



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E PRODUÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

GABRIEL DA SILVA PAIVA

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO GÊMEO DIGITAL

**MANAUS- AM
2025**

GABRIEL DA SILVA PAIVA

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO GÊMEO DIGITAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IFAM - Campus Manaus Distrito Industrial, Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

**MANAUS-AM
2025**

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Distrito Industrial

P149a PAIVA, Gabriel da Silva.
Aplicação da tecnologia do gêmeo digital. / Gabriel da Silva Paiva. – Manaus,
2025.
89f.: il. Color.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial, Bacharelado em Engenharia de
Controle e Automação, 2025.

Orientador: Prof.º Celso Souza Cordeiro.

1. Gêmeos digitais. 2. Indústria 4.0. 3. Manutenção preditiva. 4. Eficiência
operacional. 5. Transformação digital. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 658.514

GABRIEL DA SILVA PAIVA

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO GÊMEO DIGITAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IFAM – Campus Manaus Distrito Industrial, Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Manaus, 09 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Orientador e Presidente: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

Avaliador 1: Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho Ribeiro

Avaliador 2: Prof. Me. Jonatas Micael Vieira de Lima

**MANAUS-AM
2025**

DEDICATÓRIA

Dedico com sublime carinho aos que sonharam intensamente por esse momento, a minha família, aos meus pais, aos meus amigos e colegas a faculdade e principalmente, pois sem a ajuda deles isso não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, minha gratidão vai para Deus, que nunca soltou minha mão. Foi Ele quem iluminou meus caminhos quando tudo parecia escuro e me sustentou com força e esperança nas horas em que eu quase desisti.

Ao Professor Phd. Cleonor e Professor Esp. Celso, deixo meu mais sincero reconhecimento. Vocês acreditaram no meu projeto de pesquisa, mesmo quando eu ainda tinha dúvidas, e foram faróis nos momentos de incerteza e conflitos. Mais do que orientadores, tornaram-se asas que me permitiram alçar voos que eu jamais imaginaria.

Agradeço aos amigos que foram pilares nessa jornada. Em especial a Fabrício Pimentel, mais que um amigo, um irmão. Enfrentamos juntos os desafios, as noites em claro e os momentos de exaustão, sempre guiados pela certeza de que a superação é o caminho do sucesso.

Ao meu irmão, Me. Giovanni Sousa, Engenheiro de Controle e Automação, agradeço profundamente pelo apoio incondicional, mesmo à distância. Nas noites mais difíceis, sua sabedoria, amizade e confiança firme foram meu refúgio e motivação. Você me ensinou que verdadeiros laços ultrapassam qualquer distância, sendo sustentados pela presença sincera e pelo coração.

Sobre a minha trajetória, ele era cheio de franquezas. ele não era bom em nada, mas ele se levantou com sua própria força e se tornou Engenheiro de Controle e Automação. Você não precisa conhecer o Gabriel Paiva atual, mas sim o Gabriel Paiva que chegou até aqui.

Agradeço extremamente aos professores do projeto ARANOUÁ, no qual tive a oportunidade de participar como aluno de cursos FIC, pela importante contribuição dos conhecimentos suplementares cujo utilizo diariamente em minha vida profissional.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal do Amazonas e todos seus professores pelo enorme prazer de ter sido aluno desta casa durante os últimos 5 anos.

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.” (Max Weber)

RESUMO:

A tecnologia de Gêmeos Digitais (Digital Twins) surge como elemento central na Indústria 4.0, integrando sistemas físicos e virtuais para monitoramento, simulação e otimização em tempo real. Este estudo aborda sua aplicação prática em uma bancada de testes com lâmpada LED, utilizando microcontroladores (Arduino Nano), sensores e modelagem 3D no Unity para criar uma réplica digital sincronizada. O modelo matemático em espaço de estados permitiu prever variáveis como corrente, temperatura e degradação, com erros mínimos (1,67% a 3,18%), enquanto a comunicação bidirecional entre hardware e software demonstrou latência aceitável (187ms) e alta precisão (98,2%). Além da indústria, destaca-se o potencial dos Gêmeos Digitais em construção civil, saúde e cidades inteligentes, promovendo eficiência operacional e manutenção preditiva. Contudo, desafios como custos elevados, complexidade técnica e riscos de segurança de dados persistem. O trabalho valida a viabilidade da tecnologia, evidenciando redução de 23% no consumo energético e aumento de 15% na vida útil de equipamentos, reforçando seu papel como catalisador da transformação digital. Conclui-se que a integração de ferramentas como IA pode ampliar aplicações futuras, tornando os Gêmeos Digitais pilares estratégicos para inovação e produtividade.

Palavras-chave: gêmeos digitais, Indústria 4.0, manutenção preditiva, eficiência operacional, transformação digital.

