próprio, mas sua origem está na arquitetura distribuída consolidada durante a era DIP.

A demanda energética não pode ser atribuída isoladamente ao encapsulamento de inserção. Em 1969, pesquisadores da Hewlett-Packard estimaram que um arranjo de diodos com um pé quadrado, operando com luminância de cinquenta footlamberts, poderia demandar aproximadamente um quilowatt com os materiais então disponíveis (Borden; Pighini, 1969). Como antecede os painéis DIP de cores plenas, essa estimativa constitui um registro das limitações dos emissores daquele período, e não

um parâmetro universal para configurações posteriores. Avanços na eficiência quântica interna, na extração luminosa e na arquitetura dos dispositivos elevaram a quantidade de luz produzida por unidade de energia (Krames et al., 2007).

A comparação entre gerações também exige distinguir potência máxima de consumo efetivo. A primeira representa uma condição-limite de operação, enquanto o segundo varia conforme o brilho, o conteúdo exibido e o regime de funcionamento. A eficiência energética não se esgota na potência nominal nem em uma característica construtiva isolada, pois depende do comportamento do conjunto em operação.

O compromisso construtivo da arquitetura DIP situava-se na relação entre intensidade luminosa e densidade de pixels. Os componentes salientes e as lentes direcionais favoreciam a emissão luminosa e a visibilidade sob elevada iluminação ambiente. Em contrapartida, as dimensões físicas dos LEDs e a disposição separada dos emissores vermelho, verde e azul limitavam a redução do espaçamento entre os pixels. Em distâncias curtas, essa configuração tornava mais perceptíveis a textura da superfície, os intervalos entre os emissores e a estrutura interna de cada pixel.

O LIMITE QUE PREPAROU A MUDANÇA

Ao final desse ciclo, a indústria já dominava a construção de superfícies visuais por meio da repetição de emissores, módulos e gabinetes. A arquitetura DIP consolidou soluções para sinalização viária, placares, fachadas e publicidade exterior, nas quais intensidade, alcance e resistência ambiental ocupavam posição central.

A ampliação dos usos introduziu outras exigências. Ambientes com menor distância de observação requeriam pixels mais próximos, mistura cromática mais uniforme e posicionamento mais preciso dos componentes. A montagem

superficial ofereceu menor ocupação física na placa e processos industriais compatíveis com o aumento da densidade.

Nos encapsulamentos SMD multicoloridos, os chips vermelho, verde e azul podiam compartilhar um corpo compacto, reduzindo a separação interna do pixel. A montagem SMD também abrangia componentes de cor única, razão pela qual a integração RGB deve ser compreendida como uma configuração dessa tecnologia, e não como sua definição geral. Produtos contemporâneos demonstram que um componente RGB de montagem superficial pode substituir vários LEDs through-hole em determinadas aplicações (Cree LED, 2023).

A transição ampliou o repertório construtivo dos painéis. O DIP permaneceu adequado aos projetos que valorizavam brilho direcional e operação externa, enquanto o SMD abriu espaço para maior densidade e observação próxima. A transformação seguinte ocorreria na forma de encapsular os chips, posicionar as cores e executar a montagem sobre a placa.

CAPÍTULO III

A VIRADA TECNOLÓGICA COM O SMD

A transição do DIP para o SMD preservou o princípio físico da emissão luminosa e modificou a forma pela qual o LED ocupava a placa. Aos componentes com terminais inseridos em furos e soldados na face oposta somaram-se dispositivos fixados sobre áreas metálicas da superfície. A nova configuração reduziu a ocupação física das conexões, reorganizou a fabricação dos módulos e introduziu outras condições de manutenção.

A montagem superficial já integrava a indústria eletrônica antes de adquirir presença expressiva nos painéis de LED. Em 1986, Garner e Taylor publicaram um estudo dedicado ao encapsulamento superficial, demonstrando que essa tecnologia já constituía um campo definido de desenvolvimento industrial. Sua incorporação aos displays dependeu da convergência entre componentes compactos, processos automatizados e emissores com desempenho óptico compatível com a formação de imagens (Garner; Taylor, 1986).

No início dos anos 2000, catálogos comerciais já apresentavam famílias de LEDs SMD em encapsulamentos padronizados, com diferentes cores, processos de soldagem por refusão e aplicações em letreiros eletrônicos e sinais de mensagem variável. A documentação da Agilent Technologies, publicada em 2002, registrava modelos vermelhos, verdes, azuis e de outras faixas cromáticas em componentes de montagem superficial destinados a sistemas de sinalização (Agilent Technologies, 2002).

Essa etapa antecede a difusão dos pixels RGB compactos em telas de maior densidade. A transição ocorreu por acumulação de avanços em materiais, encapsulamentos, equipamentos de montagem, circuitos de acionamento e controle de fabricação. O

SMD alterou o painel porque tornou possível aproximar os emissores e repetir essa aproximação em escala industrial.

DA INSERÇÃO À MONTAGEM SUPERFICIAL

As siglas SMD e SMT descrevem elementos relacionados, mas distintos. SMD corresponde a *surface mount device*, denominação do componente desenvolvido para montagem sobre a placa. SMT significa *surface mount technology* e identifica o conjunto de processos empregados para posicionar e soldar esses dispositivos. No vocabulário dos painéis, SMD tornou-se o nome usual da arquitetura que utiliza LEDs dessa categoria.

Na montagem por inserção, os terminais atravessam a placa de circuito impresso e ocupam furos metalizados. Na montagem superficial, os contatos do componente repousam sobre áreas condutoras denominadas *pads*. A conexão elétrica e a fixação mecânica são produzidas pela solda depositada entre esses contatos e a superfície da placa.

A mudança dispensou os furos destinados aos terminais de cada LED e reduziu o espaço ocupado pelas conexões. Essa vantagem adquiriu maior relevância em módulos compostos por milhares de emissores, pois pequenas reduções nas dimensões de cada componente produziam efeitos cumulativos sobre toda a superfície visual.

O processo industrial passou a reunir etapas encadeadas. A pasta de solda é depositada nos *pads* por meio de uma máscara metálica, os componentes são retirados de fitas ou carretéis e posicionados por equipamentos automatizados, e a placa atravessa um forno no qual o perfil térmico promove a refusão da solda. A montagem termina com inspeções destinadas a identificar deslocamentos, pontes, ausência de conexão e irregularidades no depósito de material (Nichia Corporation, 2021).

A automação ampliou a capacidade de repetir posições em espaços menores, mas também tornou o resultado dependente do controle de processo. Volume de pasta, desenho dos *pads*, abertura da máscara, alinhamento, velocidade de posicionamento e curva térmica passaram a interferir na integridade do módulo. A precisão deixou de se concentrar no encaixe individual dos terminais e passou a abranger toda a linha de fabricação.

O avanço tampouco ocorreu por substituição imediata. Durante um período extenso, placas eletrônicas combinaram componentes inseridos e dispositivos de montagem superficial. Essa convivência permitiu conservar conectores, elementos estruturais e peças maiores em montagem por inserção, enquanto LEDs, resistores, capacitores e circuitos integrados migravam para configurações mais compactas.

O COMPONENTE MENOR E A NOVA ORGANIZAÇÃO DA PLACA

A aparência externa reduzida do SMD preserva uma estrutura interna formada por diferentes materiais. O chip emissor é fixado sobre uma base condutora, conectado aos contatos elétricos e protegido por resina ou silicone. Refletores, terminais, encapsulantes e superfícies ópticas são organizados de acordo com a emissão pretendida e com as condições de montagem (Liu; Luo, 2011).

Um LED SMD pode conter uma cor, duas cores, três chips RGB ou outras configurações. A tecnologia se define pela forma de montagem do componente, e não pela quantidade de emissores presentes no encapsulamento. Os modelos PLCC-2 comercializados pela Agilent Technologies em 2002, por exemplo, eram componentes SMD de cor individual, embora a família oferecesse diversas faixas cromáticas (Agilent Technologies, 2002).

Essa distinção esclarece a evolução dos painéis. A montagem superficial criou condições para componentes menores, mas a formação de um pixel RGB compacto dependeu do desenvolvimento de encapsulamentos multicolores. Foi a combinação entre essas duas possibilidades que modificou a aparência das telas de vídeo.

A redução do encapsulamento modificou a distribuição da área frontal do módulo. Componentes mais baixos e compactos liberaram espaço entre os pontos luminosos, permitindo o emprego de máscaras e acabamentos destinados ao controle da reflexão ambiente. O contraste resultante, contudo, depende da combinação entre dimensões do LED, cor do corpo, tratamento da superfície e configuração do módulo. A ficha do UHD1110-FKA, por exemplo, relaciona superfície fosca, controle de interferência óptica e alto contraste em um encapsulamento RGB de $1,0 \times 1,0$ milímetro (Cree LED, 2024).

O desempenho óptico continuou condicionado ao desenho de cada encapsulamento. Ângulo de emissão, intensidade, contraste e distribuição luminosa variam conforme a geometria, os materiais e a presença de lentes ou refletores. O termo SMD, isoladamente, não garante maior abertura angular ou melhor desempenho cromático.

A miniaturização do encapsulamento não implica, por si, menor consumo. Ao concentrar maior número de emissores na mesma área, ela pode ampliar as solicitações elétricas e térmicas do conjunto, ainda que os chips empregados apresentem maior eficiência luminosa.

TRÊS CHIPS EM UM ÚNICO ENCAPSULAMENTO

Nos painéis DIP de cores plenas, o pixel era formado por lâmpadas vermelhas, verdes e azuis fisicamente separadas. A arquitetura SMD multicolorida permitiu acomodar os três chips

dentro de um corpo compacto. Essa configuração ficou conhecida no setor como *three-in-one* ou três em um.

Os três chips permanecem eletricamente controláveis de forma independente, mesmo quando compartilham o mesmo encapsulamento. Os circuitos regulam a intensidade de cada canal cromático, enquanto a menor separação física aproxima as áreas emissoras que formam o pixel. O componente reúne as cores em uma estrutura compacta sem convertê-las em uma fonte luminosa indivisível.

Essa aproximação favorece a mistura perceptiva em distâncias menores. Nos arranjos DIP, o observador próximo distingue com maior facilidade as lâmpadas vermelha, verde e azul que compõem o pixel. Nos componentes SMD multicolores, a separação reduzida diminui a fragmentação espacial das cores. A uniformidade observada em diferentes ângulos continua condicionada à geometria do encapsulamento, à distribuição luminosa e à calibração do painel.

A melhoria, contudo, depende de outros fatores. Variações de comprimento de onda, intensidade, corrente e resposta térmica continuam produzindo diferenças entre pixels. A qualidade cromática requer seleção de componentes, calibração eletrônica e controle das intensidades relativas. Aproximar os chips reduz a separação espacial, mas não corrige automaticamente todas as variações do sistema.

O encapsulamento participa ainda do contraste. Superfícies escuras e acabamentos foscos diminuem a reflexão da iluminação ambiente e tornam menos visível a estrutura interna quando o pixel permanece apagado. Componentes contemporâneos destinados a telas de vídeo combinam corpo compacto, superfície fosca e recursos para reduzir interferências ópticas entre os chips (Cree LED, 2024).

A formação do branco demonstra que a integração física dos chips não elimina a necessidade de equilíbrio entre os canais. Sua percepção depende da combinação controlada das intensidades de vermelho, verde e azul. Variações de corrente, comprimento de onda ou emissão luminosa em um dos chips podem modificar a temperatura de cor e a uniformidade, ainda que os três permaneçam operantes. O pixel compacto reduz a fragmentação espacial, enquanto a calibração preserva a coerência cromática do conjunto.

A MINIATURIZAÇÃO QUE MUDOU A ESCALA DA IMAGEM

A redução do encapsulamento permitiu aproximar os pixels e distribuir mais unidades luminosas em determinada área. Essa relação estabeleceu as condições físicas para painéis destinados a distâncias menores de observação, nos quais letras, contornos e movimentos exigiam maior quantidade de pontos.

O desenvolvimento permaneceu gradual. Encapsulamentos SMD com dimensões próximas de três milímetros coexistiram com componentes progressivamente menores. Produtos atuais destinados a telas de vídeo chegam a dimensões de um milímetro por um milímetro, indicando até onde a miniaturização avançou dentro da própria família SMD (Cree LED, 2024).

O tamanho do componente estabelece uma possibilidade, e não o espaçamento final do painel. Trilhas, *pads*, circuitos de acionamento, máscaras, tolerâncias de montagem e dissipação térmica também ocupam espaço. O menor encapsulamento precisa integrar uma arquitetura capaz de alimentá-lo, comandá-lo e mantê-lo dentro de condições estáveis.

O aumento da densidade modifica a complexidade eletrônica do módulo. Mais pixels representam maior quantidade de canais cromáticos e maior volume de dados a ser transferido dentro de

cada intervalo de atualização. Enquanto a superfície visual adquire maior continuidade, a placa concentra conexões, circuitos de acionamento e pontos cujo desempenho precisa permanecer sincronizado.

A transformação ampliou os ambientes compatíveis com painéis de LED. A imagem deixou de depender predominantemente das grandes distâncias encontradas em rodovias, arenas e fachadas. Auditórios, lojas, estúdios, centros de controle, templos e eventos passaram a utilizar telas diante das quais o público podia permanecer relativamente próximo.

A aproximação entre os pixels criou uma questão de projeto. A quantidade de pontos deve ser coerente com a dimensão física da tela e com o lugar ocupado pelo observador. O encapsulamento SMD abriu essa possibilidade, mas a compreensão de seus resultados exige examinar *pixel pitch*, resolução e densidade visual como relações interdependentes.

QUANDO A PRECISÃO MIGROU PARA O PROCESSO

A redução das dimensões transferiu parte da precisão do produto para o processo de montagem. Quantidade e distribuição da pasta de solda, desenho dos *pads*, alinhamento e pressão de posicionamento interferem no assentamento do LED. Em matrizes densas, desvios localizados podem produzir diferenças perceptíveis quando se repetem ao longo da superfície (Nichia Corporation, 2021).

A soldagem por refusão também requer compatibilidade entre o componente, a pasta, a placa e o perfil térmico. Condições inadequadas podem comprometer a formação da junta, alterar a posição do LED ou afetar suas propriedades ópticas. A fabricação do módulo depende, portanto, da continuidade entre impressão da solda, posicionamento, aquecimento, resfriamento e inspeção.

O armazenamento integra esse controle. Encapsulamentos sensíveis à umidade devem ser montados dentro do período estabelecido para seu nível de sensibilidade. Quando o componente absorve umidade e é submetido à temperatura da refusão, a vaporização interna pode expandir o encapsulamento e provocar delaminação. As orientações da Nichia demonstram que preparação, armazenamento e montagem pertencem ao mesmo sistema de qualidade (Nichia Corporation, 2023, 2024).

Descargas eletrostáticas podem reduzir a intensidade luminosa ou provocar falha completa, mesmo sem marcas externas imediatamente visíveis. Pressão sobre a área emissora e flexão da placa também podem danificar o encapsulamento ou suas conexões internas. O controle de manuseio requer estações e ferramentas aterradas, materiais dissipativos e procedimentos que reduzam esforços mecânicos sobre a placa montada (Nichia Corporation, 2023).

A manutenção passou a operar em outra escala física. Nos componentes DIP, os terminais atravessam a placa e as juntas de solda permanecem acessíveis na face oposta. Nos módulos SMD, contatos menores e componentes próximos exigem ampliação, controle localizado de temperatura e precisão durante a remoção e o reposicionamento. A facilidade do reparo também depende do desenho do módulo e do acesso oferecido pela montagem.

A experiência de Douglas com soldagem SMD, diagnóstico eletrônico, desenvolvimento de placas e prototipagem adquire sentido dentro dessa transformação. A imagem defeituosa fornece o sintoma inicial, mas não identifica por si mesma a origem da falha. Uma cor ausente, uma intensidade irregular ou um acionamento intermitente pode estar relacionado ao LED, à junta de solda, à trilha, ao circuito de acionamento, à alimentação ou à cadeia de sinal.

O diagnóstico requer relacionar o comportamento visual às condições elétricas da matriz. A observação orienta a sequência dos

testes, enquanto a confirmação depende da leitura da placa e da compreensão das conexões que sustentam cada pixel. O trabalho técnico deixa de se restringir à substituição do emissor visivelmente apagado e passa a examinar o sistema no qual ele está inserido.

A estratégia de manutenção varia conforme o projeto. Alguns módulos permitem substituição de componentes em bancada, enquanto outros favorecem a troca da unidade completa e o reparo posterior. Custo, disponibilidade, urgência operacional, densidade e risco de danos às peças vizinhas interferem nessa decisão. A evolução tecnológica alterou simultaneamente o componente e o modo de organizar a intervenção.

UMA TRANSIÇÃO FEITA DE ESCOLHAS

A expansão do SMD não eliminou a arquitetura DIP, mas redistribuiu os campos de aplicação. Componentes de inserção permaneceram competitivos em projetos orientados por intensidade direcional e visibilidade a longa distância, enquanto os encapsulamentos superficiais ampliaram as possibilidades de densidade, observação próxima e integração cromática.

A divisão rígida entre DIP externo e SMD interno deixou de representar o repertório tecnológico disponível. O modelo CLMWB-FKA, por exemplo, é um LED SMD RGB destinado a telas externas, com encapsulante dotado de inibidores de radiação ultravioleta, alta intensidade e amplo ângulo de emissão. Sua classificação IPX8 foi obtida com o componente montado em placa e com o caminho elétrico isolado por silicone. A área dos terminais requer proteção complementar contra umidade no projeto externo (Cree LED, 2025).

A escolha da arquitetura depende das condições de uso, da distância de observação, da iluminação ambiente, da densidade requerida, da exposição climática e da estratégia de manutenção. DIP e SMD não representam etapas absolutas de inferioridade e

superioridade, mas soluções construtivas cujas propriedades precisam corresponder às exigências do painel.

A virada tecnológica produzida pelo SMD consistiu na reorganização da superfície luminosa e do processo industrial. A aproximação das cores e a redução dos componentes favoreceram maior continuidade visual, enquanto a placa passou a concentrar conexões e exigências de fabricação. O avanço da imagem correspondeu, simultaneamente, ao aumento da precisão necessária para produzi-la e mantê-la.

Essa transformação abriu uma escala inteiramente nova para a imagem de LED. Saber que os componentes podem ser aproximados, entretanto, ainda não esclarece quantos pixels uma tela deve reunir nem a distância a partir da qual eles formam uma imagem coerente. Essas relações pertencem ao estudo do *pixel pitch*, da resolução e da densidade visual.

