

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VITÓRIA ROSSI ANTUNES

**PROPOSTA DE MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA PRINCIPAL DE
ILUMINAÇÃO DE CABINE DE PASSAGEIROS EM AERONAVE
COMERCIAL REGIONAL**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025

VITÓRIA ROSSI ANTUNES

**PROPOSTA DE MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA PRINCIPAL DE
ILUMINAÇÃO DE CABINE DE PASSAGEIROS EM AERONAVE
COMERCIAL REGIONAL**

**Proposal for modernizing the main passenger cabin lighting system in a
regional commercial aircraft**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vander Teixeira Prado

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vitoria Rossi Antunes

Proposta de modernização do sistema principal de iluminação de cabine de passageiros em aeronave comercial regional

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 18:00hs do dia 04/12/2025 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Avaliadora composta pelos professores(as) abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Vander Teixeira Prado - Presidente (Orientador(a))

Prof(a). Dr(a). Luiz Francisco Sanches Buzachero - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

Nas últimas décadas, o setor aeronáutico tem buscado soluções tecnológicas que conciliem eficiência energética, sustentabilidade e conforto dos passageiros. Nesse contexto, o sistema de iluminação de cabine desempenha papel fundamental na experiência a bordo e na eficiência operacional das aeronaves. Este trabalho apresenta a proposta de um projeto de modernização do sistema principal de iluminação da cabine de passageiros de uma aeronave comercial regional, substituindo o atual sistema baseado em lâmpadas fluorescentes por uma solução com tecnologia LED. Estima-se, com a adoção da tecnologia LED, redução de 72,12% no consumo elétrico, e de 15,62% da massa total do sistema de iluminação, reduzindo ainda a necessidade de manutenção (custo de ciclo de vida das lâmpadas LED em USD 12.576, enquanto que para as lâmpadas atuais é de USD 26.084 num período de 10 anos), resultando em maior confiabilidade, flexibilidade de design, além da promoção de desenvolvimento sustentável. Este trabalho representa parte de um projeto maior de uma empresa aeronáutica e, portanto, limita-se às etapas iniciais do processo de desenvolvimento de produto, adaptadas às diretrizes da norma aeronáutica ARP4754A, incluindo o diagnóstico do sistema existente, levantamento de requisitos, análise comparativa e planejamento técnico da nova arquitetura de iluminação.

Palavras-chave: aviação; iluminação de cabine; LED; eficiência energética; ARP4754A.

ABSTRACT

In recent decades, the aeronautical sector has sought technological solutions that reconcile energy efficiency, sustainability, and passenger comfort. In this context, the cabin lighting system plays a fundamental role in the onboard experience and operational efficiency of aircraft. This work presents a proposed modernization project for the main passenger cabin lighting system of a regional commercial aircraft, replacing the current fluorescent lamp-based system with an LED technology solution. It is estimated that the adoption of LED technology will reduce electricity consumption by 72.12% and the total mass of the lighting system by 15.62%, further reducing maintenance needs (life cycle cost of LED lamps at USD 12,576, compared to USD 26,084 for current lamps over a 10-year period), resulting in greater reliability, design flexibility, and the promotion of sustainable development. This work represents part of a larger project for an aeronautical company and, therefore, is limited to the initial stages of the product development process, adapted to the guidelines of the aeronautical standard ARP4754A, including the diagnosis of the existing system, requirements gathering, comparative analysis, and technical planning of the new lighting architecture.

Keywords: aviation; cabin lighting; LED; energy efficiency; ARP4754A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema principal de iluminação: 1 – luzes laterais e 2 – luzes de teto. . .	10
Figura 2 – Painel de controle atual.	10
Figura 3 – Disposição das luminárias pela aeronave	11
Figura 4 – Arquitetura em bloco dos circuitos de iluminação do teto da cabine. . .	12
Figura 5 – Arquitetura em bloco dos circuitos de iluminação das laterais da cabine.	12
Figura 6 – Disposição das luminárias pela aeronave	20
Figura 7 – Modelo 3D do suporte (à esquerda) e suporte instalado na lâmpada (à direita)	21
Figura 8 – Novo painel de controle.	22
Figura 9 – Comparação de consumo, em Watts, do sistema atual e do novo sistema.	23
Figura 10 – Comparação de peso, em quilograma, do sistema atual e do novo sistema.	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	SISTEMA ATUAL DE ILUMINAÇÃO	9
2.1	Aeronave em modificação	9
2.2	Descrição geral do sistema	9
2.3	Distribuição e especificação dos componentes do sistema	10
2.4	Arquitetura elétrica e funcionamento	11
2.5	Consumo de potência e peso total	13
3	ETAPAS PARA A MODIFICAÇÃO	13
4	LEVANTAMENTO DETALHADO DE REQUISITOS E NORMAS APLICÁVEIS	15
5	DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO NOVO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	15
5.1	Requisitos funcionais	16
5.2	Requisitos de desempenho fotométrico	17
5.3	Requisitos de modos e estados de operação	18
5.4	Requisitos elétricos e de integração	18
5.5	Requisitos de aeronavegabilidade e segurança	18
6	SELEÇÃO E ANÁLISE DOS COMPONENTES	18
6.1	Visão geral dos componentes considerados	19
6.2	Lâmpadas LED	19
6.3	Suportes	20
6.4	<i>Driver</i> Eletrônico	20
6.5	Painel de Controle	21
6.6	Considerações finais desta etapa	22
7	COMPARAÇÃO TÉCNICA ENTRE OS SISTEMAS ATUAL E PRO- POSTO	22
8	CRONOGRAMA	24
9	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	24
	REFERÊNCIAS	26

Proposta de modernização do sistema principal de iluminação de cabine de passageiros em aeronave comercial regional

Vitória Rossi Antunes *

Vander Teixeira Prado *

Resumo – Nas últimas décadas, o setor aeronáutico tem buscado soluções tecnológicas que conciliem eficiência energética, sustentabilidade e conforto dos passageiros. Nesse contexto, o sistema de iluminação de cabine desempenha papel fundamental na experiência a bordo e na eficiência operacional das aeronaves. Este trabalho apresenta a proposta de um projeto de modernização do sistema principal de iluminação da cabine de passageiros de uma aeronave comercial regional, substituindo o atual sistema baseado em lâmpadas fluorescentes por uma solução com tecnologia LED. Estima-se, com a adoção da tecnologia LED, redução de 72,12% no consumo elétrico, e de 15,62% da massa total do sistema de iluminação, reduzindo ainda a necessidade de manutenção (custo de ciclo de vida das lâmpadas LED em USD 12.576, enquanto que para as lâmpadas atuais é de USD 26.084 num período de 10 anos), resultando em maior confiabilidade, flexibilidade de design, além da promoção de desenvolvimento sustentável. Este trabalho representa parte de um projeto maior de uma empresa aeronáutica e, portanto, limita-se às etapas iniciais do processo de desenvolvimento de produto, adaptadas às diretrizes da norma aeronáutica ARP4754A, incluindo o diagnóstico do sistema existente, levantamento de requisitos, análise comparativa e planejamento técnico da nova arquitetura de iluminação.

Palavras-chave: aviação; iluminação de cabine; LED; eficiência energética; desenvolvimento de produto; ARP4754A.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a aviação moderna evoluiu de modo expressivo em função dos avanços tecnológicos integrados a uma crescente preocupação com desempenho, sustentabilidade e requisitos regulatórios. Novos materiais compósitos, sistemas de propulsão mais eficientes e concepções aerodinâmicas otimizadas permitiram reduzir o consumo de combustível por tonelada-quilômetro em cerca de 41% entre 1970 e 2019, segundo análise da Comissão Internacional de Transporte Limpo – ICCT (ZHENG; RUTHERFORD, 2020).