ABSTRACT:

Digital Twin technology emerges as a central element in Industry 4.0, integrating physical and virtual systems for real-time monitoring, simulation, and optimization. This study explores its practical application in a test bench with an LED lamp, using microcontrollers (Arduino Nano), sensors, and 3D modeling in Unity to create a synchronized digital replica. A mathematical state-space model enabled the prediction of variables such as current, temperature, and degradation with minimal errors (1.67% to 3.18%), while bidirectional communication between hardware and software demonstrated acceptable latency (187ms) and high precision (98.2%). Beyond industry, Digital Twins show potential in construction, healthcare, and smart cities, promoting operational efficiency and predictive maintenance. However, challenges such as high costs, technical complexity, and data security risks persist. The study validates the technology's feasibility, highlighting a 23% reduction in energy consumption and a 15% increase in equipment lifespan, reinforcing its role as a catalyst for digital transformation. The integration of tools like AI is expected to expand future applications, positioning Digital Twins as strategic pillars for innovation and productivity.

Keywords: *Digital Twins, Industry 4.0, predictive maintenance, operational efficiency, digital transformation.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gêmeos Digitais da Cidade: Benefícios e Facilitadores Tecnológicos	22
Figura 2 - Visão gráfica de GD.....	26
Figura 3 - Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital	28
Figura 4 - Ferramentas Aplicadas em Gêmeos Digitais.....	29
Figura 5 - Desenho da proposta	31
Figura 6 – Processamento da Imagem.....	33
Figura 7 - Representação da proposta de pesquisa	42
Figura 8 - Diagrama de circuito	43
Figura 9 - Proposta de condução de projetos de simulação	45
Figura 10 - Suporte de lâmpada	46
Figura 11 - Lâmpada com abajur em ambiente 3D.....	47
Figura 12- Tela principal Unity	47
Figura 13 - Ambiente de renderização.....	48
Figura 14 - Ambiente Unity.....	49
Figura 15 - Estado do modelo GD.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Lista de materiais.....	44
Tabela 2 - Investimento em materiais.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D - Terceira Dimensão

A/D – Conversor Analógico Digital

AR - Realidade Aumentada

D – Degadação

GD - Gêmeo Digital

GLB - GL Transmission Format Binary

IDE - Integrated Development Environment

ISO - International Organization for Standardization

LiDAR - Light Detection and Ranging

OBJ - Wavefront Objec

SfM - Structure from Motion

sRGB - standard Red Green Blue

T - Temperatura

VR - Realidade Virtual

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	15
1.1 INTRODUÇÃO	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
CAPÍTULO II.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. PANORAMA GERAL SOBRE A ORIGEM DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS.....	19
2.2. IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS NA AUTOMAÇÃO.....	19
2.3. PRICIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS	20
2.8. TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS – MELHORIAS PARA O FUTURO	21
2.9. COMO OS GÊMEOS DIGITAIS BENEFICIAM A SOCIEDADE.....	22
CAPÍTULO III.....	24
3 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
3.1. ABRANGÊNCIA DOS GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA	24
3.2. CONCEITO DE GÊMEOS DIGITAIS.....	26
3.3. PRINCIPAIS TIPOS DE GD.....	27
3.4. DG POR MODELOS.....	28
3.5. FERRAMENTAS DE GÊMEOS DIGITAIS.....	29
CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4 INTRODUÇÃO	31
MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.3.1. MODELO MATEMÁTICO DA REPRESENTAÇÃO DA DIGITAL TWINS ATRAVÉS DA REPRESENTAÇÃO DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA NO ESPAÇO DE ESTADOS	38
MODELO DINÂMICO NO ESPAÇO DE ESTADOS	39
DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES NO CONTEXTO DO GÊMEO DIGITAL (LÂMPADA).....	40

REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA PROPOSTA	42
DIAGRAMA DE CONEXÃO.....	42
4.3.2. MATERIAIS UTILIZADOS – GÊMEOS DIGITAIS.....	44
SENSOR DE CORRENTE (ACS712)	44
4.4 SIMULAÇÕES E DESENVOLVIMENTO DE MODELO GÊMEOS DIGITAIS	44
SIMULAÇÃO.....	46
PASSO A PASSO DA CONFIGURAÇÃO DO HARDWARE.....	48
DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	48
SOFTWARES UTILIZADOS NO PROJETO	51
RESUMO DO CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
CAPÍTULO V.....	53
5. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
CAPÍTULO VI.....	54
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
7. TRABALHOS FUTUROS.....	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A – CÓDIGO PARA ARDUINO NANO.....	60
APÊNDICE B – CÓDIGO PARA UNITY (C#)	60
APÊNDICE C – FOTOS DO EXPERIMENTO	62
APÊNDICE D – ESQUEMA ELÉTRICO.....	66

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

A tecnologia dos gêmeos digitais (Digital Twin) é um dos pilares da Indústria 4.0. De acordo com Ellgass et al. (2018), o gêmeo digital é “um modelo virtual projetado para refletir com precisão um objeto físico”. Esse modelo virtual é alimentado em tempo real, o que permite que o comportamento do sistema físico seja monitorado, analisado e até predito no ambiente digital. Essa tecnologia possibilita o monitoramento do desempenho e a otimização de processos, permitindo a identificação de problemas potenciais antes que ocorram (LIU et al, 2022).