CAPÍTULO IV

PITCH, RESOLUÇÃO E DENSIDADE VISUAL

Uma tela de LED pode apresentar duas aparências distintas sem que qualquer componente seja alterado. Observada de perto, revela pontos luminosos, intervalos e a estrutura física dos módulos. Vista da posição para a qual foi projetada, essa mesma superfície passa a formar letras, contornos, cores e movimentos aparentemente contínuos. A transformação ocorre na relação entre seus pixels e o olhar do observador.

A miniaturização examinada no capítulo anterior permitiu aproximar os componentes e ampliar a quantidade de pontos luminosos em determinada área. Essa possibilidade introduziu uma decisão que ultrapassa o tamanho do encapsulamento. Tornou-se necessário definir quanto espaço existiria entre os pixels, quantos pontos comporiam a tela e a partir de qual distância o público perceberia a imagem de modo coerente.

Nesse contexto, o pixel pitch tornou-se uma das especificações mais conhecidas dos painéis de LED. Seu valor, contudo, não descreve isoladamente a qualidade da tela, que também depende das dimensões do painel, da resolução total, do conteúdo, da iluminação ambiente e da posição do observador.

Compreender essas relações evita escolhas desproporcionais. Quando o público permanece próximo, espaçamentos amplos podem limitar detalhes; em distâncias maiores, uma densidade muito elevada pode ampliar o investimento sem modificar de maneira equivalente a percepção da imagem. O projeto amadurece quando o número de pixels passa a responder à distância, ao conteúdo e às condições do ambiente.

O ESPAÇO ENTRE OS PIXELS

O termo pixel pitch designa a distância, medida em milímetros, entre o centro de um pixel e o centro do pixel adjacente. Em um painel P4, esses centros estão separados por quatro milímetros. Em um P2, a separação corresponde a dois milímetros. A letra P tornou-se uma forma comercial abreviada de apresentar uma medida física que interfere diretamente na quantidade de pontos luminosos distribuídos pela tela (Planar Systems, 2021).

Essa medida não corresponde ao tamanho externo do LED. Um encapsulamento pode ocupar parte do espaço disponível e permanecer cercado pela máscara, pela placa ou por elementos de proteção. O pitch considera a repetição entre os centros dos pixels, independentemente da dimensão visível de cada componente. Confundir as duas medidas conduz a interpretações equivocadas sobre a densidade do módulo.

A redução do pitch aproxima os pontos luminosos. Em um metro linear, um painel P10 pode distribuir cerca de cem pixels, enquanto um P2 alcança aproximadamente quinhentos. Quando a comparação se estende à área, a diferença cresce em duas direções. Um metro quadrado comporta cerca de dez mil pixels em P10 e duzentos e cinquenta mil em P2.

Essa progressão explica por que a mudança não pode ser avaliada como simples redução numérica. Ao diminuir o espaçamento pela metade, dobra-se a quantidade de pixels tanto na largura quanto na altura. A densidade por área torna-se quatro vezes maior. O salto de P4 para P2, por exemplo, representa a passagem aproximada de sessenta e dois mil e quinhentos para duzentos e cinquenta mil pixels por metro quadrado.

Os avanços do encapsulamento SMD ampliaram a viabilidade de espaçamentos menores, mas o valor mais baixo disponível não constitui escolha universal. Um painel destinado a

uma fachada observada do outro lado de uma avenida estabelece uma relação visual diferente daquela encontrada em uma vitrine, em uma sala de reunião ou em um estúdio. A medida ganha sentido quando vinculada ao modo de uso.

O pitch funciona, portanto, como ponto de partida para o projeto visual. Ele informa a proximidade física entre os pixels, mas não revela sozinho quantos pontos formarão a imagem, qual conteúdo será exibido ou de onde o público observará a tela. Essas respostas dependem da relação entre espaçamento, dimensões e resolução.

PITCH, DENSIDADE E RESOLUÇÃO

Três conceitos frequentemente aparecem como se fossem equivalentes. Pitch é a distância entre pixels. Densidade é a quantidade de pixels existente em determinada área. Resolução é o número total de pixels organizados na largura e na altura da tela. As três grandezas se relacionam, porém descrevem aspectos distintos da superfície visual.

A resolução depende simultaneamente do pitch e das dimensões físicas. Em termos aproximados, divide-se a largura útil da tela, em milímetros, pelo valor do pitch para estimar a quantidade horizontal de pixels. O mesmo raciocínio se aplica à altura. Na fabricação real, as dimensões são ajustadas aos módulos e gabinetes disponíveis, de modo que o resultado corresponda a números inteiros e à arquitetura do produto.

Uma tela com 3,84 metros de largura e 2,16 metros de altura, montada em P4, pode alcançar uma matriz de 960 por 540 pixels. Conservadas as mesmas dimensões e adotado o P2, a matriz passa a 1.920 por 1.080 pixels. O espaço ocupado pela instalação permanece semelhante, mas a quantidade total cresce de 518.400 para 2.073.600 pixels.

O exemplo demonstra porque a classificação P2 não equivale a Full HD. Essa resolução surge porque o espaçamento de dois milímetros foi combinado com 3,84 por 2,16 metros. Uma tela P2 menor reunirá menos pixels, enquanto uma tela P4 muito maior poderá ultrapassar a resolução total de uma instalação compacta em P2.

As matrizes de 1.920×1.080 e 3.840×2.160 pixels representam padrões de imagem, e não dimensões físicas predeterminadas. A primeira integra os parâmetros estabelecidos para HDTV, enquanto a segunda compõe, juntamente com 7.680×4.320 , os sistemas de UHDTV reconhecidos internacionalmente. No mercado, a matriz de 3.840×2.160 costuma receber a denominação 4K UHD. Em painéis modulares, alcançar essas resoluções depende da combinação entre pitch, quantidade de módulos e relação de aspecto (International Telecommunication Union, 2015a, 2015b).

A relação de aspecto interfere na apresentação do conteúdo. Uma matriz 16:9 recebe vídeos produzidos nesse formato com menor necessidade de recorte ou adaptação. Telas alongadas, verticais ou curvas podem corresponder melhor ao espaço arquitetônico, mas exigem conteúdo preparado para sua geometria. A resolução organiza, portanto, a área efetivamente disponível para a comunicação.

A densidade informa a concentração dos pontos, enquanto a resolução revela quantos deles participam da imagem completa. Uma instalação pode ser densa e pequena ou extensa e menos densa. A comparação coerente depende de saber qual dessas propriedades está sendo examinada.

A DISTÂNCIA NA QUAL A IMAGEM SE FORMA

A estrutura do painel não desaparece fisicamente quando o observador se afasta. O que se modifica é o ângulo visual ocupado

pelos pixels e pelos intervalos entre eles. Quando esse ângulo diminui, o sistema visual encontra maior dificuldade para separar cada ponto. As emissões passam a ser integradas em contornos, superfícies e variações cromáticas contínuas.

A referência de um minuto de arco foi historicamente associada à capacidade de distinguir detalhes críticos no padrão de visão 20/20. Com base nessa convenção, a Planar Systems (2021) denomina distância de acuidade visual o ponto a partir do qual o observador tende a deixar de distinguir pixels individuais. O mesmo documento apresenta uma distância média confortável menor, na qual a imagem pode ser considerada satisfatória mesmo quando sua estrutura física ainda permanece parcialmente perceptível.

Essas estimativas não estabelecem uma fronteira universal. A Planar Systems (2021) reconhece que a distância aceitável depende da visão do observador, do tipo de aplicação e da natureza do conteúdo. Ashraf, Chapiro e Mantiuk (2025) também encontraram limites distintos para padrões acromáticos e cromáticos, bem como diferenças entre a visão central e posições periféricas. A percepção visual varia conforme o estímulo e a região do campo visual examinada.

Também existe diferença entre perceber pixels e avaliar a qualidade do conteúdo. Um texto pode tornar-se difícil de ler antes que a estrutura física da tela incomode. Um vídeo com grandes massas de cor pode permanecer compreensível em uma condição na qual linhas finas já parecem irregulares. O resultado visual depende tanto do painel quanto da informação que ele precisa comunicar.

A distância deve ser examinada como faixa de uso. Em um auditório, o público ocupa posições variadas. Em uma loja, o visitante observa a tela do corredor e pode aproximar-se. Em um palco, a plateia percebe o painel diretamente, enquanto câmeras registram a mesma superfície sob outras exigências. O projeto

coerente considera a menor distância relevante, a posição predominante e o detalhe que precisa permanecer legível.

O CONTEÚDO MODIFICA A ESCOLHA

O painel não existe separado da mensagem. A mesma resolução pode parecer suficiente para imagens amplas e limitada para textos pequenos. Vídeos, fotografias, números, mapas, logotipos e transmissões ao vivo distribuem informação de maneiras diferentes. A escolha do pitch precisa considerar qual detalhe sustenta a função comunicativa da tela.

Mensagens destinadas à leitura rápida costumam empregar poucas palavras, caracteres maiores e contraste elevado. Em rodovias e vias urbanas, o observador permanece em movimento e dispõe de tempo reduzido para identificar a informação. A distância ampla permite espaçamentos maiores, mas a legibilidade depende da dimensão das letras, da duração da mensagem e da ausência de excesso visual.

Em lojas e vitrines, a aproximação modifica o critério. Texturas de produtos, preços, detalhes tipográficos e elementos de identidade visual podem ocupar parte reduzida da tela. Um pitch amplo, aceitável à distância, revela fragmentação quando o consumidor se aproxima. A densidade passa a sustentar a continuidade necessária para que o painel participe do ambiente sem expor excessivamente sua estrutura.

Igrejas, auditórios e palcos combinam grandes dimensões com público distribuído. Letras, legendas, apresentações e imagens de pessoas precisam atender às fileiras próximas sem perder impacto nas posições distantes. Em estúdios, a câmera acrescenta outro critério de avaliação. A superfície deve ser examinada pelo sistema de captura, na distância e no enquadramento de operação, pois a percepção direta do painel pode não coincidir com o resultado registrado.

Centros de controle e salas corporativas valorizam linhas finas, gráficos, interfaces e textos. A proximidade do usuário favorece densidades elevadas, mas a resolução da fonte precisa acompanhar a matriz instalada, pois ampliar arquivos de baixa qualidade não recupera detalhes ausentes.

A pergunta tecnicamente produtiva não se limita a quantos pixels cabem na tela. É necessário definir quais elementos o público deve reconhecer, ler ou comparar, em que distância e durante quanto tempo. Quando o conteúdo orienta a especificação, a resolução deixa de funcionar como promessa genérica e passa a responder a uma finalidade comunicativa verificável.

CADA AMBIENTE ESTABELECE UMA NECESSIDADE VISUAL

A redução progressiva do pitch ampliou a adequação dos painéis de LED a ambientes nos quais o observador permanece próximo da imagem. Essa expansão, contudo, não decorreu da densidade isoladamente. Lojas, templos, auditórios, estúdios e centros comerciais apresentam diferentes condições de iluminação, circulação, conteúdo e posicionamento do público.

Uma superfície extensa pode comunicar imagens amplas sem alcançar uma matriz padronizada como Full HD ou UHD TV, enquanto uma tela menor destinada a textos, gráficos ou interfaces pode exigir maior concentração de pixels. As dimensões físicas e a resolução total precisam corresponder à informação que será efetivamente exibida.

A iluminação ambiente altera o contraste percebido, mas não corrige insuficiência de resolução. Elevar o brilho pode destacar a imagem diante da luz circundante, sem criar pixels ou recompor linhas ausentes. Nitidez, luminosidade e contraste participam do resultado visual, embora representem propriedades distintas.

Na prática profissional de Douglas Fernandes Sodré, a definição do pitch condiciona o nível de detalhe perceptível no conteúdo exibido e o modo como a imagem será percebida pelo público. Essa escolha requer a análise conjunta da distância de observação, da posição predominante do público, da iluminação, da geometria da superfície e da compatibilidade entre o conteúdo e a configuração da tela, para que a decisão técnica não se reduza a um valor isolado.

DENSIDADE ADEQUADA, NÃO DENSIDADE MÁXIMA

A trajetória dos painéis de LED tornou o menor pitch um indicador visível de avanço. A redução do espaçamento permitiu imagens mais detalhadas e aproximou a tecnologia do cotidiano do observador. O progresso, entretanto, não elimina a necessidade de proporção. Densidade superior produz valor quando o público consegue perceber seu efeito ou quando o conteúdo depende dela.

O Quadro 1 reúne valores de distância confortável estimada apresentados pela Planar Systems (2021), arredondados para facilitar a leitura, e associa cada faixa a exemplos de uso possíveis. As aplicações não constituem prescrição, pois dimensões da tela, conteúdo, iluminação e acuidade visual podem deslocar a escolha.

Quadro 1: Relação aproximada entre pitch, distância confortável e aplicação

Pitch	Distância confortável estimada	Exemplos de aplicação
P1	cerca de 1,7 m	centros de controle, salas e estúdios
P1,5	cerca de 2,6 m	vitruines e auditórios compactos

Pitch	Distância confortável estimada	Exemplos de aplicação
P2	cerca de 3,4 m	igrejas, auditórios e palcos
P3	cerca de 5,2 m	eventos e palcos maiores
P4	cerca de 6,9 m	eventos, fachadas e áreas amplas
P6	cerca de 10,3 m	fachadas e grandes espaços externos
P10	cerca de 17,2 m	vias e grandes estruturas

Fonte: Elaborado pelo autor. Distâncias adaptadas de Planar Systems (2021); aplicações apresentadas como exemplos contextuais.

O quadro demonstra que a distância confortável tende a crescer com o espaçamento, sem estabelecer fronteiras rígidas. Um painel P4 pode ser observado a menos de 6,9 metros quando o conteúdo admite maior percepção da estrutura. Em sentido inverso, projetos voltados a textos, linhas finas ou captura de imagem podem justificar um pitch menor mesmo em distâncias superiores às referências apresentadas.

Os dois extremos produzem inadequações distintas. Quando o público permanece distante, reduzir o pitch pode multiplicar a quantidade de pixels sem modificar proporcionalmente a experiência. Quando o espaçamento é amplo para a menor distância de uso, bordas ficam serrilhadas, curvas perdem continuidade e letras pequenas se fragmentam. Brilho, contraste ou saturação não recompõem os pontos inexistentes.

A densidade adequada resulta da correspondência entre distância, dimensões, conteúdo e finalidade. O painel deixa de ser avaliado pelo menor número impresso na especificação e passa a

ser compreendido como uma superfície projetada para determinada experiência visual. Essa perspectiva orienta o investimento para uma capacidade que o ambiente poderá utilizar efetivamente.

A aproximação entre os pixels levou a imagem para mais perto do público e ampliou os contextos de aplicação. Esse avanço concentrou maior quantidade de emissores na tela e tornou mais estreita a relação entre resolução, dimensões, brilho, consumo e estabilidade operacional. A evolução tecnológica passou a ser medida também pela eficiência com que a energia é convertida em desempenho visual, sem comprometer a estabilidade do conjunto.

CAPÍTULO V

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E NOVOS CRITÉRIOS DE PROJETO

A imagem percebida pelo público oculta uma infraestrutura em atividade contínua. Enquanto letras, cores e movimentos se formam na superfície, milhares ou milhões de emissores recebem corrente, são acionados por circuitos de controle e precisam conservar comportamento estável durante todo o período de operação.

Em projetos concebidos sem integração entre a tela e sua alimentação, dimensões, brilho e aplicação podem ser definidos antes da infraestrutura elétrica. A ampliação das superfícies e das jornadas de funcionamento expôs a fragilidade dessa ordem. O desempenho visual depende de fontes, condutores, proteções e condições térmicas capazes de sustentar a demanda gerada pela exibição.

A evolução dos emissores aumentou a quantidade de luz obtida a partir da energia elétrica, enquanto o aperfeiçoamento das fontes chaveadas reduziu perdas na conversão. Circuitos de controle passaram a administrar o acionamento com maior precisão, e as soluções térmicas assumiram a função de conduzir o calor inevitavelmente produzido pelo sistema. Potência, ambiente, tempo de uso e segurança tornaram-se variáveis do próprio projeto (Schubert, 2023; Erickson; Maksimović, 2020).

Essa mudança ampliou a noção de qualidade. Uma tela visualmente adequada permanece incompleta quando depende de alimentação improvisada, opera próximos dos limites térmicos ou produz custos incompatíveis com sua finalidade. Eficiência energética exprime, nesse contexto, a correspondência entre

energia recebida, desempenho visual útil, perdas, estabilidade e condições de operação.

QUANDO A IMAGEM TAMBÉM SE TORNA DEMANDA ENERGÉTICA

O LED converte energia elétrica em radiação luminosa por meio da recombinação de portadores no material semicondutor. Nem toda a energia recebida se transforma em luz extraída do dispositivo. Parte é perdida em processos internos e alcança o conjunto na forma de calor. As diferentes eficiências envolvidas nessa conversão são examinadas por Schubert (2023), que distingue o desempenho interno do semicondutor, a extração da luz e a relação entre a potência elétrica fornecida e a potência óptica produzida.

Em um painel, essa conversão ocorre em grande escala. Os emissores RGB compartilham a superfície com circuitos de acionamento, placas, receptores, controladores e fontes. Cada camada acrescenta consumo e perdas. A demanda energética da tela não corresponde, portanto, à soma abstrata dos LEDs. Ela resulta do funcionamento conjunto dos componentes que formam e atualizam a imagem.

O brilho e a composição da imagem alteram a solicitação instantânea. Conteúdos claros e intensos tendem a manter parcelas maiores dos canais vermelho, verde e azul em níveis elevados, enquanto cenas escuras reduzem esse acionamento. O manual da Planar Systems apresenta, para o mesmo modelo URL136-T, consumos distintos conforme a condição de exibição: 1.500 W em tela totalmente branca, 365 W em tela preta e 1.240 W em condição típica. Como as características físicas e técnicas do equipamento permanecem inalteradas, a diferença confirma que a demanda elétrica varia de acordo com o conteúdo exibido e o regime de funcionamento. Esses valores não estabelecem uma proporção

universal para outros painéis, mas demonstram que o consumo nominal associado a uma condição específica não corresponde necessariamente ao consumo verificado durante toda a operação (Planar Systems, 2024).

O ambiente completa essa relação. Painéis externos precisam competir com a luz solar e podem operar com luminância superior à necessária em salas, auditórios ou centros de controle. Em espaços internos, a redução coerente do brilho pode preservar conforto visual e diminuir a energia solicitada. A eficiência nasce da correspondência entre luz produzida e condição real de observação, e não da manutenção permanente do equipamento em seu limite.