Este impulso por eficiência também é impelido por pressões regulatórias e ambientais. A aviação responde por cerca de 2,5% das emissões globais de CO₂ (RITCHIE, 2024), e organismos internacionais têm estabelecido metas de crescimento neutro em carbono, taxas mínimas de eficiência e regimes como o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) para limitar os impactos climáticos da indústria.

A evolução constante do setor aeronáutico exige inovações não apenas em desempenho e segurança, mas também em conforto e usabilidade

*Vitória Rossi Antunes é discente do curso de Engenharia Elétrica e Vander Teixeira Prado é docente do Departamento Acadêmico da Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procopio. Contato: vitoriarossi@alunos.utfpr.edu.br

interna das aeronaves. Um dos elementos fundamentais para garantir a experiência do passageiro é o sistema de iluminação de interiores, especialmente o sistema principal de iluminação da cabine. Esse sistema é responsável por proporcionar visibilidade adequada, conforto visual e eficiência energética, além de influenciar diretamente o bem-estar dos ocupantes (VERTAMATTI, 2014).

Durante as diferentes fases do voo (embarque, cruzeiro, refeições, repouso e desembarque) a iluminação da cabine é ajustada para atender às necessidades específicas dos passageiros e da tripulação. A luz ambiente contribui para a percepção de espaço, reduz o cansaço visual e pode até auxiliar na regulação do ritmo circadiano, que regula mudanças físicas e mentais no corpo, como os padrões de sono, liberação hormonal, temperatura corporal e digestão, impactando o conforto fisiológico e psicológico (TAHKAMO; PARTONEN; PESONEN, 2019). Segundo Gou *et al.* (2023), a luz afeta não apenas as habilidades visuais, mas também a saúde e o desempenho cognitivo dos indivíduos.

Historicamente, sistemas de iluminação baseados em lâmpadas fluorescentes foram amplamente utilizados na aviação comercial. No entanto, essas lâmpadas contêm mercúrio, um elemento tóxico, e apresentam limitações em termos de durabilidade, controle de intensidade e eficiência energética. Diante disso, há um movimento crescente na indústria para substituí-las por sistemas baseados em tecnologia LED, que apresentam as seguintes vantagens (MILBURN *et al.*, 2013; GUIMARÃES; MORAES; BARBOSA, 2021):

- **Manutenção:** as lâmpadas LED têm ciclos de vida maiores em comparação com lâmpadas fluorescentes e são mais confiáveis, exigindo menos manutenção;
- **Peso:** os LEDs são muito pequenos, o que resulta em baixo peso. As lâmpadas LED podem pesar apenas 1/3 do peso dos sistemas existentes, ajudando a reduzir o consumo de combustível;
- **Meio ambiente:** os sistemas LED não contêm substâncias tóxicas e são seguros para descarte, ao contrário das lâmpadas fluorescentes, que contêm mercúrio e devem ser recicladas adequadamente;
- **Robustez:** o material dos LEDs é resistente a choques e vibrações, eventos que ocorrem frequentemente no ambiente de uma aeronave;
- **Facilidade de dimerização:** a luz LED é facilmente dimerizável, permitindo ajustar o brilho das luzes em voos longos para que o passageiro possa dormir;
- **Eficiência energética:** os LEDs podem economizar até 50% de energia em comparação com lâmpadas fluorescentes;
- **Flexibilidade de design:** as lâmpadas LEDs podem ser produzidas em qualquer forma ou tamanho, podem ser dimerizáveis e sua cor pode ser ajustada ou alterada, criando diferentes ambientes e aprimorando a experiência do passageiro;

- Geração reduzida de calor: em comparação com outras tecnologias de iluminação, os LEDs dissipam pouco calor, o que é benéfico para o conforto dos passageiros e para o ambiente da aeronave.

Nesse contexto, o presente trabalho faz parte de um projeto de desenvolvimento em andamento em uma empresa do setor aeronáutico, cujo objetivo é modernizar o sistema principal de iluminação da cabine de passageiros de uma aeronave comercial de corredor único.

Considerando que o projeto principal possui duração total de 24 meses, este trabalho apresenta a proposta de desenvolvimento do projeto de um novo sistema de iluminação, a qual aborda as etapas iniciais do desenvolvimento, incluindo o diagnóstico do sistema atual, a definição dos requisitos, a proposta de arquitetura do novo sistema e comparação dos sistemas atual e proposto, com relação a consumo de energia, peso e custo de manutenção. O sistema final poderá sofrer alterações ao longo do processo de validação e integração.

2 SISTEMA ATUAL DE ILUMINAÇÃO

2.1 Aeronave em modificação

A aeronave em modificação é um jato regional de primeira geração, típico do início dos anos 2000, com capacidade para aproximadamente 66 a 124 passageiros. A entrada operacional desse tipo de aeronave ocorreu com sistemas elétricos e interiores com tecnologia disponível na época, incluindo iluminação de cabine composta por lâmpadas fluorescentes com controles de luz básicos.

Por utilizar tubos que dependem de reatores eletrônicos, há um consumo de energia relativamente elevado e perdas associadas ao processo de conversão elétrica. Além disso, as lâmpadas fluorescentes possuem vida útil limitada e sofrem degradação do fluxo luminoso ao longo do tempo, o que demanda substituições e manutenções frequentes, especialmente em um ambiente sujeito a vibrações e ciclos de acionamento constantes, como no caso do interior de aeronaves.

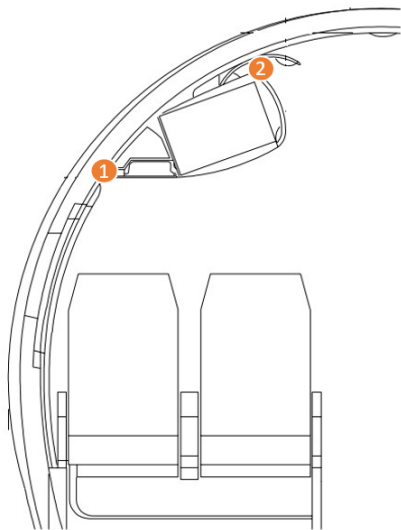
Outro ponto crítico é o controle restrito de iluminação, geralmente limitado a modos básicos de operação (como luz alta e baixa), sem possibilidade de personalização cromática. Por fim, a presença de múltiplos componentes físicos, como reatores e suportes, contribui para o aumento de peso e complexidade estrutural do sistema, ocupando espaço nos painéis superiores.

2.2 Descrição geral do sistema

O sistema de iluminação da cabine tem como função principal proporcionar conforto visual, segurança operacional e ambientação adequada para passageiros e tripulação, tanto durante o embarque e desembarque quanto em voo. Além disso, o sistema deve atender aos requisitos de certificação aeronáutica, garantindo níveis adequados de iluminância, uniformidade e confiabilidade, de acordo com as agências regulamentadoras, tais como ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), FAA (*Federal Aviation Administration*), para os Estados Unidos e EASA (*European Union Aviation Safety Agency*), para a união europeia.

O sistema principal de iluminação da cabine de passageiros é composto por luminárias fluorescentes localizadas nas regiões do teto e das laterais, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema principal de iluminação: 1 – luzes laterais e 2 – luzes de teto.



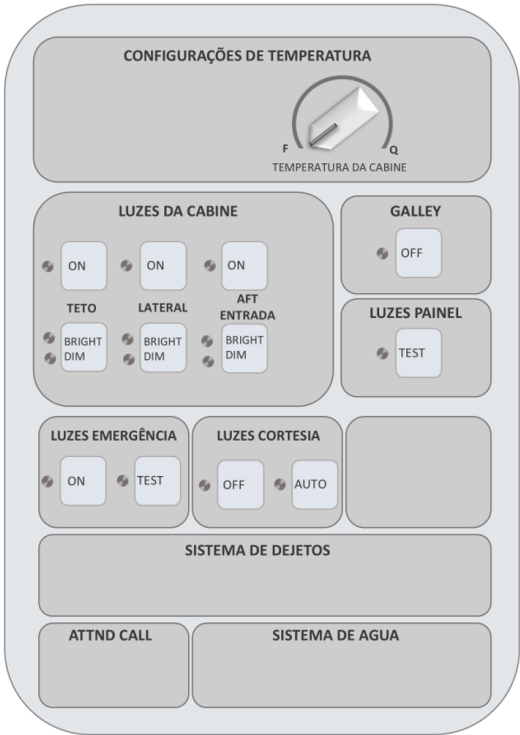
Fonte: Adaptado de Embraer (2025).

Essas luminárias são alimentadas por fontes de corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), garantindo uma iluminação ambiente uniforme e adequada para o conforto dos passageiros e a operação da tripulação.

O controle do sistema é realizado por meio de dois pares de botões de membrana instalados nos painéis de controle dianteiro e traseiro, localizados nas seções dianteira (FWD) e traseira (AFT) da aeronave. A Figura 2 mostra uma representação do painel de controle atual.

Cada par de botões é responsável por uma região da cabine (teto ou laterais) e permite o controle das funções de ligar/desligar (ON/OFF) e ajuste de intensidade luminosa (BRT/DIM). O sistema opera em três estados distintos, que podem ser vistos na Tabela 1.

Figura 2 – Painel de controle atual.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 – Estados de iluminação das luzes principais

Estado	Descrição
OFF	Todas as luzes desligadas.
ON/DIM	Iluminação reduzida (25%)
ON/BRT	Iluminação máxima (100%)

Fonte: Autoria própria.

2.3 Distribuição e especificação dos componentes do sistema

O sistema de iluminação atual da aeronave é composto por luminárias fluorescentes, reatores e suportes, distribuídos uniformemente ao longo da cabine de passageiros. A Figura 3 apresenta a disposição das luminárias segundo o arranjo interno da aeronave.

O sistema de iluminação é formado por 46 luminárias fluorescentes, 44 reatores e 22 supor-

Figura 3 – Disposição das luminárias pela aeronave



Fonte: Adaptado de Embraer (2025).

Tabela 2 – Especificações das luminárias fluorescentes

Luminária	Eficiência Luminosa (lm/W)	Potência (W)	CCT (K)	CRI	Vida Útil (h)	Peso (kg)	Qtd
F040/841/XP/ECO3	93,75	40	4000	85	36000	0,09	30
F032/841/XP/ECO3	96,88	32	4100	85	35000	0,20	5
F025/841/XP/ECO3	90,00	25	4100	85	24000	0,31	7
F017/841/XP/ECO3	79,41	17	4100	82	30000	0,21	2
F15T8-CW	62,67	15	4100	82	12000	0,10	2

Fonte: Adaptado de documentos internos cedidos pela fabricante, os quais não podem ser citados.

tes. As especificações das luminárias estão apresentadas na Tabela 2. Para cada lâmpada é utilizado um reator, exceto nas zonas de transição, onde um único reator alimenta duas lâmpadas. As especificações dos reatores estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações dos reatores.

Reator	Peso (kg)	Potência (W)	Qtd.
115V (CA)	0,324	50,60	40
28V (CC)	0,334	47,60	4

Fonte: Adaptado de documentos internos cedidos pela fabricante, os quais não podem ser citados.

As lâmpadas são fixadas nos suportes correspondentes, conforme apresentado na Tabela 4.

2.4 Arquitetura elétrica e funcionamento

As Figuras 4 e 5 mostram as arquiteturas

Tabela 4 – Especificações dos suportes.

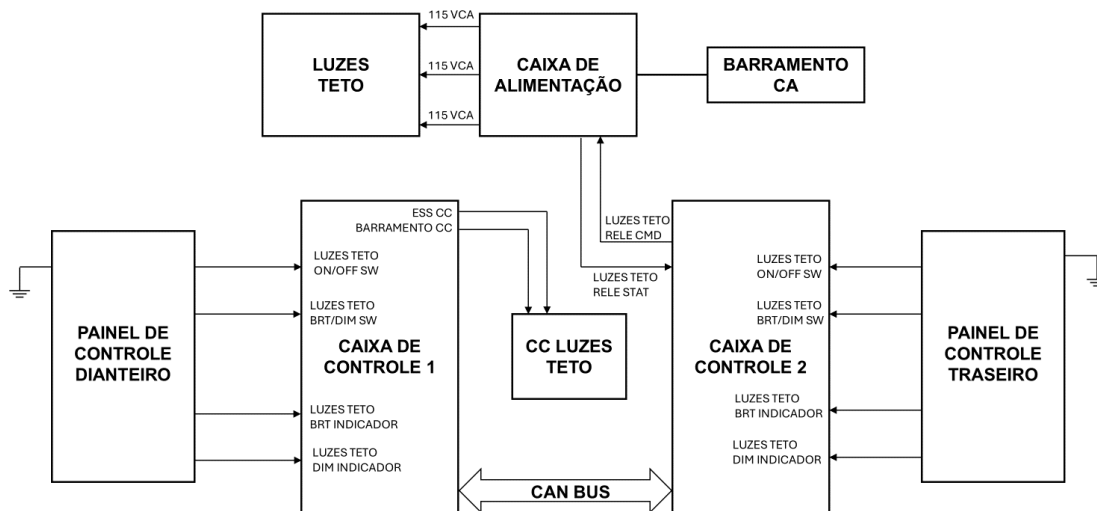
Suportes	Peso (kg)	Qtd
Suporte Lâmpada T8/60 POL	0,23	16
Suporte Lâmpada T8/24 POL	0,10	1
Suporte Lâmpada T8/36 POL	0,25	5

Fonte: Adaptado de documentos internos cedidos pela fabricante, os quais não podem ser citados.

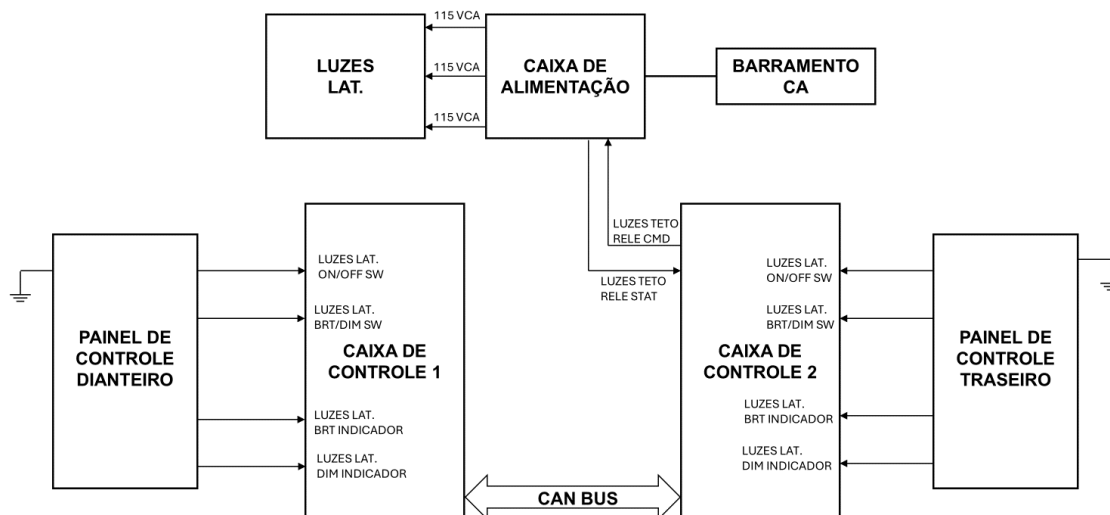
em bloco dos circuitos de iluminação do teto e das laterais da cabine, respectivamente.

O sistema de iluminação da cabine recebe energia do barramento CA localizado na caixa de alimentação. Os sinais lógicos discretos provenientes do painel de controle dianteiro são enviados para a caixa de controle 1, enquanto os sinais do painel de controle traseiro são enviados para a caixa de controle 2.