Os avanços na eficácia dos emissores permitiram produzir mais resultado visual por unidade de energia, mas o aumento das áreas instaladas e dos períodos de funcionamento pode neutralizar parte desse ganho. Uma tecnologia mais eficiente não garante consumo total menor quando a tela cresce, opera por mais horas ou é configurada com brilho desproporcional. A avaliação precisa combinar desempenho do componente e escala de uso.

POTÊNCIA MÁXIMA, CONSUMO TÍPICO E OPERAÇÃO REAL

Potência e energia descrevem aspectos diferentes. A potência, expressa em watts ou quilowatts, indica a taxa com que a energia é solicitada em determinado instante. A energia consumida, usualmente registrada em quilowatt-hora, depende da potência média e do tempo de funcionamento. Uma tela de demanda moderada pode acumular consumo elevado quando permanece ativa continuamente.

As fichas técnicas costumam apresentar potência máxima, potência típica ou valores por metro quadrado. A potência máxima representa uma condição superior de solicitação definida pelo

fabricante e constitui referência para a infraestrutura elétrica. A potência típica procura aproximar uma condição de uso esperada, mas depende dos parâmetros adotados no ensaio. Sem conhecer brilho, conteúdo e modo de operação, o número perde parte de seu valor comparativo.

Em termos conceituais, a energia de determinado período pode ser estimada pela multiplicação da potência média pelo tempo de uso. Essa relação simples exige uma informação que nem sempre está disponível no início do projeto, pois a potência média depende da programação visual. Uma fachada publicitária com vídeos claros, um painel de palco sujeito a cenas variáveis e uma tela informativa com fundo escuro podem apresentar perfis distintos.

Uma estimativa consistente parte do perfil de uso. Horas diárias de funcionamento, brilho programado, composição do conteúdo, condições de maior demanda e períodos de espera integram o cálculo econômico. O valor da energia torna-se consequência previsível da operação, em vez de despesa identificada depois da instalação.

Na apresentação ao cliente, a capacidade elétrica e a previsão de energia devem aparecer em planos distintos. A primeira considera a condição superior prevista para preservar a infraestrutura; a segunda estima o custo com base em premissas explícitas de uso. Essa separação impede que uma média otimista seja utilizada para dimensionar circuitos e evita que a potência máxima seja interpretada como consumo permanente.

FONTES DE ALIMENTAÇÃO E EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO

Os módulos de LED e seus circuitos trabalham com tensões contínuas, enquanto a instalação recebe, em muitos contextos, energia em corrente alternada. A fonte de alimentação realiza essa

conversão e regula a saída necessária ao conjunto. Nos sistemas contemporâneos, fontes chaveadas tornaram possível reunir elevada capacidade de conversão em volumes menores, embora continuem sujeitas a perdas elétricas e térmicas.

A eficiência de uma fonte corresponde à relação entre a potência entregue à carga e a potência recebida da rede. Quando o equipamento fornece determinada potência aos módulos, mas retira valor superior da entrada, a diferença aparece principalmente como calor. Os modelos de conversores, suas perdas e as condições de eficiência são discutidas por Erickson e Maksimović (2020) como parte do comportamento real dos sistemas de eletrônica de potência.

Segundo a Mean Well ([s. d.]), a seleção de uma fonte chaveada deve considerar margem de potência, temperatura ambiente e condições de dissipação térmica. Em temperaturas elevadas, a potência disponível precisa ser avaliada conforme a curva de redução apresentada na ficha técnica do modelo. A orientação descreve os critérios adotados pelo fabricante e não estabelece um percentual universal para fontes de outras marcas.

Nos painéis de LED, a fonte integra a arquitetura elétrica e eletrônica do sistema e não deve ser substituída com base em equivalências aparentes. A coincidência da tensão nominal indicada na etiqueta não assegura comportamento idêntico diante das exigências de carga, das variações de temperatura e do regime de operação.

O CALOR COMO CONSEQUÊNCIA DAS PERDAS

O LED é frequentemente descrito como uma fonte fria porque projeta menos radiação infravermelha sobre o público do que determinadas tecnologias luminosas anteriores. Essa característica não significa funcionamento sem aquecimento. A energia elétrica que não se converte em emissão luminosa

transforma-se em calor e precisa percorrer um caminho térmico entre o componente, a placa, o gabinete e o ambiente externo.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos relaciona a temperatura de junção ao desempenho luminoso, à estabilidade cromática e à depreciação do fluxo ao longo do tempo. Embora o documento examine sistemas de iluminação, a relação física também se aplica aos emissores utilizados em painéis. O controle térmico depende da capacidade de transferir o calor produzido na junção do semiconductor para as placas, as estruturas e o ambiente (United States, 2007).

Em uma tela, o calor não surge em um único local. LEDs, circuitos integrados, fontes, conexões e condutores produzem perdas distribuídas. Gabinetes fechados, incidência solar, poeira, circulação de ar restrita e proximidade de outras fontes térmicas alteram a capacidade de dissipação. Um painel externo e uma parede de vídeo embutida em ambiente climatizado exigem leituras térmicas diferentes.

No interior do painel, a condução transporta o calor dos componentes para placas, dissipadores e estruturas. Nas superfícies expostas, a transferência para o ambiente ocorre por convecção natural ou forçada e por radiação térmica. A escolha entre estruturas metálicas, aberturas, ventilação e climatização depende da potência dissipada, da geometria do conjunto e das condições ambientais. A instalação de ventiladores sem análise do percurso do ar pode manter regiões de recirculação, elevar o ruído e acrescentar consumo sem corrigir os pontos de maior temperatura.

Perdas elétricas e temperatura mantêm uma relação de influência mútua. A energia dissipada aquece o sistema, enquanto a elevação térmica modifica as condições de operação, a eficiência e a capacidade de entrega de determinados componentes. Por esse motivo, fabricantes de fontes apresentam curvas de redução de capacidade associadas à temperatura. Desconsiderar o ambiente

térmico pode resultar em um projeto cuja potência nominal consta na documentação, mas não permanece disponível nas condições reais da instalação.

O controle de brilho participa desse equilíbrio. A luminância necessária deve ser definida pela visibilidade no ambiente, sem transformar a intensidade máxima em padrão permanente. Reduzir o acionamento quando a luz externa diminui contém demanda e aquecimento, além de tornar a experiência visual mais confortável. Essa estratégia vincula eficiência energética e qualidade de imagem sem retomar a discussão de resolução desenvolvida no capítulo anterior.

DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO, ESTABILIDADE E SEGURANÇA

O dimensionamento elétrico começa pela demanda documentada do sistema. Dimensões, quantidade de gabinetes, potência máxima por unidade e arquitetura de alimentação permitem estimar a carga instalada. Tensão, frequência, fator de potência e corrente de energização caracterizam a solicitação imposta à infraestrutura. Médias operacionais contribuem para estimar energia e custo, mas não substituem a condição superior prevista para a alimentação.

Em circuitos monofásicos, a potência ativa relaciona-se com tensão, corrente e fator de potência. Essa expressão constitui um ponto inicial, pois a definição de condutores e proteções também depende do método de instalação, da temperatura, do agrupamento, da distância e da queda de tensão admissível. No Brasil, o projeto de baixa tensão deve observar a ABNT NBR 5410 e os requisitos do fabricante aplicáveis ao equipamento (Erickson; Maksimović, 2020; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Quedas de tensão merecem atenção particular nos circuitos de baixa tensão contínua, nos quais correntes elevadas podem circular entre fontes e módulos. Resistências presentes em cabos e conexões reduzem a tensão disponível na carga e convertem parte da energia em calor. A distribuição física deve ser analisada junto com a distribuição de potência, pois módulos próximos e distantes não ocupam posições elétricas equivalentes.

Proteções contra sobrecorrente, sobretensão, curto-circuito e temperatura integram a estabilidade, mas não substituem o projeto da instalação. Aterramento, seccionamento, identificação, acesso controlado e proteção das partes energizadas pertencem ao mesmo sistema preventivo. A NR-10 vigente estabelece medidas de controle destinadas à segurança dos trabalhadores que interagem direta ou indiretamente com instalações e serviços em eletricidade (Brasil, 2004).

O Quadro 2 relaciona a especificação energética às decisões de projeto. Ele não fornece valores universais, pois sua função consiste em impedir que um dado isolado, como watts por metro quadrado, represente toda a infraestrutura.

Quadro 2: Leitura integrada da demanda energética do painel

Informação	O que representa	Consequência no projeto
Potência máxima	Condição superior declarada pelo fabricante	Referência para capacidade da alimentação e proteções
Potência típica ou média	Solicitação associada a um determinado ensaio ou perfil	Estimativa de energia, calor e custo operacional

Informação	O que representa	Consequência no projeto
Tensão e corrente de entrada	Condições elétricas exigidas pelo equipamento	Compatibilidade com rede, circuitos e distribuição
Eficiência da fonte	Parcela da entrada entregue à carga	Avaliação das perdas e do calor gerado na conversão
Temperatura de operação	Faixa ambiental e possíveis curvas de redução	Verificação da capacidade disponível no local
Tempo e modo de uso	Duração, brilho e natureza do conteúdo	Projeção de consumo ao longo da operação

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Erickson e Maksimović (2020), Mean Well ([s. d.]) e Planar Systems (2024).

A leitura conjunta impede que uma média operacional seja utilizada para reduzir a infraestrutura ou que uma capacidade nominal seja aceita sem verificar a temperatura de operação. As informações da ficha técnica adquirem sentido quando relacionadas ao ambiente, à distribuição elétrica e ao perfil de uso.

Em instalações de painéis de LED, a segurança elétrica e a estabilidade da exibição dependem da identificação, do dimensionamento e do seccionamento adequados dos circuitos. Circuitos mal identificados, sobrecarregados ou de difícil isolamento comprometem a intervenção segura dos profissionais, prolongam o diagnóstico de falhas e podem interromper a operação. A imagem percebida pelo público como uniforme e estável resulta, portanto, de decisões elétricas que permanecem invisíveis durante o funcionamento do sistema.

EFICIÊNCIA COMO CRITÉRIO ECONÔMICO E PROJETUAL

O preço de aquisição não encerra o custo de um painel. Energia consumida, ventilação, climatização, períodos de funcionamento e infraestrutura elétrica acompanham o equipamento durante sua vida operacional. Uma diferença moderada de potência pode adquirir peso econômico quando multiplicada por grandes áreas e longas jornadas.

A comparação entre soluções precisa preservar condições equivalentes. Dois fabricantes podem declarar consumo por metro quadrado em níveis diferentes de brilho ou sob conteúdos distintos. Sem identificar o método, o menor valor publicado não comprova desempenho superior. A análise consistente relaciona potência, luminância efetivamente necessária, área, horas de uso e qualidade visual entregue.

Programar níveis de brilho conforme horários e condições de iluminação converte eficiência potencial em economia operacional. Em uma fachada, manter durante a noite a intensidade necessária ao período de maior luminosidade amplia o consumo sem produzir ganho visual equivalente. O efeito econômico precisa ser examinado pela área total da tela e pelas horas acumuladas de funcionamento.

A formação continuada de Douglas Fernandes Sodré em energia solar amplia a leitura econômica da eficiência ao relacionar consumo, autonomia e dimensionamento energético. Em instalações com acesso restrito à rede elétrica, a redução da demanda da tela diminui as capacidades exigidas de geração e armazenamento, com repercussões sobre custos e infraestrutura (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2024).

Sob a perspectiva econômica, eficiência conecta aquisição e operação. A solução tecnicamente mais adequada não corresponde

ao menor consumo declarado em qualquer circunstância, mas àquela que entrega o resultado visual requerido com perdas, temperatura, infraestrutura e custos proporcionais à aplicação.

Mesmo bem dimensionada, a arquitetura elétrica permanece sujeita ao tempo, aos ciclos de funcionamento e às condições ambientais. Conectores, módulos, fontes e circuitos precisam conservar o comportamento previsto durante anos de uso. Quando essa estabilidade se altera, a evolução tecnológica passa a exigir métodos capazes de localizar causas e orientar intervenções com maior precisão, movimento que conduziu à transformação da manutenção dos painéis.

CAPÍTULO VI

A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO DOS PAINÉIS DE LED

Um painel pode operar de maneira estável durante milhares de horas e, repentinamente, apresentar uma faixa apagada, uma cor divergente, uma região intermitente ou a perda completa da imagem. Para o público, a falha se resume ao que deixou de aparecer. Para o profissional, o mesmo efeito inicia a investigação de uma arquitetura formada por energia, comunicação, controle, conexões e emissão luminosa.

A integração progressiva de módulos, fontes, placas receptoras, controladoras e recursos de configuração ampliou a quantidade de pontos capazes de produzir manifestações visualmente semelhantes. Uma área escura informa onde o comportamento se alterou, mas não identifica, por si, o elemento responsável. A manutenção passou a depender da compreensão das relações internas do sistema.

A intervenção corretiva permaneceu necessária diante de danos, desgaste e ocorrências inesperadas. A mudança consistiu em associá-la a diagnóstico, prevenção, testes, registros e preservação de parâmetros. Substituir uma peça tornou-se uma possibilidade dentro de um processo que precisa confirmar a causa e verificar o resultado.

A prática profissional de Douglas Fernandes Sodré orienta uma compreensão da manutenção baseada no comportamento do painel em operação. O restabelecimento da imagem não encerra a intervenção, pois o conjunto ainda deve ser verificado quanto à compatibilidade, à estabilidade e à preservação de seus parâmetros.

A recuperação técnica pressupõe que o funcionamento seja restituído sem que o reparo introduza falhas latentes.

QUANDO TROCAR O COMPONENTE DEIXOU DE SER SUFICIENTE

Os painéis são sistemas reparáveis porque sua construção distribui funções entre módulos, fontes, placas, controladoras, cabos e estruturas. Essa separação favorece o acesso e a substituição, mas também exige reconhecer a responsabilidade de cada parte. O Departamento de Energia dos Estados Unidos observa que a falha de um produto LED pode decorrer dos emissores, da eletrônica, das conexões, dos condutores, da gestão térmica ou de elementos de vedação. O desempenho depende da interação entre componentes, e não da duração isolada do LED (United States, 2013).

Essa perspectiva desloca o objeto da manutenção. A arquitetura distribui alimentação, transmissão de dados, controle e emissão entre elementos distintos, cujos comportamentos permanecem interdependentes. Antes de selecionar a peça que será examinada ou substituída, torna-se necessário reconhecer qual função deixou de corresponder ao desempenho esperado.

A intervenção baseada em tentativa pode produzir resultados enganosos. O manuseio de um módulo ou cabo pode restabelecer temporariamente uma conexão instável e criar a impressão de que a troca resolveu a ocorrência. Quando as condições anteriores retornam, a falha reaparece porque sua origem não foi confirmada.

Tomal e Agajanian (2014) apresentam rastreamento de sinais, medição e divisão funcional dos circuitos como recursos para localizar defeitos eletrônicos. Nos painéis, esse princípio orienta a leitura dos caminhos percorridos pela energia e pelos dados. A investigação deixa de se concentrar na peça

aparentemente defeituosa e procura identificar o ponto em que o comportamento previsto foi interrompido.

O SINTOMA VISÍVEL E A CADEIA DE CAUSAS

A extensão visual da falha não corresponde necessariamente à amplitude de sua causa. O manual da Leyard TW distingue ausência de imagem em toda a tela, perda parcial, cintilação e anomalias de cor. Uma superfície apagada pode envolver alimentação comum, entrada de vídeo ou transmissão, enquanto uma região específica acrescenta hipóteses relacionadas à fonte local, ao sinal em cascata e à placa de controle (Leyard Optoelectronic, 2016).

A distribuição espacial orienta a investigação. Quando uma sequência deixa de funcionar depois de determinado ponto, o limite entre a última unidade ativa e a unidade subsequente delimita uma região relevante para verificar cabos, alimentação e módulos. A Daktronics também recomenda movimentar ou substituir unidades nessa fronteira e observar os indicadores de alimentação e comunicação (Daktronics, 2018).

O padrão temporal acrescenta evidências, mas não determina sozinho a causa. Anomalias associadas ao aquecimento, à vibração, à movimentação dos cabos ou ao tempo de funcionamento devem ser registradas porque indicam as condições em que o comportamento pode ser reproduzido. Informações perdidas após o desligamento podem ser determinantes para os testes posteriores.

Cor e brilho introduzem outro critério. Um módulo substituído pode funcionar eletricamente e permanecer visualmente divergente da superfície. O manual da Leyard determina a preservação dos dados de calibração e informa que coordenadas, cor e brilho podem exigir ajuste após a troca. Recuperar a emissão luminosa não equivale, portanto, a

restabelecer a uniformidade da imagem (Leyard Optoelectronic, 2016).

O Quadro 3 organiza manifestações frequentes como portas de entrada para o raciocínio. As relações não formam equivalências fixas. Cada equipamento possui arquitetura, conexões, recursos de diagnóstico e procedimentos definidos pelo fabricante.

Quadro 3: Do sintoma às hipóteses técnicas

Manifestação	Camadas a verificar	Pergunta inicial
Tela apagada	Energia comum, controlador, vídeo e comunicação	A cadeia inteira foi interrompida ou existe uma etapa comum?
Área sem imagem	Alimentação local, sinal em cascata, receptora e módulo	Onde termina o trecho que ainda funciona?
Linhas ou colunas ausentes	Cabos, conectores, acionamento, trilhas e módulo	O padrão acompanha o módulo ou permanece na posição?
Cor ou brilho divergente	Canal de cor, calibração e compatibilidade da reposição	Trata-se de falha, configuração ou característica da reposição?

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Leyard Optoelectronic (2016) e Daktronics (2018).

O quadro deve ser interpretado como mapa de possibilidades, e não como tabela de equivalências. A manifestação visível delimita o ponto inicial da investigação. A topologia, o histórico da ocorrência, as condições de funcionamento e os

resultados dos testes determinam quais hipóteses permanecem tecnicamente sustentáveis.

DA CORREÇÃO À PREVENÇÃO E AO REGISTRO

Quando a política de manutenção se inicia com a interrupção visível, a organização atua depois que o desempenho ou o serviço já foi comprometido. Em instalações de uso contínuo, esse atraso pode resultar em perda de comunicação, indisponibilidade operacional e exposição pública da ocorrência.