As caixas de controle se comunicam por meio de um barramento de dados digital, o que per-

Figura 4 – Arquitetura em bloco dos circuitos de iluminação do teto da cabine.

Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Arquitetura em bloco dos circuitos de iluminação das laterais da cabine.

Fonte: Autoria própria.

mite o controle completo do sistema de iluminação da cabine a partir de qualquer um dos painéis de controle.

Os reatores CA são alimentados por uma tensão monofásica de 115V/400Hz, proveniente do barramento CA da caixa de alimentação. Já os reatores CC recebem uma tensão de 28V fornecida pela caixa de controle 1 através dos barramentos essencial e CC.

O estado inicial da cabine é o modo OFF, correspondente ao momento em que a caixa de controle é ligada. Quando o botão ON é pressionado, as luzes da cabine (teto e laterais) são acionadas automaticamente no modo BRT (brilho máximo).

Com as luzes ligadas, os modos BRT e DIM podem ser selecionados por meio dos botões correspondentes. Esses comandos são mutuamente exclusivos, de modo que nenhuma ação é executada caso ambos sejam pressionados simultaneamente.

2.5 Consumo de potência e peso total

Com base nas Tabelas 2, 3 e 4, foi possível estimar o consumo total de potência e o peso do sistema de iluminação atual (Tabela 5).

Tabela 5 – Estimativa do consumo e peso

Item	Peso (kg)	Potência (W)
Luminárias	6,51	1599
Reatores	14,30	2191,52
Suportes	5,03	N/A
Total	25,84	3790,52

Fonte: Autoria própria.

Portanto, o sistema atual de iluminação apresenta um consumo de potência total de 3790,52W e peso estimado de 25,84kg. Considerando que o sistema opera durante grande parte do voo (aproximadamente 12h por dia), esse consumo energético impacta diretamente na eficiência global da aeronave. Além disso, o peso total dos componentes contribui para o aumento do consumo de combustível e para maiores custos de manutenção.

3 ETAPAS PARA A MODIFICAÇÃO

O presente trabalho segue a metodologia de Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP), proposta por Rozenfeld *et al.* (2006) e adaptada às diretrizes aeronáuticas estabelecidas pela FAA, especialmente o documento ARP4754A – *Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems* (SAE, 2010). Essa metodologia foi escolhida por permitir a estruturação sistemática do processo de desenvolvimento, desde o levantamento de requisitos até a avaliação técnica da solução pro-

posta. A partir dos documentos citados, a Tabela 6 apresenta uma adaptação da metodologia PDP ao documento ARP4754A.

A partir da adaptação (Tabela 6), propuseram-se as seguintes etapas para o projeto:

- 1. Levantamento detalhado de requisitos e normas aplicáveis:** nesta fase foi realizado o refinamento completo dos requisitos aplicáveis, abrangendo os requisitos regulatórios, funcionais, operacionais, de confiabilidade e integração com a arquitetura atual.
- 2. Definição das características do novo sistema de iluminação:** com os requisitos estabelecidos, foram definidas as especificações-alvo do novo sistema, incluindo: temperatura de cor, nível mínimo de iluminância e CRI (Índice de Reprodução de Cores), modos e estados de operação e compatibilidade com cabeamento existente.
- 3. Seleção e análise dos componentes:** com base nas características definidas, foram avaliados e selecionados os componentes que comporão o novo sistema: lâmpadas LEDs compatíveis com aplicações aeronáuticas e com os requisitos definidos na etapa anterior, suportes e interfaces mecânicas para instalação na cabine.
- 4. Comparação técnica entre os sistemas atual e proposto:** foram realizados estudos comparativos considerando: redução

Tabela 6 – Adaptação da metodologia PDP ao documento ARP4754A

PDP	ARP4754A	Adaptação
Planejamento estratégico de produtos	<i>Planning Process</i>	Definição do escopo do sistema, interfaces e requisitos de certificação (ANAC/FAA/EASA).
Projeto informacional	<i>Requirements Capture and Validation</i>	Ênfase em requisitos de segurança, desempenho e conformidade regulatória.
Projeto conceitual	<i>Functional Architecture Development</i>	Modelagem de funções e interfaces do sistema da aeronave.
Projeto detalhado	<i>System Design and Implementation</i>	Desenvolvimento detalhado com rastreabilidade.
Preparação da produção	<i>Integration, Verification and Validation</i>	Ensaio, integração de sistemas e verificação de conformidade.
Pós-desenvolvimento	<i>Certification and Continued Airworthiness</i>	Apoio ao processo de certificação e manutenção da aeronavegabilidade.

Fonte: Autoria própria.

de peso, de consumo de potência, custo inicial e custo ao longo da vida útil (LCC) das lâmpadas.

5. Desenvolvimento do projeto elétrico

detalhado: a partir dos componentes selecionados, será desenvolvido o projeto elétrico do sistema: diagramas unifilar, multifilar e blocos funcionais, dimensionamento de cablagem, proteções e fusíveis, método de dimerização (PWM, corrente, interface digital), integração com caixas de controle 1 e 2 e definição da lógica de controle a ser implementada no painel de controle.

6. Simulação luminotécnica:

será realizada a simulação computacional do de-

sempenho luminotécnico da cabine com a nova solução LED, incluindo: modelagem tridimensional da cabine, análise da distribuição de luz em diferentes cenários, validação dos níveis de iluminação e uniformidade e ajustes na posição e quantidade de luminárias.

7. Construção do protótipo e testes de

bancada: será desenvolvido um protótipo funcional do sistema: montagem dos módulos LED + *driver* + suporte, medições elétricas, ensaios térmicos e verificação da estabilidade durante operação contínua, testes de dimerização e resposta dinâmica e avaliação da robustez e comportamento do sistema.

8. **Integração e testes na aeronave:** após validação em bancada, será realizada a integração em aeronave ou mock-up, com: testes funcionais do sistema completo, verificação de comunicação com caixa de controle 1/caixa de controle 2, avaliação do comportamento sob diferentes modos de operação e identificação de ajustes necessários para correta integração.

9. **Avaliação de conformidade e certificação preliminar:** como etapa final, será realizada a análise preliminar de certificação: mapeamento dos requisitos regulatórios aplicáveis, avaliação da conformidade do sistema com FAR/CS 25, identificação de pendências para certificação completa e elaboração de documentação técnica exigida pelas agências reguladoras.

4 LEVANTAMENTO DETALHADO DE REQUISITOS E NORMAS APLICÁVEIS

Esta seção consolida as normas, regulamentos e requisitos técnicos aplicáveis ao projeto do sistema de iluminação interna da cabine. O objetivo é estabelecer parâmetros regulatórios, funcionais, fotométricos, ambientais e de segurança que orientarão o desenvolvimento, seleção de materiais, integração elétrica e validação do sistema. Os documentos mandatórios e aplicáveis ao escopo do projeto são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Todas as referências foram analisadas com base em requisitos de certificação para aeronaves de transporte (RBAC 25 / FAR/CS-25) e normas técnicas amplamente adotadas na indústria aeronáutica, os quais asseguram que o equipamento seja instalado de forma segura, não interfira nos outros sistemas da aeronave, não introduza riscos ao voo e atenda às exigências de integridade estrutural e elétricas previstas para equipamentos de uso em cabine.

5 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO NOVO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Esta seção descreve as características funcionais, operacionais, elétricas e fotométricas planejadas para o novo sistema de iluminação principal da cabine. O objetivo é estabelecer, em nível conceitual, o comportamento esperado do sistema e os requisitos mínimos que orientarão o projeto e a integração com os demais subsistemas da aeronave.

Nesta fase do projeto, o sistema de iluminação ainda se encontra em etapa de definição preliminar. Os requisitos de desempenho, cromaticidade, eficiência e vida útil já estão formalmente estabelecidos pela equipe de engenharia, porém a seleção final das lâmpadas e *drivers* associados ainda não foi concluída.

Dessa forma, as características apresentadas nesta seção apenas representam os parâmetros de projeto e exigências a serem atendidas.

Tabela 7 – Requisitos de certificação para aeronaves de transporte: 14 CFR Part 25 / RBAC 25.

Regulamento	Escopo	Aplicabilidade
25.1301 – <i>Function and Installation</i>	Adequação funcional e instalação correta.	As luminárias devem ser apropriadas ao uso integradas à aeronave de forma segura.
25.1309 – <i>Equipment, Systems, and Installations</i>	Segurança e análise de falhas.	A iluminação não pode introduzir riscos ou interferências com outros sistemas.
25.869 – <i>Fire Protection (Electrical)</i>	Riscos de ignição associados à eletricidade.	Os circuitos devem ser protegidos contra sobreaquecimento.
25.899 – <i>Electrical Bonding and Protection</i>	Continuidade elétrica e prevenção de arcos.	As luminárias devem ter reatores adequados e evitar a formação de arcos elétricos.
25.1353 – <i>Electrical Equipment and Installations</i>	Segurança da instalação elétrica.	Controle de sobrecorrente, isolamento e integridade dos circuitos.
25.1357 – <i>Circuit Protective Devices</i>	OCPDs (fusíveis/disjuntores).	O circuito da iluminação deve possuir proteção adequada à carga.

Fonte: Adaptado de Code of Federal Regulations (CFR) (2025).

Tabela 8 – RTCA: Ensaios ambientais e critérios de instalação.

Documento	Escopo	Aplicabilidade
RTCA DO-160G	Ensaios ambientais e EMC para equipamentos embarcados.	Testa robustez térmica, vibração, EMI/ESD e comportamento elétrico dos módulos LED e drivers.
RTCA DO-313	Instalação de sistemas não essenciais da cabine.	A iluminação de cabine é classificada como Non-Essential, Non-Required Equipment; este documento orienta sua instalação e demonstração de segurança.

Fonte: Adaptado de Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) (2025).

5.1 Requisitos funcionais

O sistema de iluminação deverá prover diferentes composições de cor e intensidade luminosa, organizadas em cenários predefinidos (*moo-*

dlights), capazes de atender às necessidades operacionais de cabine. Para isso, o sistema deverá aceitar comandos provenientes de duas interfaces de controle independentes, correspondentes ao painel de controle dianteiro e ao painel de controle tra-

Tabela 9 – Inflamabilidade de materiais.

Documento	Escopo	Aplicabilidade
14 CFR Part 25, <i>Appendix F</i>	Ensaaios de inflamabilidade para interiores de cabine.	Difusores, lentes e carcaças devem atender aos requisitos de flamabilidade.
FAA <i>Fire Test Handbook</i>	Procedimentos para execução dos ensaios.	Suporte técnico para interpretação e implementação dos testes de <i>Appendix F</i> .

Fonte: Adaptado de *Code of Federal Regulations (CFR) (2025)* e *Federal Aviation Administration (2014)*.

seiro, sendo o painel dianteiro considerado a interface primária de comando. Ambos deverão permitir a seleção dos cenários de iluminação e refletir o estado atualmente ativo na cabine.

A lógica existente no painel de controle atual deverá ser preservada, incluindo seus mecanismos de comunicação e integração com as caixas de controle. O painel deverá, ainda, disponibilizar ao comissário tanto os meios para seleção dos cenários quanto a indicação do cenário atualmente ativo na cabine.

Além disso, o sistema deverá permitir o controle independente das regiões de iluminação lateral e teto, incluindo a possibilidade de acionamento e desligamento individualizado.

5.2 Requisitos de desempenho fotométrico

O sistema deverá disponibilizar um conjunto mínimo de sete cenários configuráveis de iluminação, cada um com parâmetros próprios de cor e intensidade. Deve existir um cenário padrão, não customizável, composto por luz branca em bri-

lho máximo, o qual será automaticamente aplicado após a energização da aeronave.

A definição das cores e dos níveis de brilho deverá ser realizada utilizando coordenadas UV (sistema de mapeamento 2D usado na modelagem 3D para aplicar texturas em superfícies tridimensionais), de forma a garantir precisão e repetibilidade na composição cromática. As transições entre cenários deverão ocorrer de maneira contínua, sem degraus perceptíveis ou variações abruptas de cor.

O desempenho fotométrico mínimo previsto inclui:

- emissão de luz branca com temperatura de cor correlata de 4500 K ± 100 K;
- índice de reprodução de cores (CRI) igual ou superior a 80 em condições normais de operação;
- uniformidade cromática equivalente a um máximo de 3 SDCM (*Standard Deviation of Color Matching*);
- eficácia luminosa mínima de 120 lm/W no cenário de branco máximo;

- manutenção de ao menos 50% do fluxo luminoso inicial ao longo da vida útil especificada (critério L50 ou superior).

O sistema deve ainda suportar a instalação de segmentos de diferentes comprimentos, de forma a permitir adequação às diversas configurações de cabine.

5.3 Requisitos de modos e estados de operação

O sistema deverá permanecer continuamente disponível durante a operação da aeronave, sem desligamentos automáticos temporizados. Após a energização, deverá garantir iluminação uniforme e estável.

Em caso de interrupção momentânea de energia ou comunicação, as luminárias deverão manter o cenário selecionado por, no mínimo, 90 segundos, utilizando memória interna para preservação do estado. Interrupções superiores a esse período deverão resultar na restauração automática do cenário padrão.

5.4 Requisitos elétricos e de integração

O sistema deverá aceitar alimentação tanto em 115V/400Hz, quanto em 28V CC, de acordo com as disponibilidades típicas da cabine. O fator de potência deverá ser igual ou superior a 0,85, e o consumo dos módulos dedicados ao controle deverá permanecer dentro dos limites estabelecidos para operação normal.

A integração elétrica deverá atender aos requisitos regulatórios apresentados na seção anterior

(seção 4), garantindo compatibilidade com o barramento da aeronave, proteção contra sobrecorrente, isolamento adequado e ausência de interferência com outros sistemas embarcados.

5.5 Requisitos de aeronavegabilidade e segurança

O sistema deverá cumprir integralmente os requisitos regulatórios definidos na seção 4, incluindo os critérios de instalação, segurança e compatibilidade ambiental previstos na 14 CFR Part 25, na RTCA DO-160G, na RTCA DO-313 e nos ensaios de inflamabilidade estabelecidos no *Appendix F*.

6 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS COMPONENTES

Nesta etapa é apresentada a análise preliminar dos principais componentes que irão compor o novo sistema de iluminação interna da cabine. Diferentemente da fase anterior, dedicada à definição das características funcionais e de desempenho, esta seção trata dos elementos físicos do sistema, descrevendo o que já está definido, o que permanece pendente e os critérios que orientarão as próximas decisões de engenharia.

Como o projeto ainda se encontra em fase inicial, a seleção final das luminárias LED e dos *drivers* eletrônicos não foi concluída pelo fornecedor. Por essa razão, os valores apresentados nesta seção representam parâmetros de projeto derivados dos requisitos estabelecidos e das informações preliminares fornecidas pela equipe de engenharia. Es-

ses parâmetros serão refinados nas etapas posteriores, especialmente após a simulação luminotécnica e os testes de bancada.

6.1 Visão geral dos componentes considerados

Até o momento, o sistema é composto pelos seguintes elementos principais:

- Cinco tipos preliminares de luminárias LED, diferenciadas por comprimento, potência e massa.
- Dois modelos de suportes mecânicos, destinados à fixação das luminárias nas regiões de teto e laterais da cabine.
- Tensão de alimentação de 115V/400Hz, garantindo compatibilidade com a arquitetura elétrica existente da aeronave.
- Comunicação digital baseada em protocolo RS-485, reutilizando a fiação instalada, originalmente projetada para sinais discretos.
- Fluxo luminoso estimado a partir de uma eficiência mínima de 120 lm/W e CCT de 4500 K, conforme requisitos do projeto.
- Capacidade de dimerização, essencial para a execução dos cenários de iluminação definidos na fase anterior.