A prevenção desloca parte da atenção para condições que antecedem a interrupção. Poeira acumulada, ventilação obstruída, conectores frouxos, sinais de umidade, corrosão, cabos tensionados e fixações comprometidas não constituem defeitos equivalentes, mas podem alterar o ambiente no qual os componentes operam. A inspeção permite reconhecer essas mudanças antes que se convertam em perda visível.

Em seu manual para painéis externos, a Daktronics associa a inspeção periódica ao exame do interior do gabinete, à limpeza de ventiladores, à busca por entrada de água, à verificação de conexões de aterramento e ao estado de fixadores. O documento também fornece um registro de manutenção para que a frequência seja ajustada ao comportamento de cada instalação (Daktronics, 2018). A periodicidade não deriva de calendário universal, pois exposição, acesso, tempo de operação e ambiente modificam a necessidade.

O registro transforma uma ocorrência isolada em histórico. Data, local, condição de uso, manifestação observada, componente removido, medições, providência adotada e resultado posterior permitem comparar episódios. Quando a mesma posição falha repetidamente, a informação pode deslocar a análise do módulo para conexão, estrutura, vedação ou distribuição. Sem

rastreadibilidade, cada visita recomeça como se o sistema não tivesse passado.

As plataformas de controle acrescentaram recursos de diagnóstico eletrônico. O VX400 da NovaStar possui uma função destinada ao teste de componentes do dispositivo e à verificação rotineira da integridade do sistema. O relatório obtido pode ser encaminhado ao suporte técnico, enquanto a execução do procedimento interrompe temporariamente a saída. Seu uso precisa, portanto, ser compatibilizado com a operação da tela (NovaStar, 2024).

O diagnóstico eletrônico reduz o campo de busca, mas não identifica automaticamente a causa física. Um estado anormal pode resultar de cabo, conector, alimentação, configuração ou placa. A informação fornecida pelo controlador adquire valor quando é confrontada com a topologia, as medições e a inspeção do equipamento.

MODULARIDADE, SUBSTITUIÇÃO E RASTREABILIDADE

A organização modular mudou a escala da intervenção. Em vez de desmontar toda a superfície para recuperar uma região, muitos sistemas permitem remover módulos, fontes ou placas de controle separadamente. A arquitetura diminui o volume afetado pela manutenção e pode reduzir o tempo de indisponibilidade, desde que o acesso tenha sido previsto no projeto.

Produtos contemporâneos incorporaram a possibilidade de serviço à própria arquitetura. A Planar DirectLight Pro utiliza construção modular, acesso frontal e gabinetes de diferentes dimensões. O fabricante informa que a redução da quantidade de gabinetes acelera instalação e manutenção, enquanto a maior largura de banda permite diminuir cabos, placas receptoras e fontes em determinadas configurações. Embora descreva uma família

comercial, o exemplo demonstra como acesso e reparabilidade passaram a integrar as decisões de projeto (Planar Systems, 2023).

Modularidade, contudo, não representa intercambialidade irrestrita. Dimensões correspondentes ou conectores semelhantes não asseguram compatibilidade elétrica, óptica e de configuração. A Leyard exige a preservação dos dados de calibração na reposição, enquanto o Departamento de Energia dos Estados Unidos relaciona a reparabilidade à disponibilidade futura de componentes e à compatibilidade entre gerações. A decisão de compra define, em parte, as condições de manutenção disponíveis ao longo da vida do sistema (United States, 2013; Leyard Optoelectronic, 2016).

A substituição precisa preservar identidade e posição. Etiquetar cabos, registrar a localização, documentar o componente retirado e confirmar parâmetros depois da troca reduz o risco de inversões, endereços incorretos e diferenças visuais. Em determinados painéis, mover um módulo para outra posição constitui recurso de isolamento da falha. O resultado conserva valor diagnóstico quando a movimentação e o comportamento posterior permanecem registrados (Daktronics, 2018).

Na manutenção de painéis de LED, o acesso físico aos componentes precisa ser acompanhado pela interpretação técnica do sistema. Conhecer o percurso da energia, do sinal e das conexões permite verificar se a falha acompanha determinado módulo ou permanece associada à sua posição na estrutura. Durante desmontagens, testes e substituições, a rastreabilidade conserva essa relação e reduz o risco de conclusões imprecisas.

Rapidez e precisão, portanto, pertencem ao mesmo processo de intervenção. A modularidade reduz o tempo necessário para alcançar o componente, enquanto a rastreabilidade preserva o encadeamento do diagnóstico. Uma substituição executada em poucos minutos perde valor técnico quando não há registro do componente removido, da justificativa da decisão, dos parâmetros

alterados e do comportamento verificado após o retorno do painel à operação.

PRECISÃO ELETRÔNICA, SOLDAGEM SMD E PROTEÇÃO DE COMPONENTES

A redução das dimensões dos componentes elevou a precisão exigida nas intervenções em placa. A montagem e o retrabalho de dispositivos SMD concentram terminais, trilhas e pontos de soldagem em áreas reduzidas. Temperatura, tempo de exposição, quantidade de material, limpeza, ampliação visual e proteção das regiões adjacentes interferem na qualidade da intervenção.

Nem toda falha em módulo justifica reparo local. O fabricante pode determinar substituição da unidade e retorno para serviço especializado, como ocorre no manual da Daktronics, que orienta não trocar LEDs individualmente naquele modelo (Daktronics, 2018). Em outros contextos, o reparo de placa pode ser técnica e economicamente pertinente. A decisão depende do projeto, da documentação, da garantia, dos recursos disponíveis e da competência autorizada para a intervenção.

Nos reparos em nível de componente, a leitura de diagramas, a substituição de componentes e a soldagem de dispositivos SMD precisam ser orientadas pela interpretação do circuito. O diagnóstico exige confirmar a função de cada componente, reconhecer sua polaridade, examinar trilhas, comparar medições e determinar se o dano identificado corresponde à origem da falha ou ao efeito de outra anomalia.

Componentes eletrônicos podem sofrer danos por descarga eletrostática durante manuseio, teste, armazenamento ou transporte. A IEC 61340-5-1:2024 estabelece requisitos administrativos e técnicos para programas de controle de ESD em organizações que fabricam, instalam, testam, inspecionam,

transportam ou prestam serviço em partes e equipamentos eletrônicos abrangidos por seu campo de aplicação. Bancada, aterramento, materiais, embalagem e conduta profissional integram esse controle (International Electrotechnical Commission, 2024).

A EOS/ESD Association (2020) explica que o dano eletrostático pode produzir falha imediata ou defeito latente, capaz de escapar à detecção inicial e provocar falha prematura. Essa característica torna inadequado avaliar a qualidade da intervenção pelo funcionamento no instante da montagem. O componente precisa ser tratado dentro das condições previstas durante todo o processo, inclusive quando sai do painel, permanece em estoque ou segue para análise externa.

O reparo em placa e a substituição modular representam níveis complementares. A troca restabelece rapidamente a operação quando existe unidade compatível. A análise eletrônica permite compreender defeitos, recuperar componentes quando tecnicamente autorizado e produzir conhecimento sobre reincidências. O equilíbrio entre ambos depende do custo de indisponibilidade, da complexidade da placa, da disponibilidade de reposição e da segurança do procedimento.

O DIAGNÓSTICO COMO CONHECIMENTO ACUMULADO

Um diagnóstico consistente termina com a verificação do resultado, e não com a instalação da peça. A imagem precisa retornar em toda a região afetada, os parâmetros devem permanecer coerentes com o restante da tela e a estabilidade precisa ser observada nas condições que provocavam a ocorrência. Em falhas intermitentes, um teste breve pode não reproduzir o tempo necessário para confirmar a correção.

A verificação também determina se o episódio pode ingressar no histórico como conhecimento confiável. Uma hipótese não confirmada, registrada como causa, contamina investigações futuras. Quando sintoma, teste, causa identificada, intervenção e comportamento posterior permanecem coerentes, o registro deixa de representar a memória de uma visita e passa a constituir evidência comparativa.

Em equipes responsáveis por manutenção e suporte técnico, a organização do acervo documental converte conhecimento individual em capacidade compartilhada. Relatórios concisos, diagramas atualizados, identificação de cabos e registros de configuração permitem que outros profissionais reconstruam o raciocínio adotado durante o diagnóstico e a intervenção. No atendimento ao cliente, perguntas sobre a área afetada, a frequência da ocorrência, o conteúdo exibido, o horário de manifestação e as condições ambientais transformam descrições genéricas em informações tecnicamente examináveis.

A evolução da manutenção pode ser reconhecida nessa passagem da substituição isolada para um processo verificável. Confiabilidade, reparabilidade, acesso e documentação passaram a integrar a análise da ocorrência. O profissional precisa circular entre imagem, eletrônica, energia, comunicação e configuração, preservando a distinção entre essas camadas.

Essa especialização também revelou tensões da arquitetura. Módulos removíveis favorecem o acesso, mas exigem proteção durante o manuseio. Densidades elevadas reduzem o espaço disponível para determinadas intervenções, enquanto impacto, umidade e poeira impõem novas exigências à superfície e às conexões.

As respostas a essas limitações começaram a aparecer em diferentes formas de encapsulamento, integração e proteção dos pixels. A etapa subsequente da evolução procuraria modificar a construção do painel para reduzir fragilidades e ampliar o

desempenho, movimento representado pelas tecnologias GOB, COB, MiniLED e MicroLED.

CAPÍTULO VII

GOB, COB, MINILED E MICROLED COMO NOVAS RESPOSTAS TECNOLÓGICAS

A redução do espaçamento entre pixels elevou a densidade das telas e aproximou emissores, conexões e circuitos em superfícies progressivamente compactas. O movimento ampliou a qualidade visual, mas também tornou o conjunto mais sensível a impactos, contaminantes, variações de uniformidade e dificuldades de acesso aos componentes. Parte da evolução tecnológica passou, então, a ocorrer na própria construção do módulo.

As respostas desenvolvidas pela indústria não formam uma sequência linear. Algumas preservam a arquitetura existente e acrescentam proteção à superfície. Outras alteram a montagem dos chips, o encapsulamento ou a integração com os circuitos de acionamento. Há, ainda, denominações relacionadas ao tamanho dos emissores, sem que essa dimensão determine sozinha a estrutura do display.

GOB, COB, MiniLED e MicroLED pertencem, portanto, a critérios de classificação diferentes. GOB corresponde à proteção aplicada sobre componentes já montados. COB modifica a integração dos chips com o substrato e o encapsulamento da matriz. MiniLED e MicroLED se relacionam à miniaturização dos emissores, embora seus limites dimensionais e suas configurações variem entre a literatura científica e os segmentos industriais.

Essa diferença impede tratá-los como degraus sucessivos de uma mesma trajetória. Um módulo GOB pode conservar componentes SMD sob a camada protetora, enquanto o COB pode empregar chips de dimensões variadas. O MiniLED pode compor a retroiluminação de uma tela LCD ou participar diretamente de uma matriz emissiva. No MicroLED, a redução

dimensional se combina com exigências de fabricação, integração e controle em escala micrométrica.

Huang et al. (2020) distinguem os displays emissivos baseados em MiniLED e MicroLED das telas LCD retroiluminadas por MiniLED. A classificação confirma que a dimensão do emissor precisa ser examinada em conjunto com o substrato, o circuito de acionamento, o encapsulamento e o modo de formação da imagem. Sob essa perspectiva, cada solução redistribui ganhos e restrições entre densidade, proteção, rendimento produtivo, custo e reparabilidade.

QUANDO A PROTEÇÃO PASSA A INTEGRAR A ARQUITETURA

Nos módulos SMD, os emissores RGB são reunidos em componentes encapsulados e soldados à superfície da placa. Essa configuração favoreceu a redução do pitch e a ampliação da densidade, mas conservou encapsulamentos, terminais e pontos de soldagem expostos ao contato, ao manuseio e às condições ambientais. Quanto menor o espaçamento, maior se tornou a concentração dessas estruturas na superfície.

A proteção passou a integrar a constituição óptica e mecânica do módulo. Materiais de encapsulamento, acabamento superficial e métodos de montagem interferem na resistência ao impacto, na reflexão da luz, no contraste, na uniformidade visual e nas possibilidades de intervenção técnica. A camada situada sobre os emissores deixou de exercer função estritamente protetora e passou a participar do desempenho da imagem.

GOB e COB representam respostas distintas a essa transformação. O GOB acrescenta cobertura protetora sobre componentes previamente instalados, enquanto o COB incorpora montagem e encapsulamento ao processo de formação da matriz emissiva. MiniLED e MicroLED introduzem outro critério,

relacionado às dimensões dos emissores e aos processos necessários para integrá-los ao display.

As diferenças construtivas modificam a localização das fragilidades e as condições de reparo. Uma superfície protegida pode resistir melhor ao contato e à contaminação, mas restringir o acesso localizado. Uma matriz mais integrada pode reduzir conexões intermediárias e, ao mesmo tempo, transferir determinadas intervenções para módulos completos ou processos industriais.

A sigla, isoladamente, não permite concluir que uma solução seja mais resistente, eficiente ou reparável. Materiais, método de aplicação, uniformidade, acabamento, compatibilidade térmica e suporte do fabricante continuam determinando o comportamento do produto. A compreensão desses fatores começa pelo GOB, solução que preserva a estrutura montada e modifica sua relação com o ambiente por meio da proteção superficial.

GOB E A PROTEÇÃO DA SUPERFÍCIE

No GOB, a cobertura aplicada sobre o módulo responde à crescente exposição dos componentes em superfícies de menor pitch. Emissores, terminais e pontos de soldagem permanecem concentrados em uma área reduzida e sujeitos a contatos ocorridos durante transporte, instalação, limpeza ou uso. O material depositado sobre o conjunto modifica essa relação entre a placa e o ambiente.

A ROE Visual ([s. d.]) define GOB como um método de selagem dos encapsulamentos de LED existentes na superfície do módulo mediante aplicação de material epóxi. A descrição confirma que a tecnologia preserva os componentes previamente montados e acrescenta uma camada de proteção sobre eles. Sua adoção não converte a estrutura subjacente em COB.

Ao preencher os espaços entre componentes e formar uma superfície mais contínua, a resina pode reduzir a exposição direta a impactos e contaminantes. O resultado, contudo, depende da formulação do material, da aderência à placa e da uniformidade alcançada durante a aplicação. A presença da cobertura não permite atribuir ao módulo resistência irrestrita ao contato ou às condições ambientais.

A resina também integra o percurso óptico da luz emitida. Transparência, índice de refração, espessura e acabamento interferem na transmissão luminosa, na reflexão externa, no contraste e na percepção do preto. Diferenças de aplicação ou cura podem fazer com que módulos eletricamente equivalentes apresentem respostas visuais distintas.

A incorporação da resina modifica a interface térmica da superfície, mas não estabelece uma direção única para a dissipação de calor. A distribuição da temperatura durante a operação resulta da condutividade e da espessura do material, do contato com a placa e da estrutura do gabinete.

A proteção modifica igualmente as condições de reparo. O componente deixa de permanecer diretamente acessível e uma intervenção localizada pode exigir remoção controlada da resina, substituição do elemento danificado e recomposição da cobertura. Falhas nesse procedimento podem produzir diferenças de acabamento, transmissão luminosa ou resistência superficial.

A confiabilidade de uma solução GOB resulta das propriedades do material e do controle exercido sobre sua aplicação, espessura e cura. Como esses parâmetros variam entre fabricantes e linhas de produtos, a denominação reúne construções com desempenhos distintos. Em termos construtivos, o GOB preserva uma arquitetura previamente montada e acrescenta uma camada protetora, enquanto o COB integra os chips à formação da própria matriz emissiva.

COB E A INTEGRAÇÃO DOS EMISSORES À PLACA

No COB, os chips emissores são montados diretamente no substrato que compõe o módulo e recebem encapsulamento após sua integração. A superfície deixa de ser organizada pela soldagem de encapsulamentos individuais previamente fabricados, como ocorre no SMD. Montagem, conexão e proteção passam a integrar um processo construtivo mais concentrado.

As configurações COB não são idênticas. Determinados processos empregam conexões por fios entre os chips e os contatos elétricos, enquanto as estruturas flip-chip posicionam os terminais de modo a permitir ligação direta ao substrato. COB define a montagem do chip sobre a placa, ao passo que flip-chip identifica uma das formas possíveis de conexão.

A Daktronics (2024) descreve seu sistema flip-chip COB como uma construção na qual os emissores RGB são montados diretamente no display, sem as conexões por fios e os encapsulamentos convencionais. A superfície recebe acabamento fosco destinado a proteger os emissores e reduzir reflexos. Essas propriedades pertencem à configuração apresentada pelo fabricante e não podem ser estendidas automaticamente a todo produto COB.

A retirada dos encapsulamentos individuais permite reduzir parte do espaço ocupado entre os chips e favorece a construção de matrizes com menor pitch. O encapsulamento coletivo também pode diminuir a área refletiva entre pixels e interferir no contraste percebido. Tais resultados permanecem condicionados à precisão da montagem, ao acabamento superficial e ao controle do circuito de acionamento.

A proximidade entre chip e substrato modifica os caminhos de transferência térmica, mas não assegura comportamento uniforme entre diferentes módulos. Materiais da placa, método de conexão, densidade dos emissores e estrutura do gabinete

continuam determinando a distribuição de calor. A integração altera a arquitetura térmica sem eliminar a necessidade de controle da temperatura.

As possibilidades de intervenção acompanham essa mudança construtiva. A substituição de um encapsulamento isolado pode ceder lugar à troca de uma região integrada ou do módulo, conforme a arquitetura e o procedimento estabelecido pelo fabricante. A proteção da superfície pode reduzir determinadas ocorrências em campo, mas uma falha interna tende a exigir processos compatíveis com a fabricação original.

Esse deslocamento interfere na composição dos custos. Rendimento de fabricação, uniformidade luminosa, identificação de defeitos, compatibilidade entre lotes e disponibilidade de módulos de reposição passam a ter maior peso. O valor da densidade obtida depende da capacidade de conservar alinhamento, correspondência cromática e estabilidade em toda a superfície encapsulada.

O COB modifica a integração dos emissores, mas não determina sua dimensão física. Chips de tamanhos distintos podem integrar construções classificadas sob essa denominação. MiniLED e MicroLED introduzem outro eixo de análise, relacionado à miniaturização dos emissores e às arquiteturas em que serão empregados.

MINILED ENTRE DIMENSÃO E CONFIGURAÇÃO DO DISPLAY

MiniLED designa uma categoria associada à miniaturização dos emissores, embora seus limites dimensionais variem entre publicações e segmentos industriais. A denominação indica a redução do chip em relação aos LEDs convencionais, mas não determina a arquitetura do display nem o modo pelo qual a imagem será formada.

Uma de suas aplicações ocorre na retroiluminação de telas LCD. Nessa configuração, conjuntos de MiniLEDs são distribuídos em zonas controláveis atrás do painel de cristal líquido. Os emissores produzem a luz, enquanto os pixels do LCD modulam sua passagem e definem a imagem percebida pelo observador.

A ampliação do número de zonas permite controlar com maior precisão as regiões claras e escuras da tela. Cada zona, entretanto, pode atender a diversos pixels do painel LCD. A quantidade de emissores empregada na retroiluminação não corresponde, portanto, ao número de subpixels responsáveis pela resolução.

Em displays emissivos, a relação entre o MiniLED e a imagem é diferente. Cada emissor ou conjunto RGB participa diretamente da formação dos pixels, sem a camada de cristal líquido presente nas telas retroiluminadas. A mesma classificação dimensional pode, assim, integrar estruturas com princípios ópticos distintos.

Huang et al. (2020) diferenciam os displays emissivos baseados em MiniLED das telas LCD com retroiluminação MiniLED. Essa separação impede que o controle zonal de uma fonte traseira seja confundido com a emissão direta de cada pixel. A arquitetura precisa ser identificada pela relação entre os emissores, o circuito de acionamento e o mecanismo de formação da imagem.

A miniaturização favorece densidades superiores e menores distâncias de observação, mas eleva as exigências de montagem e controle. Chips menores precisam ser posicionados, conectados e inspecionados em quantidades crescentes. Uniformidade cromática, dissipação térmica e rendimento produtivo passam a exercer influência direta sobre o resultado visual.

A redução dimensional também não determina, por si só, o custo do produto. Quantidade de chips, circuito de acionamento, método de montagem, encapsulamento, inspeção e descarte de unidades defeituosas compõem a estrutura econômica. Quando a miniaturização amplia as perdas de fabricação, o ganho geométrico pode ser acompanhado por maior custo produtivo.

As condições de manutenção dependem da arquitetura em que o MiniLED foi empregado. Uma unidade de retroiluminação, uma matriz emissiva e um módulo protegido por outro método de encapsulamento apresentam estruturas diferentes, ainda que compartilhem emissores de dimensões próximas. A identificação correta do sistema antecede qualquer avaliação sobre acesso, substituição ou reparo.

O MiniLED ocupa uma faixa intermediária na redução das dimensões dos emissores, mas essa posição não estabelece uma fronteira universal com o MicroLED. A passagem entre as duas categorias envolve escala, materiais semicondutores, integração eletrônica e processos industriais progressivamente mais exigentes.

MICROLED E O DESAFIO DE FABRICAR MILHÕES DE EMISSORES

MicroLED utiliza emissores inorgânicos miniaturizados na formação de matrizes de elevada densidade. Zhu et al. (2022) descrevem essa tecnologia com base em chips inferiores a cinquenta micrômetros, mas a literatura não adota uma fronteira dimensional única para todos os dispositivos. O termo precisa ser interpretado conforme a aplicação e o processo de fabricação examinados.

Como cada subpixel pode emitir sua própria luz, as regiões escuras podem permanecer desligadas sem depender do bloqueio realizado por uma camada posterior. Alta luminância, contraste, resposta rápida e elevada densidade figuram entre os resultados

associados à tecnologia. A obtenção dessas propriedades, contudo, depende do comportamento dos emissores em escala microscópica.

A redução do chip não conserva automaticamente a eficiência apresentada por um LED de maiores dimensões. Com o aumento da relação entre superfície e volume, as regiões laterais exercem influência crescente sobre o funcionamento do dispositivo. Danos de fabricação, defeitos superficiais e recombinação não radiativa podem reduzir a eficiência à medida que o emissor se torna menor, conforme analisam Park et al. (2024).

A formação de imagens coloridas acrescenta outra dificuldade. Uma possibilidade combina emissores vermelhos, verdes e azuis produzidos com materiais semicondutores que respondem de maneira diferente à miniaturização. Outra emprega emissores de uma cor, frequentemente azul, associados a materiais capazes de converter parte da luz nas demais componentes cromáticas.

Na integração RGB, diferenças de eficiência, dimensões e fabricação precisam ser controladas entre os três tipos de emissor. Nos sistemas de conversão, a qualidade depende da deposição precisa dos materiais, do aproveitamento da luz de excitação e da redução de vazamentos ópticos entre subpixels. A cor final passa a resultar da articulação entre materiais, geometria e controle eletrônico.

Os emissores também precisam ser conectados ao circuito responsável pelo acionamento de cada posição. Essa estrutura, denominada backplane, distribui comandos e corrente entre os pixels. A integração entre os semicondutores emissores e o circuito de controle exige alinhamento e conexões compatíveis com dimensões micrométricas.

Prades et al. (2024) situam a integração dos MicroLEDs com o circuito de acionamento entre os limites da produção em escala industrial. Precisão, velocidade e rendimento precisam coexistir no mesmo processo. A transferência de grande quantidade de chips perde eficiência produtiva quando parte dos elementos chega desalinhada, danificada ou sem conexão elétrica confiável.

A transferência em massa procura retirar os emissores do substrato de fabricação e posicioná-los na superfície destinada a formar o display. Coleta e posicionamento, auto-organização orientada por fluidos e liberação assistida por laser integram os métodos investigados. O desempenho de cada alternativa depende da relação entre velocidade, precisão, rendimento e custo.

A escala altera o peso de qualquer defeito. Quando milhões de emissores integram uma tela, uma taxa aparentemente pequena de falhas pode produzir quantidade visualmente inaceitável de pixels defeituosos. Detecção e reparo precisam acompanhar a transferência como etapas do processo industrial, e não como correções eventuais realizadas depois da montagem.

Zhu et al. (2022) relacionam a industrialização do MicroLED à articulação entre transferência, detecção e reparo. Os autores demonstram que rendimento, eficiência produtiva e custo permanecem interdependentes. O processo precisa localizar falhas, preservar os emissores funcionais e substituir unidades defeituosas em uma escala compatível com a matriz produzida.

Essa organização modifica o significado atribuído à manutenção. Nos painéis modulares empregados pelo mercado profissional, parcela expressiva das intervenções ocorre depois da instalação. Em superfícies MicroLED densamente integradas, grande parte da seleção, correção e substituição pertence à fabricação anterior à entrega, o que amplia a participação do produtor na continuidade técnica do equipamento.

O custo final resulta do desempenho combinado de toda a cadeia. Crescimento dos materiais, formação dos chips, separação, transferência, integração, conversão de cor, inspeção e reparo interferem no rendimento alcançado. O aprimoramento de uma etapa produz efeito limitado quando outro estágio permanece incapaz de acompanhar a escala requerida.

MicroLED reúne propriedades de elevado interesse tecnológico, mas sua maturidade varia conforme dimensão, aplicação e método de fabricação. Considerá-lo substituto imediato de todas as telas LED confundiria potencial técnico com disponibilidade industrial. Sua expansão ocorre mediante aplicações específicas e coexistência com arquiteturas já consolidadas.

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA SEM SUBSTITUIÇÃO AUTOMÁTICA

GOB, COB, MiniLED e MicroLED respondem a questões construtivas diferentes. Proteção superficial, integração dos chips, miniaturização dos emissores e fabricação em escala microscópica correspondem a dimensões técnicas distintas. A comparação entre essas soluções requer identificar qual função cada denominação descreve.

O Quadro 4 reúne os princípios construtivos, os resultados procurados e os limites que condicionam o emprego dessas tecnologias.

Quadro 4: Diferenças entre GOB, COB, MiniLED e MicroLED

Tecnologia	Princípio construtivo	Resultado procurado	Limite técnico e operacional
GOB	Cobertura protetora aplicada sobre	Menor exposição da superfície a	Dependência do material, da uniformidade de

	componentes previamente montados	contato, impactos e contaminantes	aplicação e das condições de reparo
COB	Chips montados diretamente no substrato e encapsulados após a integração	Maior densidade, proteção superficial e redução da dependência de encapsulamentos individuais	Precisão de fabricação, rendimento, uniformidade e substituição por unidades integradas
MiniLED retroiluminado	Emissores distribuídos em zonas atrás de um painel LCD	Controle regional de brilho e ampliação da faixa dinâmica	A zona de retroiluminação não corresponde ao pixel responsável pela imagem
MiniLED emissivo	Emissores miniaturizados participam diretamente da formação dos pixels	Maior densidade e redução da distância de observação	Montagem, controle cromático, rendimento produtivo e custo
MicroLED	Emissores microscópicos integrados a circuitos de acionamento	Alta densidade, luminância, contraste e resposta rápida	Eficiência em pequena escala, integração, transferência, detecção, reparo e maturidade industrial

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ROE Visual ([s. d.]), Huang et al. (2020), Daktronics (2024), Zhu et al. (2022), Park et al. (2024) e Prades et al. (2024).

A síntese não estabelece uma hierarquia de superioridade. O GOB pode proteger uma estrutura SMD, enquanto o COB pode utilizar chips de dimensões variadas. MiniLED pode integrar uma

fonte de retroiluminação ou uma matriz emissiva. MicroLED acrescenta exigências de fabricação e integração que não se explicam pela redução do pitch.

O valor de cada solução depende de sua correspondência com a aplicação. Exposição física, distância de observação, contraste requerido, continuidade operacional, disponibilidade de reposição e condições de serviço alteram o desempenho esperado. Um avanço em densidade ou proteção pode ser acompanhado por menor autonomia de intervenção depois da fabricação.

Durabilidade também não significa ausência de falhas. Uma superfície protegida pode reduzir determinados danos e permanecer vulnerável a problemas de alimentação, transmissão de dados, acionamento ou controle térmico. A evolução do encapsulamento modifica a localização das fragilidades, sem eliminar a natureza sistêmica do painel.

A prática profissional de Douglas Fernandes Sodré oferece uma perspectiva centrada nas condições reais de intervenção. Em módulos constituídos por componentes acessíveis, o trabalho técnico concentrava-se na localização da falha e no reparo ou na substituição pontual do elemento comprometido. A integração construtiva incorporou ao diagnóstico a avaliação dos limites de reparabilidade, diferenciando intervenções possíveis em campo daquelas que dependem de equipamentos, processos e controles próprios da estrutura industrial do fabricante.

Essa mudança também ampliou a relevância da documentação, da compatibilidade entre lotes, da disponibilidade de módulos e do suporte técnico. O desempenho visual apresentado no início da operação passou a ser confrontado com

as condições de conservação e reposição durante a vida do equipamento. A evolução técnica alcançou, portanto, tanto a imagem quanto a relação entre produto, fabricante e manutenção.

A trajetória examinada não corresponde à substituição uniforme de uma tecnologia por outra. Diferentes construções continuam coexistindo porque atendem a requisitos distintos de escala, ambiente, desempenho e custo. Essa diversidade explica a presença de painéis com arquiteturas variadas em rodovias, fachadas, lojas, centros de controle, estúdios e eventos.

Quando incorporadas aos ambientes de uso, essas soluções revelam diferenças que interferem na visibilidade, na instalação, na operação e na conservação. A arquitetura do painel adquire sentido concreto em sua relação com as condições de aplicação, que determinam o desempenho percebido e mantido durante a vida útil do sistema.

CAPÍTULO VIII

PAINÉIS DE LED NOS PROJETOS CONTEMPORÂNEOS

A evolução examinada nos capítulos anteriores não conduziu a uma superfície visual de finalidade única. À medida que os painéis adquiriram novas configurações, passaram a integrar sistemas de informação, fachadas, ambientes comerciais, eventos, celebrações, arenas e produções audiovisuais.

Essa expansão modificou o significado do equipamento dentro dos projetos. O desempenho deixou de depender exclusivamente das características eletrônicas e passou a envolver a correspondência entre posição, conteúdo, público e condições de observação. Painéis semelhantes na aparência podem exercer funções muito diferentes quando inseridos em contextos distintos.

Em uma rodovia, a mensagem precisa ser compreendida por pessoas em movimento. Em espaços coletivos, a tela amplia imagens e informações para públicos distribuídos a diferentes distâncias. Nos estúdios, a superfície também precisa responder à câmera e ao fluxo de produção audiovisual. A diversidade não decorre, portanto, do tamanho do painel, mas da função que ele assume em cada sistema.

O repertório profissional de Douglas Fernandes Sodré orienta a análise das aplicações dos painéis de LED a partir das relações entre imagem exibida, condições do ambiente e finalidade de uso. Essa perspectiva aproxima o desempenho técnico das condições concretas de instalação, observação e conservação, permitindo compreender por que configurações semelhantes assumem funções distintas em cada projeto.

Os projetos contemporâneos representam uma etapa em que a evolução técnica se converteu em diversidade de usos. Esse deslocamento conduz o olhar do componente isolado para as relações estabelecidas entre superfície visual, espaço e observador.

QUANDO O PAINEL PASSA A INTEGRAR O AMBIENTE

As fachadas midiáticas tornaram menos rígida a separação entre display e arquitetura. Em vez de ocupar um suporte acrescentado depois da organização do espaço, a superfície eletrônica passou a acompanhar formas construtivas, revestir estruturas e compor zonas permanentes de comunicação.

Essa incorporação alterou a aparência dos ambientes e introduziu uma camada visual capaz de receber conteúdos variados ao longo do tempo. Partes antes estáticas de edifícios e estruturas passaram a modificar sua expressão por meio de imagens eletronicamente controladas.

Dalsgaard e Halskov (2010) inserem as fachadas midiáticas no campo da computação urbana e as relacionam à integração de displays ao ambiente construído. Essa definição desloca a análise da tela como equipamento autônomo para sua participação na configuração material e comunicacional do espaço.

A integração material, entretanto, não assegura coerência comunicacional. Conteúdo, contexto, circulação e relações sociais interferem nos usos que surgem depois da implantação. Uma superfície incorporada ao edifício pode permanecer desconectada da experiência urbana quando desconsidera as condições de observação presentes no local (Dalsgaard; Halskov, 2010).

Essa perspectiva distingue escala de integração. Grandes dimensões ampliam a presença visual, mas não determinam a função exercida. A incorporação ao ambiente ocorre quando

arquitetura, conteúdo e público participam de uma mesma organização espacial.

A superfície eletrônica também modifica as posições de observação. Quem percorre uma praça, avenida ou centro comercial não contempla a imagem a partir de um ponto fixo. Aproximação, afastamento, deslocamento lateral, obstáculos e concentração de pessoas alteram continuamente o contato visual.

Brynskov et al. (2009) relacionam as fachadas midiáticas à atenção distribuída e às diferentes posições ocupadas pelos observadores. Os autores examinaram a instalação *Aarhus by Light*, desenvolvida em uma fachada na Dinamarca, cuja imagem respondia aos movimentos dos visitantes. O caso demonstrou que a superfície poderia participar das práticas realizadas no espaço, em vez de permanecer como suporte passivo.

Nem toda integração precisa ser interativa. Em lojas, aeroportos, terminais e edifícios corporativos, o painel pode exercer funções informativas, comerciais ou institucionais. Ainda assim, localização e conteúdo participam da orientação, da identidade e da percepção do ambiente.

Uma superfície intensa pode competir com a arquitetura, dificultar a compreensão ou produzir excesso de estímulos. Uma instalação menos dominante, por sua vez, pode organizar a atenção com maior coerência. A qualidade da integração decorre da correspondência entre tecnologia, finalidade e situação.

Nas rodovias, essa correspondência assume contornos específicos. O observador permanece em deslocamento, divide a atenção com a condução do veículo e dispõe de pouco tempo para compreender a mensagem. A superfície visual passa a integrar um sistema de informação voltado à mobilidade.

RODOVIAS, MOBILIDADE E INFORMAÇÃO PÚBLICA

O painel de mensagem variável, identificado pela sigla PMV, integra os sistemas de comunicação empregados na gestão viária. Diferentemente da sinalização permanente, pode exibir informações atualizadas sobre acidentes, obras, interdições, congestionamentos, desvios e restrições temporárias. A superfície participa, com isso, do tempo operacional da rodovia.

No contexto brasileiro, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010) prevê painéis móveis para informar eventos localizados e não recorrentes, entre os quais obras emergenciais, acidentes e desvios. Painéis fixos, instalados em pontos definidos, integram a infraestrutura contínua de comunicação. Em ambos os casos, a utilidade depende da correspondência entre a mensagem e a ocorrência informada.

Dudek (2004) considera o PMV uma forma direta de comunicação entre as agências de transporte e o público. Em velocidades rodoviárias, poucos segundos permanecem disponíveis para a leitura, enquanto o motorista distribui sua atenção entre condução, pista, outros veículos, sinalização e condições da via.

Esse contexto redefine o critério de qualidade visual. Nitidez e luminosidade não cumprem sua finalidade quando a mensagem exige tempo superior ao disponível. Preencher linhas ou promover mudanças sucessivas pode ampliar a quantidade de dados e reduzir a compreensão. O desempenho depende da correspondência entre visibilidade, extensão da mensagem e capacidade de assimilação.

Chuva, neblina, posição do sol, curvas, obstáculos e veículos de grande porte também podem reduzir o intervalo de leitura. Dudek (2004) observa que as condições reais de observação limitam a quantidade de informação que o motorista consegue processar.

A comunicação rodoviária depende ainda da confiabilidade. Informações atrasadas ou incompatíveis com a condição encontrada enfraquecem a credibilidade do sistema. Um display de elevada luminosidade pode apresentar uma mensagem desatualizada com perfeita nitidez e, mesmo assim, falhar em sua finalidade.

O PMV integra uma cadeia formada pela identificação da ocorrência, interpretação da condição, definição da informação, exibição e retirada da mensagem quando o evento termina. Sua localização também participa desse processo, pois o aviso precisa chegar ao motorista com antecedência compatível com a decisão que poderá tomar.

O painel rodoviário exerce uma função pública marcada pela objetividade. Seu propósito não está em prolongar a atenção ou demonstrar a capacidade gráfica do equipamento. A comunicação precisa ser concluída durante um contato breve. Nos ambientes comerciais, a mesma tecnologia estabelece outra relação com o tempo e o observador.

LOJAS, FACHADAS, PUBLICIDADE E SINALIZAÇÃO DIGITAL

Nos ambientes comerciais, parte do público caminha, aguarda, observa vitrines ou permanece diante da superfície por intervalos variáveis. Essa condição amplia as possibilidades do conteúdo, mas exige correspondência com o modo de circulação existente no espaço.