Esses elementos formam a base preliminar do novo sistema, permitindo a continuidade da análise mesmo antes da seleção definitiva dos fabricantes.

6.2 Lâmpadas LED

As cinco luminárias previstas para o projeto serão fabricadas especificamente para este *re-trofit*. Seus comprimentos e potências já foram definidos, mas atributos como eficiência luminosa, vida útil e CRI ainda dependem da escolha final do modelo LED e do *driver* associado. Assim, para fins de análise preliminar, adotam-se valores coerentes com os requisitos mínimos estabelecidos e com produtos LED comercialmente disponíveis.

A Tabela 10 apresenta as especificações preliminares das luminárias consideradas nesta fase. Esses valores servirão como referência inicial e poderão ser ajustados posteriormente, quando o fornecedor concluir a definição das luminárias e os testes laboratoriais forem realizados nas etapas 6 (simulação luminotécnica) e 7 (construção do protótipo e testes de bancada).

A Figura 6 apresenta a distribuição planejada das luminárias ao longo da cabine. Um destaque importante com relação à Figura 3 é a inclusão de duas novas luminárias posicionadas à frente dos primeiros assentos, região que anteriormente apresentava níveis de iluminância insuficientes devido à ausência de pontos de luz dedicados. Essa inserção corrige uma limitação do sistema atual, garantindo maior uniformidade luminosa e eliminando áreas escuras na entrada da cabine.

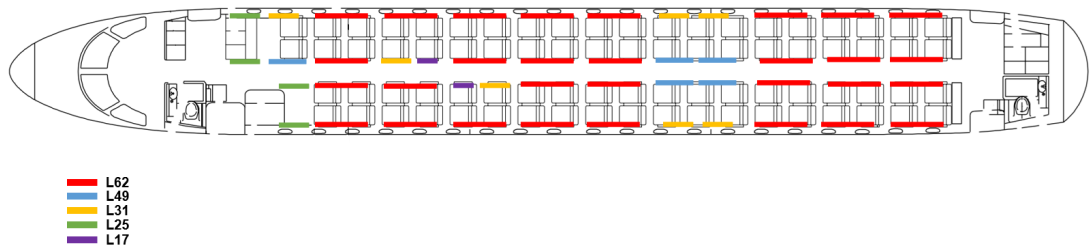
A disposição revisada também facilita a implementação dos novos cenários de iluminação, uma vez que melhora a continuidade visual entre as regiões das paredes laterais e o teto.

Tabela 10 – Especificações das luminárias do novo sistema

Luminária	Eficiência Luminosa (lm/W)	Potência (W)	CCT (K)	CRI	Vida Útil (h)	Peso (kg)	Qtd
L17	120,00	7,48	4500	80	50000	0,22	2
L25	120,00	10,71	4500	80	50000	0,24	4
L31	120,00	13,69	4500	80	50000	0,28	7
L49	120,00	21,00	4500	80	50000	0,40	5
L62	120,00	26,61	4500	80	50000	0,50	30

Fonte: Adaptado de documentos internos cedidos pela fabricante, os quais não podem ser citados.

Figura 6 – Disposição das luminárias pela aeronave



Fonte: Adaptado de Embraer (2025).

6.3 Suportes

As especificações preliminares dos suportes mecânicos utilizados para a fixação das luminárias são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações dos suportes

Suportes	Peso (kg)	Qtd
Suporte 1	0,015	50
Suporte 2	0,015	46

Fonte: Adaptado de documentos internos cedidos pela fabricante, os quais não podem ser citados.

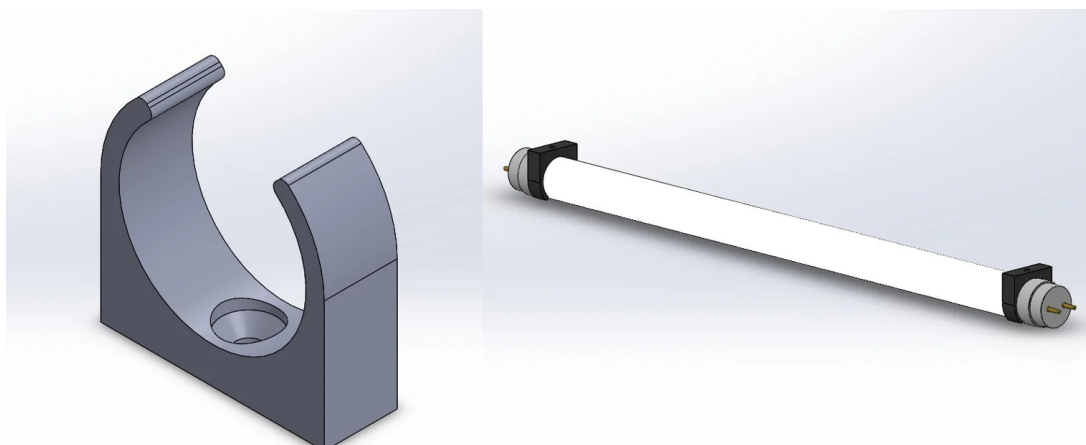
O Suporte 1 é destinado às luminárias de teto e o Suporte 2 às luminárias laterais. Ambos possuem geometria otimizada para acoplamento rápido, resistência às vibrações e compatibilidade com a estrutura interna da aeronave. A Figura 7 ilustra um modelo de suporte semelhante ao utilizado no projeto.

6.4 Driver Eletrônico

O novo sistema de iluminação utilizará *drivers* eletrônicos integrados às próprias luminárias LED. Esses *drivers* serão desenvolvidos pelo fabricante responsável pelo *retrofit* e têm como função realizar a conversão de energia e o controle dos LEDs em conformidade com os requisitos de operação da aeronave.

O *driver* deve operar a partir da alimentação de 115V/400 Hz, realizando a conversão CA/CC necessária para o acionamento dos LEDs. Para isso, será empregada uma topologia CA-CC que utiliza isolamento galvânico entre a entrada e a saída, garantindo maior segurança elétrica, proteção contra surtos e compatibilidade eletromagnética, características essenciais para o ambiente aeronáutico.

Figura 7 – Modelo 3D do suporte (à esquerda) e suporte instalado na lâmpada (à direita)



Fonte: Adaptado de Lima (2021).

Além da retificação da alimentação, o *driver* incorpora a lógica de controle da luminária. A comunicação será realizada via protocolo RS-485, reutilizando a cablagem existente do sistema anterior. Através deste barramento, o *driver* receberá comandos de intensidade luminosa, seleção de cenários e parâmetros de dimerização, de acordo com a lógica já definida pelos painéis de controle da aeronave.

A potência elétrica e a massa do *driver* já estão considerados junto às informações das luminárias na Tabela 10. Além disso, por estar integrado fisicamente à luminária, não exige instalação separada, reduzindo o tempo de manutenção e simplificando o conjunto mecânico. A escolha final da topologia, componentes e fabricante será definida nas etapas subsequentes do desenvolvimento, mas as características descritas nesta seção representam os requisitos mínimos para que o *driver* atenda ao desempenho e às interfaces especificadas.