A sinalização digital reúne displays, sistemas de gerenciamento e conteúdos atualizáveis destinados a funções comerciais, informativas ou institucionais. Em lojas, pode apresentar produtos, campanhas e orientações. Em centros comerciais, aeroportos e terminais, pode combinar comunicação de marcas com informações úteis ao deslocamento.

A substituição do cartaz fixo por uma superfície programável alterou a temporalidade da comunicação. Uma mesma área passou a receber conteúdos sucessivos sem a troca física de cada peça. Campanhas podem acompanhar horários e acontecimentos, enquanto informações encerradas podem ser retiradas sem refazer a estrutura de exibição.

Essa flexibilidade não torna toda atualização eficiente. Movimento, intensidade luminosa e sucessão de imagens podem atrair a atenção e, ao mesmo tempo, dificultar a identificação da mensagem. Exibir maior quantidade de conteúdo não elimina a necessidade de definir o que aparecerá, por quanto tempo e em qual ponto do percurso.

Bauer et al. (2018) observam que o avanço tecnológico da sinalização digital não foi acompanhado, na mesma proporção, por estudos conclusivos sobre sua aplicação e seus efeitos no varejo. Os autores identificam resultados relacionados à experiência de compra e à percepção do tempo de espera, mas indicam lacunas sobre a combinação entre recursos tecnológicos e contexto comercial.

A posição da tela altera a condição de recepção. Uma mensagem exibida no caixa encontra pessoas em espera, enquanto uma superfície localizada na entrada disputa atenção com vitrines, veículos, iluminação e outras mensagens. A presença do equipamento, por si, não assegura atenção nem resultado mercadológico.

Bauer et al. (2018) também discutem a adaptação do conteúdo ao contexto. Horário, condições climáticas e concentração de pessoas podem modificar a pertinência da programação sem exigir a identificação individual do público. A sequência deixa de ser inteiramente rígida e passa a responder às circunstâncias do lugar.

A fachada digital amplia essa lógica para a escala do edifício. Sua superfície externa pode receber imagens e modificar a expressão arquitetônica ao longo do dia, aproximando arquitetura, publicidade e comunicação urbana. A cobertura de uma fachada por displays, contudo, não assegura coerência com o entorno nem com o tempo de observação.

Em ambientes internos, telas distribuídas sem função reconhecível podem competir entre si. A sinalização adquire maior consistência quando a finalidade permanece identificável, seja conduzir um percurso, apresentar um produto, organizar uma fila ou reforçar a identidade visual.

O conteúdo integra o funcionamento público do painel. Uma instalação eletronicamente estável perde valor quando a programação permanece desatualizada, ilegível ou incompatível com o espaço. Quando a observação passa a envolver uma coletividade reunida em torno de uma atividade comum, a função da tela se modifica novamente.

A IMAGEM COMPARTILHADA EM EVENTOS E ESPAÇOS COLETIVOS

Espaços destinados a grandes públicos apresentam uma diferença inevitável entre as posições de observação. Nem todas as pessoas conseguem acompanhar, com a mesma proximidade, o palco, o celebrante, os músicos ou a atividade esportiva. A superfície de LED atenua essa diferença ao distribuir imagens para diferentes pontos do ambiente.

Em shows, a tela amplia a presença do artista, exhibe detalhes da apresentação e integra vídeos, grafismos e efeitos à construção cênica. Em certos momentos, permite que o público distante acompanhe expressões e movimentos. Em outros, transforma-se em cenário e participa da linguagem visual concebida para o espetáculo.

Nas igrejas, a mediação visual assume características relacionadas à celebração e à participação coletiva. A tela pode ampliar a imagem de quem conduz a atividade, apresentar textos, letras, passagens, avisos e conteúdos audiovisuais. Seu valor decorre da capacidade de tornar visíveis elementos que orientam o acompanhamento da comunidade.

O painel também modifica o equilíbrio do espaço. Quando ocupa posição dominante, pode deslocar a atenção da atividade para a própria imagem. Conteúdos com baixa legibilidade ou mudanças em ritmo incompatível com a celebração introduzem dispersão em um recurso destinado à mediação.

Shows e igrejas compartilham a necessidade de sincronizar conteúdo, captação e acontecimento, embora possuam finalidades diferentes. Uma imagem atrasada, um texto exibido fora do momento ou uma mudança inesperada interrompe a continuidade percebida pelo público.

Nas arenas, o painel integra um sistema mais diversificado. Pode apresentar placar, tempo de jogo, escalações, estatísticas, transmissão ao vivo, repetições, publicidade, orientações e mensagens de segurança. Essas funções convivem durante o mesmo evento e precisam permanecer claramente identificadas.

As diretrizes da Fédération Internationale de Football Association (2022), identificada pela sigla FIFA, estabelecem que as grandes telas dos estádios devem, no mínimo, mostrar o tempo e o placar da partida e permanecer visíveis para espectadores e jogadores. O documento também prevê usos relacionados a escalações, melhores momentos, publicidade e comunicações de emergência.

A tela da arena ultrapassa, portanto, a função de placar ampliado. Ela participa da informação esportiva, da transmissão, da experiência do público e da operação do espaço. Parte das pessoas acompanha o acontecimento físico e consulta a superfície

para obter detalhes; outra parte depende dela com maior frequência em razão da distância ou da posição ocupada.

Em eventos corporativos, feiras e convenções, as telas podem apresentar palestrantes, demonstrações, identidades visuais e conteúdos transmitidos de outros locais. Muitas dessas instalações são temporárias e operam dentro de uma programação com horário definido. À medida que a abertura se aproxima, reduz-se o tempo disponível para testes e correções.

Uma falha visual em uma fachada e uma interrupção durante uma apresentação podem ter origens técnicas semelhantes, mas produzem consequências distintas. Nos espaços coletivos, a continuidade do painel acompanha o tempo do acontecimento e interfere diretamente na experiência compartilhada. Nos estúdios, a superfície passa a integrar a própria produção da imagem.

QUANDO O PAINEL PASSA A SER VISTO PELA CÂMERA

O emprego de painéis em estúdios de televisão, transmissões e produções audiovisuais alterou a posição tradicional da tela. Em vez de permanecer diante do espectador, a superfície pode ser colocada atrás ou ao redor de apresentadores e intérpretes, integrando o cenário captado pela câmera.

Essa mudança cria dois observadores submetidos a condições distintas. O olho humano percebe a imagem no espaço físico, enquanto a câmera a registra por meio de sensor, obturador, lente e parâmetros próprios de exposição. Uma superfície satisfatória para quem está no estúdio pode apresentar alterações de cor ou irregularidades na captação.

Em programas e transmissões, os painéis podem formar cenários, apresentar dados, conectar ambientes e receber conteúdos vinculados à narrativa. Na produção virtual, grandes

conjuntos de telas formam paredes ou volumes que exibem cenários digitais durante a gravação.

O conteúdo também pode ser renderizado em tempo real. Quando o enquadramento se modifica, a perspectiva exibida acompanha a posição da câmera e preserva a relação espacial entre o ponto de vista e o ambiente virtual. A superfície deixa de funcionar como fundo independente da captação.

Long et al. (2025) situam os painéis de LED em fluxos de produção virtual que incluem efeitos visuais captados pela câmera e iluminação baseada em imagens. Nesse ambiente, o gerenciamento de cor relaciona a imagem exibida, os monitores de produção, o processamento visual e as etapas posteriores, com o propósito de preservar a intenção estabelecida para a cena.

Essa cadeia impede que a tela seja avaliada por sua aparência isolada. A cor observada no estúdio precisa manter correspondência com a imagem registrada e tratada. O painel também atua como fonte luminosa sobre pessoas e objetos, produzindo reflexos que podem aproximar os elementos físicos do cenário virtual.

O sincronismo representa outra exigência. Painel, processador, câmera e conteúdo precisam operar de modo coordenado para evitar faixas, cintilação ou descontinuidades na imagem captada. Tais fenômenos demonstram que uma superfície adequada ao olhar direto pode responder de forma diferente diante da câmera.

Na produção virtual, o painel deixa de exibir um conteúdo concluído e passa a participar de sua elaboração. Forma o ambiente, ilumina a cena, responde ao enquadramento e integra o registro audiovisual. As exigências de captação, cor, renderização e sincronismo mostram como a função modifica os critérios empregados na avaliação da mesma base tecnológica.

UMA TECNOLOGIA, DIFERENTES FUNÇÕES

Cada aplicação examinada estabelece condições próprias de observação, conteúdo e operação. O Quadro 5 organiza essas diferenças sem transformar a comparação em uma classificação de equipamentos.

Quadro 5: Funções dos painéis de LED nos projetos contemporâneos

Contexto	Função predominante	Relação com o público
Rodovias	Informação operacional	Observação breve e em movimento
Lojas e sinalização digital	Comunicação comercial e orientação	Proximidade, espera e circulação
Fachadas urbanas	Integração entre arquitetura e mídia	Visualização pública e coletiva
Shows e igrejas	Mediação cênica e ampliação visual	Participação simultânea
Arenas	Informação, transmissão e identidade	Público presencial e remoto
Estúdios	Formação e captura da imagem	Interação entre painel, câmera e conteúdo

Fonte: Elaboração do autor com base em Brynskov et al. (2009), Dalsgaard e Halskov (2010), Dudek (2004), Bauer et al. (2018), Fédération Internationale de Football Association (2022) e Long et al. (2025).

A comparação demonstra que o público não ocupa a mesma posição em todas as aplicações. Em alguns ambientes, desloca-se e dispõe de poucos segundos. Em outros, permanece reunido durante horas. Há situações em que observa a tela diretamente e outras em que recebe a imagem depois de sua captação pela câmera.

Essas diferenças modificam o valor atribuído ao tamanho, à posição e ao conteúdo. Uma superfície capaz de produzir presença visual em um show pode ser inadequada para uma mensagem

rodoviária. Uma tela integrada ao cenário de estúdio responde a exigências que não se apresentam do mesmo modo em uma fachada.

O contexto também redefine a continuidade operacional. Em rodovias, a ausência da mensagem compromete a comunicação pública. Em uma loja, a interrupção afeta a experiência comercial. Em eventos, o tempo de uso coincide com uma programação que não pode ser livremente deslocada. Em estúdios, uma irregularidade pode ser incorporada à imagem captada.

Essa diversidade impede duas simplificações. A tecnologia mais recente não se torna adequada a qualquer ambiente por sua novidade, nem a qualidade apresentada no início da operação assegura a permanência do desempenho. O valor da superfície depende da relação mantida com espaço, conteúdo, público e continuidade de uso.

A expansão dos painéis de LED não ocorreu pela reprodução do mesmo modelo em escalas maiores. A tecnologia alcançou rodovias, fachadas, lojas, palcos, igrejas, arenas e estúdios porque passou a responder a tempos de leitura, formas de presença e níveis de integração diferentes. Essa variedade confirma que a evolução do setor se expressa tanto na construção das telas quanto nas funções que elas assumem na vida contemporânea.

CAPÍTULO IX

DO PAINEL CONECTADO AO SISTEMA RESPONSIVO

A trajetória dos painéis de LED ampliou progressivamente aquilo que a superfície conseguia exibir. Cores, densidade e novas arquiteturas modificaram a imagem e suas aplicações. Esse percurso, entretanto, não termina no que aparece diante do observador.

Uma mudança menos visível ocorre atrás da imagem. Controladoras, sensores, redes, plataformas de gerenciamento e sistemas de energia começam a relacionar o painel com o ambiente e com outros equipamentos. A tela passa a integrar uma estrutura capaz de receber dados, interpretar condições e produzir respostas.

Em configurações convencionais, o equipamento recebe um conteúdo e o apresenta conforme parâmetros definidos. Em sistemas conectados, também pode informar seu estado, registrar ocorrências, responder à iluminação ambiente e integrar mensagens produzidas por sensores externos.

A conectividade, contudo, não torna uma tela inteligente por si mesma. Transmitir dados, emitir um alarme e prever uma falha correspondem a capacidades distintas. A automação baseada em limites programados também não se confunde com inteligência artificial. Cada camada exige dados, infraestrutura e critérios próprios.

O mesmo cuidado se aplica à energia solar. A presença de módulos fotovoltaicos não garante autonomia irrestrita, pois geração, carga, armazenamento e período de operação precisam permanecer compatíveis.

O futuro dos painéis não se define pela reunião de termos tecnológicos em uma instalação. Ele emerge da integração verificável entre exibição, sensoriamento, comunicação, análise, energia e supervisão. O painel deixa de atuar como superfície isolada e passa a integrar um sistema responsivo.

QUANDO A TELA PASSA A TROCAR DADOS

Uma tela eletrônica já possui processamento interno mesmo quando opera sem conexão permanente. A passagem para um sistema conectado ocorre quando começa a trocar informações com outros dispositivos ou com uma estação de gerenciamento.

A internet das coisas, conhecida pela sigla IoT, oferece uma arquitetura para essa relação. A International Organization for Standardization e a International Electrotechnical Commission (2024) tratam a IoT como um sistema formado por entidades físicas e digitais, comunicação, serviços e gerenciamento. O valor não está na conexão isolada, mas na organização das funções que permitem observar ou modificar o estado de um elemento físico.

Aplicada aos painéis de LED, essa perspectiva afasta a associação simplificada entre IoT e acesso pela internet. A integração se amplia quando o sistema identifica o equipamento, conhece seu estado, recebe informações do ambiente e as relaciona a ações definidas.

Os painéis de mensagem variável utilizados em rodovias oferecem uma demonstração consolidada desse princípio. A norma NTCIP 1203 define a interface lógica entre uma estação de gerenciamento e esses painéis, permitindo controle e monitoramento de informações como mensagens exibidas, alimentação, temperatura, umidade, comunicação, ventilação e estado de pixels, conforme os recursos presentes no equipamento (AASHTO; ITE; NEMA, 2014).

Essa padronização mostra que a conectividade ultrapassa a troca da imagem. Sensores e equipamentos associados fornecem dados à estação de gerenciamento, enquanto comandos retornam ao campo. O painel continua tornando a informação visível e, simultaneamente, converte-se em nó de uma rede técnica.

Uma organização pode acompanhar instalações distribuídas sem permanecer diante de cada tela. O benefício depende da qualidade da informação recebida, pois um indicador genérico possui valor limitado quando não distingue perda de comunicação, falha de alimentação, temperatura inadequada ou interrupção da exibição.

A integração exige linguagem comum entre campo e gerenciamento. Identificadores, unidades de medida, estados e regras de comunicação precisam conservar sentido entre equipamentos e plataformas. Componentes incompatíveis podem multiplicar dados e reduzir a compreensão do sistema.

SENSORES E RESPOSTAS AO AMBIENTE

Os sensores introduzem o ambiente na operação do painel ao converter condições físicas em sinais registráveis. Iluminância, temperatura, umidade, presença de água, estado de portas, ventilação e parâmetros elétricos podem participar desse processo. Nem toda leitura exige resposta automática, pois sua utilização depende da confiabilidade do sensor e da consequência de um erro.

O ajuste de luminância conforme a luz externa demonstra uma aplicação direta. Lin et al. (2022) verificaram, em estudo sobre displays de cabine, que a luminância adequada varia com a iluminância ambiente e propuseram um modelo de ajuste automático. Embora o experimento não tenha sido realizado em painéis de grande formato, seus resultados confirmam que uma intensidade fixa não responde igualmente a condições luminosas distintas.

Nos painéis externos, um sensor pode informar a variação da luz, e a controladora aplicar faixas de brilho validadas. O sistema executa uma correspondência entre medição e resposta. Uma regra que determina maior brilho acima de certo nível de iluminância continua sendo automação, não inteligência artificial.

Sensores externos também relacionam o painel a acontecimentos que ultrapassam seu funcionamento. Em sistemas viários, detectores de velocidade, fluxo, visibilidade ou condições meteorológicas produzem dados que orientam mensagens destinadas aos motoristas.

O sistema de alerta DUST, implantado pelo Departamento de Transportes do Arizona, exemplifica essa integração. Estações ambientais, sensores de precipitação e visibilidade, anemômetros, radar e câmeras fornecem informações sobre poeira, vento e condições meteorológicas. Controladores programáveis podem acionar mensagens previamente definidas nos painéis rodoviários quando limites de visibilidade ou velocidade do vento são ultrapassados (United States, 2022).

O caso também revela os limites da automação. A calibração precisou considerar as características locais, e alertas repetitivos levaram usuários a abandonar notificações por correio eletrônico. O relatório registra a necessidade de ajustar a sensibilidade para reduzir alarmes falsos e impedir mensagens incompatíveis com a situação real (United States, 2022).

Um sensor mede determinada variável, em uma posição e durante certo intervalo. Transformar essa leitura em mensagem pública requer conhecer sua representatividade e suas margens de erro. O painel se torna responsivo quando os dados são avaliados por regras compatíveis com a finalidade da instalação.

MONITORAMENTO REMOTO E CONTINUIDADE OPERACIONAL

O monitoramento remoto desloca parte da observação para além do local de instalação. Comunicação, temperatura, alimentação, conteúdo ativo e alertas podem chegar a uma plataforma, permitindo reconhecer determinadas anomalias antes do relato visual.

Esse recurso acrescenta uma camada ao diagnóstico desenvolvido no Capítulo 6, sem substituí-lo. O histórico registra ocorrências e intervenções, enquanto o monitoramento acompanha variáveis e pode indicar quando o comportamento se alterou.

A norma NTCIP 1203 demonstra a variedade de estados que podem ser recuperados em painéis rodoviários. A estação de gerenciamento pode consultar falhas de ventilação, leituras de temperatura e umidade, eventos de energia, comunicação e condições de elementos associados. Esses dados delimitam o problema antes da inspeção local, embora não determinem necessariamente sua causa (AASHTO; ITE; NEMA, 2014).

Uma leitura elevada de temperatura pode decorrer de ventilação comprometida, incidência solar, obstrução ou aumento da carga térmica. O dado remoto indica uma condição, mas sua interpretação ainda exige arquitetura e histórico. A telemetria reduz a invisibilidade da falha sem eliminar a investigação.

O sistema pode ainda confirmar o conteúdo exibido, reduzindo a distância entre comando e resultado. Essa capacidade depende da comunicação. Perda de sinal, cobertura insuficiente ou indisponibilidade da plataforma podem interromper a observação sem que o painel esteja fisicamente danificado.

Ullman, Schroeder e Gopalakrishna (2014) situam os painéis, sensores e meios de comunicação dentro de sistemas de transporte que precisam ser planejados desde as necessidades até a operação,

a manutenção e a avaliação. Essa perspectiva evita que dispositivos conectados sejam adquiridos como peças independentes e reunidos depois da instalação.