6.5 Painel de Controle

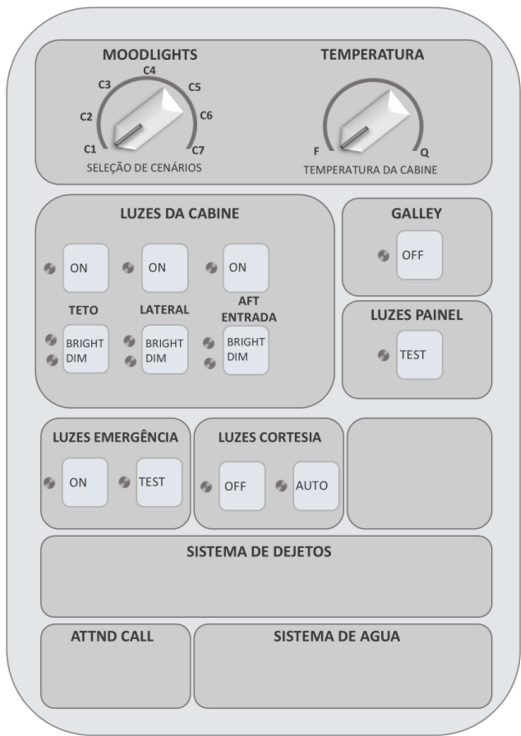
O novo painel de controle mantém as mesmas dimensões externas, pontos de fixação e interface mecânica do painel atualmente instalado na aeronave. Essa decisão de projeto assegura compatibilidade física, reduz impacto no *retrofit* e evita a necessidade de modificações estruturais adicionais.

A principal diferença em relação ao painel anterior é a inclusão de um seletor rotativo dedicado à escolha dos *moodlights*. Esse seletor permite que a tripulação escolha entre até sete cenários pré-configurados, definidos conforme as preferências operacionais da companhia aérea durante o processo de instalação ou retrofit.

A nova interface mantém o controle independente de brilho e intensidade da iluminação de teto e lateral. Para a seleção do cenário desejado, o usuário deve apenas girar o seletor até a posição correspondente. O sistema processa o comando e a cabine passa a apresentar os níveis de cor e intensidade definidos para aquele cenário específico.

A Figura 8 apresenta uma representação do novo painel de controle.

Figura 8 – Novo painel de controle.



Fonte: Autoria própria.

6.6 Considerações finais desta etapa

A análise realizada nesta etapa estabelece a base física do sistema, ainda que alguns elementos permaneçam em definição pelo fabricante. As informações preliminares já permitem projetar o comportamento esperado, estimar massa e potência total, e preparar o ambiente necessário para as próximas etapas do desenvolvimento.

7 COMPARAÇÃO TÉCNICA ENTRE OS SISTEMAS ATUAL E PROPOSTO

Nesta seção é realizada a comparação técnica entre o sistema de iluminação atualmente instalado na aeronave e o sistema proposto neste trabalho. O objetivo desta análise é quantificar os ganhos decorrentes da substituição, considerando princi-

palmente massa total instalada e potência elétrica demandada.

A Tabela 12 apresenta a estimativa consolidada de peso e potência do novo sistema, obtida com base nas quantidades e parâmetros previstos para as luminárias e suportes (Tabelas 10 e 11).

Tabela 12 – Estimativa de consumo e peso do novo sistema

Item	Peso (kg)	Potência (W)
Luminárias	20,36	1056,93
Suportes	1,44	N/A
Total	21,80	1056,93

Fonte: Autoria própria.

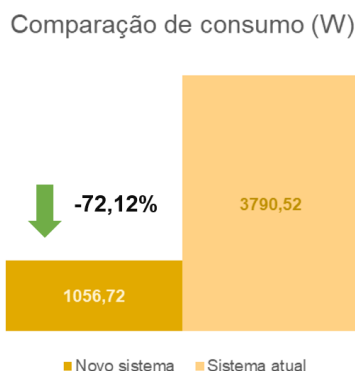
Com base nos valores obtidos, o novo sistema apresenta um peso total estimado de 21,80kg e potência total instalada de 1056,93W. Quando comparados aos valores do sistema atualmente em operação, verifica-se uma redução expressiva em ambos os parâmetros. Em termos de potência, o novo sistema apresenta diminuição de 72,12%, enquanto a redução de massa total instalada é da ordem de 15,62%.

Esses resultados representam um impacto significativo para a aeronave, pois a redução de potência elétrica demandada implica menor consumo energético durante a operação, menor carga térmica gerada internamente, e potencial alívio sobre os geradores, conversores e sistemas auxiliares de distribuição elétrica. Já a diminuição de peso contribui diretamente para redução do peso operacional vazio da aeronave, o que tende a refletir em menor consumo de combustível ao longo da vida útil do equipamento.

As Figuras 9 e 10 apresentam, de forma gráfica, a comparação entre os dois sistemas, ilus-

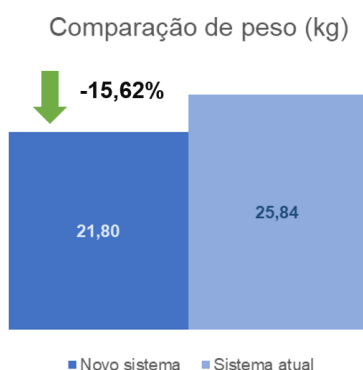
trando visualmente as diferenças observadas em termos de potência instalada e massa total.

Figura 9 – Comparação de consumo, em Watts, do sistema atual e do novo sistema.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Comparação de peso, em quilograma, do sistema atual e do novo sistema.



Fonte: Autoria própria.

Para a análise do custo do ciclo de vida (*Life-Cycle Cost – LCC*), adota-se um horizonte temporal de 10 anos. Segundo dados disponíveis no (GLASSDOOR, 2025), o salário anual de um técnico de manutenção aeronáutica nos Estados Unidos é de aproximadamente USD 60.000, o que corresponde a um custo horário em torno de USD 29,00/h. Considerando encargos e custos indiretos, pode-se estimar um custo efetivo de USD 41,00/h.

A instalação de um módulo de iluminação (remover luminária existente, preparar fixação e instalar novo conjunto) é estimada em 2 horas, re-

sultando em aproximadamente USD 82,00 por luminária em custo de mão de obra.

Considera-se que uma aeronave regional opera, em média, 8 horas por dia, acumulando 2.880 horas anuais. Ao longo de 10 anos, isso corresponde a 28.800 horas de operação.

Embora a fabricante do modelo de lâmpada fluorescente exemplificado neste trabalho afirme vida útil nominal de até 36.000 horas, esse valor é obtido em condições laboratoriais controladas (temperatura estável, ausência de vibração e ciclos de partida reduzidos). No ambiente aeronáutico, caracterizado por vibração contínua, variações térmicas significativas, ciclos de liga/desliga frequentes e restrições de espaço e ventilação, a vida útil real é substancialmente inferior. Luminárias fluorescentes expostas a ambientes hostis requerem manutenção ou substituição com menos de 6.000 horas de uso (FERNANDO, 2013).

Dessa forma, para esta análise adota-se uma vida operacional efetiva de 5.000 horas para fluorescentes, enquanto as luminárias LED, projetadas especificamente para ambiente aeronáutico, mantêm a vida útil de referência 50.000 horas fornecida pela fabricante.

A quantidade total de substituições ao longo de 10 anos é dada por Q_s , que é igual ao produto entre o número de lâmpadas e a relação de horas totais de operação no período e a vida operacional da lâmpada.

Portanto, considerando-se 46 lâmpadas fluorescentes (sistema atual), 28.800 horas totais de operação e vida útil estimada em 5000h/lâmpada,

a quantidade total de substituições ao longo de 10 anos é:

$$Q_s = 46 \times \frac{28800}{5000} \approx 265. \quad (1)$$

O custo total associado às substituições das lâmpadas fluorescentes é calculado por:

$$C = Q_s \times (C_{\text{mão de obra}} + C_{\text{lâmpada}}), \quad (2)$$

sendo $C_{\text{mão de obra}}$ o custo de mão de obra, aproximadamente igual a USD 82,00; e $C_{\text{lâmpada}}$ o custo de uma lâmpada fluorescente: USD 14,00.

Portanto $C_{\text{total}} = \text{USD } 25.440,00$ ao longo dos 10 anos, enquanto as luminárias LED, como já citado, mantêm a vida útil de referência superior a 28.800 horas, não sendo necessárias substituições, apenas a instalação, ou seja, a substituição das lâmpadas atuais. Considerando o mesmo valor de mão de obra, os resultado da instalação (manutenção) é de $48 \times \text{USD } 82,00 = \text{USD } 3.936,00$.