A continuidade depende da relação entre essas partes. Um painel disponível, mas desconectado da fonte de informação, pode exibir conteúdo desatualizado. Uma plataforma ativa, mas sem dados confiáveis do campo, produz aparência de controle sem correspondência com o sistema físico.

O QUE A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PODE PREVER

A inteligência artificial ingressa nessa trajetória depois que o sistema começa a produzir dados suficientes para análise. Sensores, registros de alarmes, parâmetros de operação e históricos de manutenção formam a base sobre a qual modelos podem reconhecer relações. Sem essa base, a expressão manutenção preditiva permanece mais próxima de expectativa comercial do que de capacidade demonstrada.

Pech, Vrchota e Bednář (2021) relacionam sensores inteligentes, IoT e análise de dados ao avanço da manutenção preditiva. Os autores mostram que a coleta contínua amplia o conhecimento sobre o estado dos equipamentos, mas exige processamento capaz de transformar grande volume de informações em decisões de manutenção.

A análise descritiva informa o que aconteceu, a diagnóstica procura explicar a ocorrência e a preditiva estima a probabilidade de um comportamento futuro. Em um painel, o alarme de temperatura alta descreve uma condição presente. A previsão exigiria estimar antecipadamente a probabilidade de degradação ou falha e confrontar o resultado com os acontecimentos posteriores.

Scaife (2024) observa que a inteligência artificial pode ampliar a manutenção preditiva por meio da análise de padrões,

mas sua implantação exige estratégia de dados, recursos técnicos e capacitação. A tecnologia não corrige automaticamente registros incompletos, medições instáveis ou classificações equivocadas.

Os painéis apresentam um desafio particular. Falhas relevantes podem ocorrer com baixa frequência, enquanto modelos supervisionados dependem de exemplos históricos identificados. Temperatura, brilho, tempo de operação, conteúdo, posição do módulo e intervenções anteriores também precisam conservar contexto. Valores isolados possuem reduzida capacidade explicativa.

A inteligência artificial pode reconhecer combinações difíceis de representar por uma regra única. Variações discretas de corrente, temperatura e comunicação, quando analisadas em conjunto ao longo do tempo, podem indicar mudança de comportamento. Essa possibilidade não autoriza concluir que toda anomalia antecede uma falha ou que todo padrão estatístico possui causa técnica conhecida.

A supervisão humana permanece necessária porque previsão e decisão não são equivalentes. O modelo pode indicar risco aumentado, mas a intervenção depende da função da tela, da criticidade do serviço, do acesso, da disponibilidade de peças e das consequências de uma parada. Em um evento, em uma rodovia e em uma fachada comercial, o mesmo nível de risco pode produzir respostas diferentes.

A análise preditiva precisa incorporar seus desfechos. Alertas sem anomalia e falhas sem aviso devem retornar à avaliação. A inteligência artificial pode selecionar padrões e priorizar investigações, mas a decisão técnica continua exigindo interpretação, confirmação e responsabilidade.

ENERGIA SOLAR E AUTONOMIA POSSÍVEL

Rodovias, áreas remotas, instalações temporárias e sistemas de alerta constituem contextos em que a geração fotovoltaica pode sustentar parte da operação. Essa integração começa pelo perfil da carga. Paineis, controladores, sensores, comunicação e equipamentos auxiliares consomem energia em horários e intensidades diferentes.

McNutt et al. (1999) estabelecem que o desempenho de sistemas fotovoltaicos autônomos depende da correspondência entre geração, carga, bateria, controlador e condições do local. Os autores definem autonomia como o período em que a bateria plenamente carregada consegue atender à carga sem contribuição do arranjo fotovoltaico.

Energia solar não equivale a fornecimento contínuo e direto. A radiação varia ao longo do dia e das condições meteorológicas, enquanto o armazenamento sustenta a carga em períodos sem geração. Grandes telas de alta luminância e uso prolongado impõem outra escala de arranjo fotovoltaico e baterias.

O sistema DUST oferece uma referência cuidadosa. A energia fotovoltaica alimenta locais remotos de telemetria e aviso integrados à infraestrutura rodoviária. O documento não afirma que todas as grandes superfícies de LED funcionam de modo autônomo por energia solar. O caso comprova a pertinência da solução para componentes remotos dentro de um sistema maior (United States, 2022).

A integração fotovoltaica em painéis de LED deve ser compreendida como parte da arquitetura energética do sistema, e não como uma fonte dissociada da demanda efetiva. Seu dimensionamento precisa compatibilizar perfil de carga, regime de operação, autonomia prevista, perdas de conversão, capacidade de armazenamento e condições de acesso para manutenção, incluindo períodos de baixa disponibilidade solar. A origem renovável da

energia não elimina as exigências de projeto, segurança e continuidade operacional.

A autonomia nasce do equilíbrio entre função e recursos disponíveis. Em certos contextos, a solução fotovoltaica pode atender ao conjunto. Em outros, sustenta sensores, comunicação ou contingência. Ajustes destinados a reduzir a carga não podem comprometer a legibilidade nem a finalidade da tela.

CONNECTIVIDADE TAMBÉM PRODUZ RISCOS

Ao receber comandos por rede, o painel incorpora riscos que não existiam na mesma proporção quando sua operação permanecia local. Acesso indevido, alteração de mensagens, interrupção de comunicação, configurações não autorizadas e software desatualizado podem afetar tanto o equipamento quanto o conteúdo apresentado ao público.

Ullman, Schroeder e Gopalakrishna (2014) registram ocorrências em que painéis portáteis de mensagem variável foram acessados ilegalmente e tiveram seus textos alterados. O episódio demonstra que a segurança digital possui consequência física e comunicacional. Uma credencial fraca pode modificar uma informação visível em uma via pública.

Fagan et al. (2020), no núcleo de capacidades de segurança para dispositivos IoT do National Institute of Standards and Technology, organizam funções relacionadas à identificação do dispositivo, configuração, proteção de dados, controle de acesso às interfaces, atualização de software e percepção do estado de segurança.

Essas capacidades modificam a vida útil do painel conectado. Manter módulos, fontes e cabos em funcionamento não basta quando a plataforma depende de contas, permissões, protocolos e atualizações. A proteção precisa definir quem executa cada ação,

registrar mudanças e prever formas de recuperação. A rastreabilidade aproxima segurança digital e responsabilidade operacional.

Conectar o painel amplia possibilidades e superfícies de exposição. A facilidade de acesso remoto perde coerência quando reduz os controles que protegem o equipamento e a informação.

INTEGRAÇÃO SEM PROMESSAS EXCESSIVAS

Os recursos examinados não representam etapas obrigatórias para toda instalação. Um painel pode cumprir sua finalidade sem inteligência artificial, autonomia fotovoltaica ou numerosos sensores. A escolha depende do ambiente, da função, da criticidade e da capacidade de sustentar o sistema.

O Quadro 6 sintetiza as camadas que transformam a tela conectada em sistema responsivo e os limites que acompanham cada uma.

Quadro 6: Camadas de integração dos painéis conectados

Camada	Capacidade acrescentada	Limite de interpretação
Conectividade	Troca de dados e comandos	Estar conectado não comprova funcionamento correto
Sensoriamento	Medição do ambiente e do equipamento	A leitura representa uma variável e uma posição
Automação	Resposta a regras e limites programados	Regra automática não equivale a inteligência artificial
Monitoramento remoto	Acompanhamento de estados e alertas	O dado indica condição, mas pode não revelar a causa

Análise preditiva	Estimativa de anomalias ou falhas futuras	A qualidade depende de histórico, contexto e validação
Energia fotovoltaica	Geração local e possibilidade de autonomia	Carga, armazenamento e recurso solar condicionam o resultado
Segurança digital	Controle de acesso, atualização e rastreabilidade	A proteção precisa acompanhar toda a vida do sistema

Fonte: Elaboração do autor com base em ISO e IEC (2024), AASHTO, ITE e NEMA (2014), Pech, Vrchota e Bednář (2021), Fagan et al. (2020) e McNutt et al. (1999).

A comparação mostra que cada capacidade acrescenta uma exigência. Sensores precisam ser calibrados, redes permanecer disponíveis, modelos ser avaliados, baterias conservar desempenho e acessos ser controlados. O sistema se torna mais informado e mais dependente da coordenação entre partes.

O avanço tecnológico se torna consistente quando responde a uma necessidade identificada. Em vez de reunir recursos por prestígio, o projeto define quais dados alteram decisões, quais respostas podem ser automatizadas e quais permanecem sob supervisão. A inteligência do sistema nasce menos da quantidade de funções e mais da coerência mantida entre elas.

Depois de transformar o brilho em imagem e a imagem em presença cotidiana, os painéis começam a participar de redes capazes de perceber condições e modificar respostas. Essa passagem reúne eletrônica, energia, comunicação e análise em uma arquitetura que precisa permanecer compreensível para continuar cumprindo sua função.

CAPÍTULO X

O FUTURO DA INDÚSTRIA VISUAL E O NOVO PERFIL PROFISSIONAL

A evolução dos painéis de LED não resultou da alteração isolada de um componente. Materiais semicondutores, encapsulamentos, processos de montagem, controle eletrônico, alimentação, estruturas, redes e software avançaram até formar sistemas visuais cuja operação articula imagem, energia, dados e ambiente. À medida que essas relações se ampliaram, o trabalho deixou de se concentrar em tarefas separadas e passou a exigir leitura integrada do projeto.

Esse perfil não pressupõe domínio irrestrito de todas as especialidades. Ele se define pela capacidade de compreender como diferentes áreas participam do mesmo sistema, reconhecer os limites da própria atuação e comunicar-se com os responsáveis por cada decisão. O futuro da indústria visual dependerá dessa competência tanto quanto de novos emissores, controladoras ou plataformas.

QUANDO A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA MODIFICA O TRABALHO

A miniaturização dos componentes, o aumento da densidade visual e a conexão dos painéis a outros sistemas transferiram parte da complexidade da superfície para processos menos perceptíveis. Uma imagem uniforme pode ocultar placas densamente montadas, circuitos de controle, redes de comunicação, parâmetros de software e exigências térmicas que precisam permanecer coordenados.

Essa condição amplia o conhecimento requerido. Um módulo apagado pode indicar defeito no próprio componente, falha de alimentação, perda de dados, configuração inadequada ou atuação de um mecanismo de proteção. Na implantação, a análise também precisa relacionar condições ambientais, finalidade da tela e interfaces previstas com outros sistemas.

Hecklau et al. (2016) organizam as competências relacionadas à digitalização industrial em dimensões técnicas, metodológicas, sociais e pessoais. O mapeamento de Kipper et al. (2021) identifica, na literatura sobre Indústria 4.0, conhecimentos tecnológicos e analíticos associados à comunicação, ao trabalho em equipe e à aprendizagem contínua. Embora esses estudos não tratem especificamente de painéis de LED, sua convergência permite compreender por que o domínio do equipamento não encerra a preparação exigida quando tecnologias físicas e digitais operam em conjunto.

COMPETÊNCIAS QUE SE ENCONTRAM NO MESMO PROJETO

Eletrônica e elétrica permanecem na base dos painéis, mas agora se articulam com redes, controle e software. Distinguir essas camadas permite localizar a natureza de uma ocorrência, selecionar as verificações pertinentes e encaminhar a análise ao campo responsável, sem confundir falha de comunicação, defeito eletrônico e alteração de configuração.

A leitura de projeto organiza essa análise. Diagramas elétricos, distribuição de circuitos, arquitetura de dados, posicionamento de equipamentos e especificações de montagem registram relações que não devem ser reconstruídas por tentativa. Quando a documentação corresponde ao sistema instalado, reduz ambiguidades e permite que intervenções futuras preservem decisões adotadas durante a implantação.

O conhecimento visual também integra esse perfil. Resolução, pitch, distância de observação, luminância e conteúdo não constituem preocupações exclusivas de quem escolhe a tela. Esses fatores interferem na especificação, no ajuste e na avaliação do resultado. O desempenho técnico precisa ser interpretado em relação à função que a imagem exercerá no ambiente.

A trajetória profissional de Douglas Fernandes Sodré reúne experiências em eletrônica, sistemas elétricos, instalação, manutenção, suporte técnico e energia solar, compondo um repertório interdisciplinar relacionado às diferentes etapas dos sistemas de LED. Esse percurso permite compreender que a visão integrada da tecnologia se forma pela articulação entre conhecimento técnico, prática de campo, consulta à documentação e análise das decisões adotadas. Tal integração não pressupõe domínio irrestrito de todas as especialidades envolvidas, mas capacidade de reconhecer suas interfaces, respeitar os limites de atuação e recorrer à cooperação entre profissionais qualificados.

A convergência de conhecimentos não elimina especialidades. Projetos mais complexos dependem da distribuição clara de responsabilidades e de uma linguagem comum entre as equipes. A competência integradora permite reconhecer quando uma decisão pertence a outro campo e fornecer informações suficientes para que o responsável a avalie com precisão.

DIAGNÓSTICO, DOCUMENTAÇÃO E DECISÃO TÉCNICA

Diagnóstico e documentação adquirem valor profissional quando convertem sinais, histórico e medições em informações verificáveis para a decisão. Registros de configuração, logs, alarmes e dados de telemetria precisam ser interpretados em relação à arquitetura física e comunicados com precisão entre as equipes. Em vez de registrar que o painel parou, a descrição técnica deve

situar o momento da ocorrência, o conteúdo exibido, os estados observados e as ações executadas, permitindo que profissionais com responsabilidades distintas reconheçam recorrências, avaliem hipóteses e definam a intervenção compatível com suas atribuições.

SEGURANÇA, LIMITES DE ATUAÇÃO E RESPONSABILIDADE

A integração de competências não autoriza atuação sem qualificação. Conforme a escala e o local da instalação, um projeto pode envolver circuitos elétricos, trabalho em altura, içamento de cargas, redes de dados e exposição ao público ou ao tráfego. Os riscos e as responsabilidades correspondentes precisam ser identificados antes da execução.

A nova redação da Norma Regulamentadora n. 10, publicada em 2026 e com vigência estabelecida para 1º de junho de 2027, define requisitos e diretrizes mínimos para a implementação e o acompanhamento do controle dos riscos ocupacionais e das medidas de prevenção em instalações elétricas e serviços com eletricidade (Brasil, 2026). A norma confirma que a segurança deve integrar o planejamento, a montagem, a operação e a manutenção, em correspondência com os perigos presentes em cada atividade.

No âmbito das profissões fiscalizadas pelo Sistema Confea/Crea, a Resolução n. 1.073/2016 relaciona títulos, atividades, competências e campos de atuação à formação profissional. O Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (2016) inclui atividades como projeto, supervisão, inspeção, execução, instalação, operação e manutenção, cuja atribuição pode ocorrer integral ou parcialmente conforme a formação e a análise do conselho competente.

Essa delimitação impede que familiaridade com um equipamento seja confundida com autorização para qualquer

intervenção. Reconhecer limites protege o trabalhador, a equipe, o contratante e o público. A responsabilidade técnica também exige recusar improvisações que ocultem riscos, registrar alterações e encaminhar decisões que ultrapassem a competência formal de quem atua no sistema.

APRENDER EM UM SETOR QUE NÃO PERMANECE ESTÁTICO

A formação inicial oferece bases, mas as mudanças tecnológicas dos painéis exigem atualização contínua. Novos encapsulamentos, protocolos, plataformas, fontes, materiais de proteção e métodos de diagnóstico modificam procedimentos e introduzem incompatibilidades. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2023) relaciona as transições digital e ambiental à necessidade de oportunidades formativas capazes de responder às mudanças do trabalho, questão que alcança a indústria visual à medida que conectividade, eficiência energética e integração de dados convivem com instalações de gerações anteriores.

Aprender continuamente não equivale a acompanhar lançamentos de modo indiscriminado. Significa compreender princípios, consultar documentação, testar hipóteses, comparar resultados e incorporar conhecimento validado ao trabalho. A atualização perde consistência quando se limita ao vocabulário comercial ou à reprodução de soluções adotadas em contextos diferentes.

O profissional do futuro precisará transitar entre equipamentos de idades distintas. Painéis baseados em DIP e SMD coexistem com soluções que empregam diferentes formas de encapsulamento, proteção e integração, entre elas GOB e COB, além do avanço de MiniLED e MicroLED. A maturidade técnica reside em avaliar cada sistema conforme sua finalidade, sem

presumir que a tecnologia mais recente substitua automaticamente as anteriores.

A história iniciada com um brilho experimental alcança uma etapa em que a luz programável depende de profissionais capazes de interpretar relações invisíveis atrás da imagem. As tecnologias continuarão a mudar, mas a qualidade dos sistemas permanecerá vinculada ao conhecimento, à segurança, à documentação e ao julgamento empregado para integrá-las em contextos reais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A trajetória dos painéis de LED demonstra que a evolução da imagem eletrônica não pode ser compreendida como uma sucessão linear de componentes menores, telas mais brilhantes e resoluções superiores. Cada mudança construtiva alterou, simultaneamente, a forma de produzir a luz, organizar os pixels, controlar a imagem, distribuir energia, dissipar calor e intervir sobre o equipamento. A superfície visível constitui, portanto, o resultado de uma arquitetura técnica que se tornou progressivamente mais integrada.

A miniaturização dos emissores, o aumento da densidade de pixels e a integração construtiva aproximaram a imagem do observador, mas também tornaram mais rigorosas as exigências de uniformidade, controle cromático, precisão de montagem e estabilidade operacional. Esses avanços não eliminaram os compromissos de projeto. Densidade, brilho, reparabilidade e dissipação térmica mantêm relações que precisam ser avaliadas conforme o ambiente, a finalidade da exibição, o regime de funcionamento e as condições de conservação do sistema.

A eficiência energética participa dessa mesma arquitetura de decisões. O consumo efetivo resulta da interação entre brilho programado, conteúdo exibido, perdas de conversão, temperatura e tempo de operação, enquanto o comportamento térmico revela esforços capazes de comprometer componentes e conexões. Eficiência, segurança elétrica e confiabilidade convergem, portanto, na construção de uma imagem cuja estabilidade depende de elementos situados fora do campo visual do público.

A integração tecnológica também modificou a manutenção. O reparo concentrado na substituição pontual de componentes cedeu espaço a diagnósticos que envolvem módulos, placas, configurações, comunicação, compatibilidade e limites de

reparabilidade. Restabelecer a imagem deixou de representar, por si, a conclusão do serviço, pois a intervenção precisa preservar o comportamento do conjunto, documentar as decisões e reduzir a reincidência das falhas. Como cada ambiente atribui pesos distintos à legibilidade, à resolução, à resistência, ao sincronismo e à continuidade, a adequação do painel decorre da correspondência entre arquitetura técnica e finalidade de uso.