Com relação ao custo inicial (apenas lâmpadas), tem-se $46 \times \text{USD } 14,00 = \text{USD } 644,00$ para as lâmpadas fluorescentes, enquanto que para o LED esse valor é igual a $48 \times \text{USD } 180,00 = \text{USD } 8.640,00$. Os resultados estão sintetizados na Tabela 13.

Outro ponto relevante é o descarte das lâmpadas fluorescentes. Por utilizarem mercúrio, seu fim de vida exige logística reversa específica, transporte especializado, descontaminação controlada e reciclagem certificada, processo que eleva o custo e impõe obrigações ambientais. Já as luminárias

LED não utilizam mercúrio e seguem a cadeia de descarte típica de resíduos eletrônicos, com custo significativamente inferior. Ou seja, mesmo com custo inicial significativamente maior, o sistema LED elimina praticamente todos os custos recorrentes de manutenção e diminui possíveis custos de descarte.

8 CRONOGRAMA

Uma vez que este trabalho faz parte de um projeto maior, como já citado, foram desenvolvidas as etapas de 1 a 4 (Seção 3). Propõe-se para a continuidade do projeto o seguinte cronograma para o desenvolvimento das etapas de 5 a 9, de acordo com o cronograma apresentado na Tabela 14, abrangendo as fases de desenvolvimento do projeto elétrico, simulação luminotécnica, protótipo e testes em bancada, integração e testes na aeronave, avaliação de conformidade e certificação.

9 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas ao longo deste trabalho, observou-se que a modernização do sistema de iluminação interna da cabine representa um avanço significativo tanto em desempenho quanto em confiabilidade. O *retrofit* proposto, baseado na substituição das luminárias fluorescentes tradicionais por um novo conjunto de luminárias LED, demonstrou benefícios técnicos e operacionais claros quando comparado ao sistema atualmente instalado.

Do ponto de vista energético, verificou-se uma redução substancial da potência instalada, re-

Tabela 13 – Resultados do custo a longo prazo

Sistema	Custo inicial (USD)	Custo de manutenção em 10 anos (USD)	Total LCC (USD)
Fluorescente	644	25.440	26.084
LED	8.640	3.936	12.576

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Cronograma propsoito para continuidade do projeto.

Etapa	Início	Fim
5	Jan/26	Abr/26
6	Mar/26	Mai/26
7	Mai/26	Set/26
8	Ago/26	Out/26
9	Nov/26	Mai/26

Fonte: Autoria própria.

fletindo diretamente em menor demanda elétrica do sistema. Embora o impacto no consumo de combustível seja difícil de quantificar isoladamente devido à baixa representatividade da carga de iluminação no balanço energético da aeronave, a diminuição de potência contribui para maior eficiência geral e reduz perdas no sistema de distribuição elétrica.

Outro ponto de destaque foi a redução de massa, ainda que moderada. Em aeronaves, qualquer diminuição de peso é vantajosa, seja por facilitar integrações mecânicas, seja por reduzir a solicitação estrutural ou simplificar intervenções de manutenção. Mesmo com uma redução relativamente pequena, o novo sistema contribui para uma arquitetura mais leve e moderna.

No âmbito da manutenção, os resultados foram ainda mais expressivos. A análise do custo do ciclo de vida (LCC) mostrou que as luminárias

fluorescentes apresentam vida útil muito inferior à indicada pelo fabricante, especialmente quando submetidas às condições severas do ambiente aeronáutico, como vibrações, ciclos térmicos e variações de pressão. Em contraste, as luminárias LED projetadas para este *retrofit* apresentam vida útil superior a 50.000 horas e maior tolerância ambiental, reduzindo drasticamente a frequência de substituições e o custo de mão de obra associado. Quando projetados em um horizonte de 10 anos, os custos de manutenção do sistema fluorescente superaram o investimento inicial das luminárias LED, resultando em economia acumulada ao longo do ciclo de vida e maior disponibilidade da aeronave, uma vez que intervenções de manutenção são menos frequentes.

Além disso, o estudo evidenciou a evolução tecnológica dos sistemas de iluminação aeronáutica. O uso de LEDs possibilita maior controle da iluminação, integração com protocolos digitais, dimerização suave, estabilidade cromática e menor impacto ambiental, especialmente no descarte, já que lâmpadas fluorescentes contêm mercúrio e requerem tratamento especializado.

É importante ressaltar que o presente trabalho se insere em um projeto maior, que continua em desenvolvimento. Diversos elementos como o modelo final das luminárias, o *driver* eletrônico, as

características fotométricas precisas e as curvas de desempenho, ainda serão consolidados nas próximas etapas pela equipe de engenharia. Assim, os resultados apresentados representam uma análise preliminar, porém fundamentada, e servem como base técnica para as decisões subsequentes de projeto, ensaios laboratoriais e validação em ambiente real.

Em síntese, o estudo demonstrou que a adoção do novo sistema de iluminação LED oferece ganhos claros em eficiência, manutenção, confiabilidade e alinhamento tecnológico. A modernização analisada não se limita à troca de componentes, mas reflete a transformação do conceito de iluminação aeronáutica, incorporando soluções mais inteligentes, sustentáveis e adequadas às demandas contemporâneas de operação e certificação.

REFERÊNCIAS

- CODE OF FEDERAL REGULATIONS (CFR). **14 CFR Part 25**. 2025. <https://www.ecfr.gov/>. Electronic Code of Federal Regulations (eCFR).
- EMBRAER. **E175 APM**. 2025. https://www.embraer.com/media/g2tdpwcc/e175-apm_apm_175-1.pdf.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **FAA Fire Test Handbook – Aircraft Materials Fire Test Procedures**. [S.l.], 2014. Report No. DOT/FAA/AR-00/12, Revision 3.
- FERNANDO, L. e. a. Vida Útil de uma lâmpada fluorescente em relação ao número de acionamentos. **XIX Seminário de Iniciação Científica: Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)**, 2013. Disponível em: <https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semic/article/view/11616>.
- GLASSDOOR. **US Aircraft Maintenance Technician Salary**. 2025. https://www.glassdoor.com.br/Salários/us-aircraft-maintenance-technician-salário-SRCH_IL0,2_IN1_KO3,34.htm. Acesso em: 03 dez. 2025.
- GOU, Z. *et al.* Integrated lighting ergonomics: A review on the association between non-visual effects of light and ergonomics in the enclosed cabins. **Building and Environment**, v. 243, p. 110616, 2023.
- GUIMARÃES, I. A. B.; MORAES, A. O.; BARBOSA, D. S. Financial analysis of an illumination retrofit for regional aircraft. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 13, 2021.
- LIMA, A. **Suporte para Lampada Tubular**. 2021. <https://www.thingiverse.com/thing:4793513>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- MILBURN, N. *et al.* Aviation-related light-emitting diode (led) perception research. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, v. 84, n. 8, p. 876–878, 2013.
- RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS (RTCA). **Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA)**. 2025. <https://www.rtca.org>.
- RITCHIE, H. What share of global co emissions come from aviation? **Our World in Data**, 2024.
- ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.
- SAE, S. I. **ARP4754A – Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems**. 2010. <https://saemobilus.sae.org/standards/arp4754a-guidelines-development-civil-aircraft-systems>.
- TAHKAMO, L.; PARTONEN, T.; PESONEN, A.-K. Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. **Chronobiol Int.**, v. 36, n. 2, p. 151–170, 2019.
- VERTAMATTI, E. **Conforto e desconforto da cor da iluminação em uma cabine de aeronave: uma análise experimental**. 2014. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Dados incompletos.
- ZHENG, X. S.; RUTHERFORD, D. Fuel burn of new commercial jet aircraft: 1960 to 2019. **International Council on Clean Transportation (ICCT)**, 2020.