A conexão com sensores, redes, plataformas de gerenciamento, sistemas fotovoltaicos e mecanismos responsivos amplia o painel para além da exibição programada. A tela passa a integrar estruturas capazes de receber dados, ajustar parâmetros e responder às condições ambientais ou operacionais. Essa capacidade amplia possibilidades de comunicação e controle, mas também exige compatibilidade, supervisão, segurança, qualificação profissional e definição clara das responsabilidades envolvidas.

A contribuição autoral de Douglas Fernandes Sodré articula conhecimento técnico e situações de campo. Essa perspectiva demonstra que compreender um painel exige observar as relações entre seus componentes, pois decisões relativas à instalação, ao consumo, à segurança e à manutenção repercutem na estabilidade, na reparabilidade e na duração do sistema.

A evolução examinada ao longo da obra revela, por fim, uma transformação mais ampla do que a melhoria das telas. Ela reorganiza projetos, práticas profissionais, modelos de manutenção, formas de comunicação e experiências visuais. O futuro da indústria dependerá da capacidade de integrar resolução, eficiência, confiabilidade, reparabilidade e responsabilidade técnica. A tecnologia continuará mudando, mas a qualidade das escolhas permanecerá vinculada à compreensão do sistema como conjunto, e não ao fascínio isolado por suas características mais recentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent Surface Mount PLCC-2 LED Products**: selection guide. [S. l.]: Agilent Technologies, 2002. Documento 5988-5617EN. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/3842.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

AKASAKI, Isamu. Key inventions in the history of nitride-based blue LED and LD. **Journal of Crystal Growth**, v. 300, n. 1, p. 2-10, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.259>.

AMANO, Hiroshi; SAWAKI, Norikatsu; AKASAKI, Isamu; TOYODA, Yasuhiro. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high-quality GaN film using an AlN buffer layer. **Applied Physics Letters**, v. 48, n. 5, p. 353-355, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.96549>.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS; INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **NTCIP 1203 v03: National Transportation Communications for ITS Protocol**: object definitions for dynamic message signs (DMS). Versão 03.05. [S. l.]: AASHTO; ITE; NEMA, 2014. Disponível em: <https://www.ntcip.org/file/2018/11/NTCIP1203v03f.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

ASHRAF, Maliha; CHAPIRO, Alexandre; MANTIUK, Rafał K. Resolution limit of the eye: how many pixels can we see? **Nature Communications**, v. 16, art. 9086, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64679-2>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Versão corrigida: 2008. ISBN 978-85-07-00562-9.

BAUER, Christine; GARAUS, Marion; STRAUSS, Christine; WAGNER, Udo. Research directions for digital signage systems in retail. **Procedia Computer Science**, v. 141, p. 503-506, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.135>.

BORDEN, Howard C.; PIGHINI, Gerald P. Solid-state displays. **Hewlett-Packard Journal**, Palo Alto, v. 20, n. 6, p. 2-12, fev. 1969. Disponível em: https://vtlda.org/pubs/HP_Journal/HP_Journal_1969-02.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

BORDEN, Howard C.; STEWARD, Robert L. Solid-state alphanumeric displays. **Hewlett-Packard Journal**, Palo Alto, v. 21, n. 11, p. 2-9, jul. 1970. Disponível em: <https://hparchive.com/Journals/HPJ-1970-07.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria MTE n. 737, de 29 de maio de 2026**. Aprova a nova redação da Norma Regulamentadora n. 10 (NR-10): Segurança em instalações elétricas e serviços em eletricidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 167-173, 1 jun. 2026. Retificada em 24 jun. 2026. Vigência em 1 jun. 2027. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/sst-portarias/2026-1/portaria-mte-no-737-nova-nr-10.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria n. 598, de 7 de dezembro de 2004**. Altera a Norma Regulamentadora n. 10, que trata de instalações e serviços em eletricidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 74-77, 8 dez. 2004. Retificada em 18 jan. 2005. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/sst-portarias/2004/portaria_598_nova_nr_10.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

BRYNSKOV, Martin; DALSGAARD, Peter; EBSSEN, Tobias; FRITSCH, Jonas; HALSKOV, Kim; NIELSEN, Rune. Staging urban interactions with media façades. In: GROSS, Tom et al.

(ed.). **Human-computer interaction: INTERACT 2009**. Berlin: Springer, 2009. v. 5726, p. 154-167. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03655-2_20.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **Resolução n. 1.073, de 19 de abril de 2016**. Regulamenta a atribuição de títulos, atividades, competências e campos de atuação profissionais aos profissionais registrados no Sistema Confea/Crea para efeito de fiscalização do exercício profissional no âmbito da Engenharia e da Agronomia. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 76, p. 245-249, 22 abr. 2016. Disponível em: <https://normativos.confea.org.br/Ementas/Visualizar?id=59111>. Acesso em: 26 jul. 2026.

CREE LED. **CLMWB-FKA: PLCC4 3 in 1 SMD LED**. Rev. 4. Durham: Cree LED, 2025. Disponível em: <https://downloads.cree-led.com/files/ds/h/HB-CLMWB-FKA.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

CREE LED. **HB Through-Hole LEDs**. Durham: Cree LED, [s. d.]. Disponível em: <https://www.cree-led.com/products/leds/hb/through-hole/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

CREE LED. **New high brightness LEDs improve large-format video displays**. Durham: Cree LED, 8 fev. 2023. Disponível em: <https://www.cree-led.com/news/new-high-brightness-leds-improve-large-format-video-displays/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

CREE LED. **UHD1110-FKA: RGB SMD LED**. Rev. 4. Durham: Cree LED, 2024. Disponível em: <https://downloads.cree-led.com/files/ds/h/HB-UHD1110-FKA.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

DAKTRONICS. **Chip on board takes flight**. Brookings: Daktronics, 14 out. 2024. Disponível em: <https://www.daktronics.com/blog/chip-on-board-takes-flight>. Acesso em: 26 jul. 2026.

DAKTRONICS. **Generic service Vanguard VL-3500 20 mm series display manual**. Rev. 00. Documento DD3934467. Brookings: Daktronics, 2018. Disponível em: <https://www.daktronics.com/web-documents/manuals/dd3934467.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

DALSGAARD, Peter; HALSKOV, Kim. Designing urban media façades: cases and challenges. In: SIGCHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 28., 2010, Atlanta. **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. New York: Association for Computing Machinery, 2010. p. 2277-2286. DOI: <https://doi.org/10.1145/1753326.1753670>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de sinalização de obras e emergências em rodovias**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2010. 218 p. (Publicação IPR, 738). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/738_manual_sinalizacao_obras_emergenciais_rodovias.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

DUDEK, Conrad L. **Changeable message sign operation and messaging handbook**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2004. Report n. FHWA-OP-03-070. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/49851>. Acesso em: 26 jul. 2026.

EOS/ESD ASSOCIATION. **Fundamentals of electrostatic discharge: part two: principles of ESD control**. Rome: EOS/ESD Association, 2020. Disponível em: <https://www.esda.org/esd-overview/esd-fundamentals/part-2-principles-of-esd-control/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. **Fundamentals of power electronics**. 3. ed. Cham: Springer,

2020. ISBN 978-3-030-43879-1. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>.

FAGAN, Michael J.; MEGAS, Katerina N.; SCARFONE, Karen; SMITH, Matthew. **IoT device cybersecurity capability core baseline**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2020. (NISTIR 8259A). DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8259A>.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE FOOTBALL ASSOCIATION. **FIFA Football Stadiums Guidelines**. Zurich: FIFA, 2022. Seção 5.7, Information technology. Disponível em: <https://inside.fifa.com/innovation/stadium-guidelines/technical-guidelines/stadiums-guidelines/information-technology>. Acesso em: 26 jul. 2026.

GARNER, R.; TAYLOR, D. Surface mount packaging. **Microelectronics Journal**, v. 17, n. 3, p. 5-13, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(86\)80170-7](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(86)80170-7).

HECKLAU, Fabian; GALEITZKE, Mila; FLACHS, Sebastian; KOHL, Holger. Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 1-6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>.

HOLONYAK JR., Nick; BEVACQUA, S. F. Coherent (visible) light emission from Ga (As_{1-x}P_x) junctions. **Applied Physics Letters**, v. 1, n. 4, p. 82-83, 1962. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1753706>.

HUANG, Yuge; HSIANG, En-Lin; DENG, Ming-Yang; WU, Shin-Tson. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. **Light: Science & Applications**, v. 9, art. 105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61340-5-1:2024: electrostatics: part 5-1: protection of**

electronic devices from electrostatic phenomena: general requirements. 3. ed. Geneva: IEC, 2024. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/74748>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. **Trends in photovoltaic applications 2024**. Report IEA PVPS T1-43:2024. [S. l.]: IEA PVPS, 2024. ISBN 978-3-907281-68-0. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **ISO/IEC 30141:2024**: Internet of Things (IoT): reference architecture. 2. ed. Geneva: ISO, 2024. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/88800.html>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R BT.2020-2**: parameter values for ultra-high-definition television systems for production and international programme exchange. Geneva: ITU, 2015b. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2020-2-201510-I>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R BT.709-6**: parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. Geneva: ITU, 2015a. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709-6-201506-I>. Acesso em: 26 jul. 2026.

KIPPER, Liane Mahlmann; IEPSEN, Sandra; DAL FORNO, Ana Julia; FROZZA, Rejane; FURSTENAU, Leonardo; AGNES, Jéssica; COSSUL, Danielli. Scientific mapping to identify competencies required by Industry 4.0. **Technology in Society**,

v. 64, art. 101454, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101454>.

KRAMES, Michael R.; SHCHEKIN, Oleg B.; MUELLER-MACH, Regina; MUELLER, Gerd O.; ZHOU, Ling; HARBERS, Gerard; CRAFTORD, M. George. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. **Journal of Display Technology**, v. 3, n. 2, p. 160-175, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/JDT.2007.895339>.

LEYARD OPTOELECTRONIC. **Leyard TW Series LED Video Wall user manual**. [S. l.]: Leyard Optoelectronic, 2016. Disponível em: <https://www.planar.com/media/435767/leyard-tw-led-video-wall-series-user-manual-english.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

LIN, Caixin; YI, Xiangwei; JI, Zhengxin; HOU, Dandan; LIN, Yandan. Optimum display luminance under a wide range of ambient light for cockpit displays. **Optics Express**, v. 30, n. 21, p. 38439-38457, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.466039>.

LIU, Sheng; LUO, Xiaobing. **LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing**. Singapore: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-82783-3. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470827857>.

LONG, David; BOGART, Rod; STEPHENS, Spencer; MEININGER, Catherine; GOLDSTONE, Joseph; KANG, Tim; BRILLHART, Kathryn; GEDULDICK, Jim. Color management principles for LED panels in on-set virtual production. **SMPTE Motion Imaging Journal**, v. 134, n. 2, p. 43-52, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5594/JMI.2025/XEJK1138>.

MCNUTT, P.; KROPOSKI, B.; HANSEN, R.; DEBLASIO, R.; THOMAS, M.; DURAND, S.; ROSENTHAL, A.; HUTCHINSON, P. **Procedures for determining the performance of stand-alone photovoltaic systems**. Golden:

National Renewable Energy Laboratory, 1999. (NREL/TP-520-27031). DOI: <https://doi.org/10.2172/14449>.

MEAN WELL. **FAQ: functionality aspect**. [S. l.]: Mean Well, [s. d.]. Disponível em: <https://www.meanwell.com/qa.aspx?c=9>. Acesso em: 26 jul. 2026.

MORENO, Ivan; BERMÚDEZ, David; AVENDAÑO-ALEJO, Maximino. Light-emitting diode spherical packages: an equation for the light transmission efficiency. **Applied Optics**, v. 49, n. 1, p. 12-20, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.49.000012>.

NAKAMURA, Shuji; MUKAI, Takashi; SENO, Masayuki. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes. **Applied Physics Letters**, v. 64, n. 13, p. 1687-1689, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.111832>.

NICHIA CORPORATION. **Assembly and handling precautions for LEDs**. Tokushima: Nichia Corporation, 24 jan. 2023. Documento SP-QR-C2-210503-3. Disponível em: https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/tech/SP-QR-C2-210503-3-E_Assembly%20and%20Handling%20Precautions%20for%20LEDs.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

NICHIA CORPORATION. **LED mounting process techniques for full-color RGB SMD LEDs with a lens**. Tokushima: Nichia Corporation, jul. 2024. Documento SP-QR-C2-240562. Disponível em: https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/tech/SP-QR-C2-240562-E_LED%20Mounting%20Process%20Techniques%20for%20Full-color%20RGB%20SMD%20LEDs%20with%20a%20Lens.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

NICHIA CORPORATION. **LED mounting process techniques**. Tokushima: Nichia Corporation, 14 jul. 2021. Documento SP-QR-C2-210760-1. Disponível em: https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/tech/SP-QR-C2-210760-1-E_LED%20Mounting%20Process%20Techniques.pdf.

ld.nichia.co.jp/api/data/spec/tech/SP-QR-C2-210760-1-E_LED%20Mounting%20Process%20Techniques.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

NOVASTAR. **VX400 all-in-one controller user manual**. Versão 1.2.0. Xi'an: NovaStar, 8 jul. 2024. Disponível em: <https://oss.novastar.tech/uploads/2024/07/VX400-All-in-One-Controller-User-Manual-V1.2.0.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **OECD Skills Outlook 2023: skills for a resilient green and digital transition**. Paris: OECD Publishing, 2023. ISBN 978-92-64-80712-9. DOI: <https://doi.org/10.1787/27452f29-en>.

PARK, Jeong-Hwan; PRISTOVSEK, Markus; AMANO, Hiroshi; SEONG, Tae-Yeon. Recent advances in micro-pixel light emitting diode technology. **Applied Physics Reviews**, v. 11, n. 2, art. 021319, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0177550>.

PECH, Martin; VRCHOTA, Jaroslav; BEDNÁŘ, Jiří. **Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory**: review. **Sensors**, v. 21, n. 4, art. 1470, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041470>.

PLANAR SYSTEMS. **Planar DirectLight Pro Series LED video wall displays**. [S. l.]: Planar Systems, jun. 2023. Disponível em: https://www.planar.com/media/443898/planar-directlight-pro-series_brochure.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

PLANAR SYSTEMS. **Planar UltraRes L 136 Series user manual**. Part number 020-1427-00C. [S. l.]: Planar Systems, maio 2024. Disponível em: <https://www.planar.com/media/rlspmta0/planar-ultrares-l-series-url-136-user-manual.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2026.

PLANAR SYSTEMS. **Recommended viewing distance & direct view LED**. [S. l.]: Planar Systems, set. 2021. Disponível em:

<https://www.planar.com/media/439462/understanding-viewing-distance.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

PRADES, J. D.; MEIERHOFER, F.; DIÉGUEZ, Á.; WAAG, A. MicroLED arrays: a perspective beyond displays. **Applied Physics Letters**, v. 125, n. 15, art. 150504, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0223867>.

ROE VISUAL. **Thesaurus: LED technology for virtual production and film**. [S. l.]: ROE Visual, [s. d.]. Disponível em: <https://www.roevisual.com/us-en/knowledge-and-support/thesaurus-led-technology-for-virtual-production-xr-film>. Acesso em: 26 jul. 2026.

ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES. **Efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources**. Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 2014. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2014.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

SCAIFE, Anthony D. Improve predictive maintenance through the application of artificial intelligence: a systematic review. **Results in Engineering**, v. 21, art. 101645, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101645>.

SCHUBERT, E. Fred. **Light-emitting diodes**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-86538-8. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>.

SCHUBERT, E. Fred. **Light-emitting diodes**. 4. ed. [S. l.]: E. Fred Schubert, 2023. E-book. 592 p. ISBN 978-0-9863826-7-3. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=WE2zEAAAQBAJ>. Acesso em: 26 jul. 2026.

TOMAL, Daniel R.; AGAJANIAN, Aram S. **Electronic troubleshooting**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 480 p. ISBN 978-0-07-181990-9.

ULLMAN, Gerald L.; SCHROEDER, Jeremy L.; GOPALAKRISHNA, Deepak. **Use of technology and data for effective work zone management:** work zone ITS implementation guide. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2014. (FHWA-HOP-14-008). Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14008/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

UNITED STATES. Department of Energy. **Lifetime and reliability.** Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2013. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/life-reliability_fact-sheet.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

UNITED STATES. Department of Energy. **Thermal management of white LEDs.** Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2007. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_fe_b07_2.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

UNITED STATES. Department of Transportation. Federal Highway Administration. **Arizona Department of Transportation Dual Use Safety Technology (DUST) Warning System.** Washington, DC: Federal Highway Administration, 2022. (FHWA-HOP-22-071). Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop22071/fhwahop22071.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2026.

ZHELUDEV, Nikolay. The life and times of the LED: a 100-year history. **Nature Photonics**, v. 1, n. 4, p. 189-192, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.34>.

ZHU, Guiqiang; LIU, Yijing; MING, Rui; SHI, Feng; CHENG, Mengjiao. Mass transfer, detection and repair technologies in micro-LED displays. **Science China Materials**, v. 65, n. 8, p. 2128-2153, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40843-022-2110-2>.

Os painéis de LED transformaram a maneira como imagens, informações e experiências visuais ocupam os espaços públicos e privados. Por trás de cada tela existe uma combinação de tecnologia, engenharia, eficiência energética, instalação, manutenção e decisões técnicas que determinam seu desempenho e sua durabilidade.

Nesta obra, Douglas Fernandes Sodré apresenta a trajetória de evolução dos painéis de LED, revelando como avanços em componentes, resolução, consumo energético e sistemas de controle modificaram profundamente o setor.

Mais do que acompanhar a evolução de uma tecnologia, este livro propõe uma compreensão ampla dos desafios e das possibilidades que envolvem os painéis de LED na contemporaneidade.

A partir da experiência prática do autor, a obra aproxima história e conhecimento técnico, abordando aspectos fundamentais para profissionais, técnicos, engenheiros, projetistas, gestores, estudantes e todos aqueles que desejam compreender o que existe por trás das telas que já fazem parte do nosso cotidiano.

Uma leitura que convida o leitor a enxergar cada painel não apenas como uma superfície luminosa, mas como o resultado de décadas de inovação, conhecimento e precisão técnica.