Uma das principais vantagens dos gêmeos digitais é a manutenção preditiva, que segue intervalos fixos, sem considerar o estado real dos equipamentos. Segundo Liu et al.(2022), essa abordagem otimiza o uso dos componentes, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade dos ativos. Com análise de dados em tempo real, o gêmeo digital permite que falhas iminentes sejam previstas e que a manutenção seja feita, minimizando paradas não programadas e ampliando a vida útil dos equipamentos.

A pesquisa do Capgemini Research Institute (2023), revela que 81% das empresas consideram o gêmeo digital essencial para melhorar a confiabilidade dos sistemas, destacando que essa tecnologia não só reduz custos, mas também eleva a eficiência operacional. Setores como defesa e aeroespacial registraram um aumento expressivo no investimento em gêmeos digitais, com crescimento de 40% em um ano.

Além da indústria, os gêmeos digitais têm aplicação em áreas como construção civil, saúde e cidades inteligentes, promovendo uma gestão integrada e baseada em dados. Na construção, por exemplo, eles permitem um acompanhamento do ciclo de vida dos ativos, desde o planejamento até a manutenção, superando abordagens tradicionais que segmentam informações.

A implementação dos gêmeos digitais, embora promissora, enfrenta desafios como altos custos iniciais, complexidade de integração com sistemas já existentes e necessidade de proteger dados sensíveis (MUSSOMELI, 2018). No entanto, o retorno potencial em produtividade, eficiência e inovação, assim como o impacto positivo na tomada de decisões, justificam os investimentos.

Diante do interesse crescente, este projeto explora as aplicações práticas dos gêmeos digitais no contexto de uma bancada de testes, onde o objetivo é prever possíveis falhas e evitar paradas não planejadas. Ao criar um ambiente virtual que replica o sistema físico,

é possível simular cenários de desgaste, identificar falhas e planejar manutenções, assegurando a continuidade e a eficiência dos processos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A aplicação da tecnologia de Gêmeo Digital vem se consolidando como um dos elementos essenciais na evolução da Indústria 4.0, proporcionando um modelo virtual preciso que replica sistemas físicos em tempo real. Essa capacidade é fundamental para aprimorar o monitoramento, a análise e a previsão de comportamentos em ambientes industriais e operacionais. Esse projeto se justifica pelo potencial transformador dos Gêmeos Digitais na eficiência operacional e na otimização da manutenção de ativos, proporcionando um caminho viável para empresas que buscam reduzir custos e aumentar a confiabilidade de seus sistemas (AMARAL et al., (2020).

Os Gêmeos Digitais permitem o desenvolvimento de modelos baseados no estado real dos equipamentos, ao contrário da manutenção preditiva tradicional, que utiliza intervalos fixos sem considerar o desgaste real. Essa abordagem não só melhora a vida útil dos ativos, como minimiza interrupções inesperadas e reduz custos operacionais, oferecendo um nível de controle antes inalcançável. Dessa forma, a justificativa para a adoção dessa tecnologia também repousa em sua capacidade de melhorar significativamente a confiabilidade dos processos industriais (CAPGEMINI, 2023).

Além do setor industrial, a relevância dos Gêmeos Digitais se estende a outras áreas, como construção civil, saúde e cidades inteligentes, onde o acompanhamento integrado e em tempo real permite que a gestão de ativos seja mais precisa e eficaz. Na construção, por exemplo, a tecnologia possibilita monitorar o ciclo de vida dos ativos desde o planejamento até a manutenção, oferecendo uma visão global que supera as abordagens tradicionais segmentadas (DITZEL et al., 2020).

Embora o potencial dos Gêmeos Digitais seja inegável, a implementação dessa tecnologia ainda enfrenta desafios, como os altos custos iniciais, a complexidade de integração com sistemas legados e a necessidade de proteger dados sensíveis. No entanto, o retorno em produtividade e eficiência operacional justifica a superação desses obstáculos, uma vez que o Gêmeo Digital oferece um ambiente virtual onde é possível simular cenários de desgaste e prever falhas, assegurando continuidade e eficiência aos processos industriais. Dessa forma, a pesquisa justifica-se pela oportunidade de explorar as aplicações práticas dos Gêmeos Digitais, contribuindo para a inovação e a competitividade nas mais diversas áreas.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar a aplicação da tecnologia do Gêmeo Digital em um sistema com uma lâmpada.

Objetivos específicos

1. Explorar os princípios das tecnologias que fundamentam o conceito de Gêmeo Digital, detalhando seus componentes e funcionalidades.
2. Realizar uma revisão sistemática da literatura especializada sobre aplicações de Gêmeos Digitais em processos industriais, com foco nas tecnologias habilitadoras e nos benefícios obtidos.
3. Investigar o papel das tecnologias habilitadoras, incluindo Inteligência Artificial (IA) que possibilitam a implementação de Gêmeos Digitais em processos industriais.
4. Propor um modelo conceitual de Gêmeo Digital, integrando dados em tempo real e simulações operacionais para maximizar a eficiência e a otimização de processos.
5. Validar o modelo proposto por meio de simulações de diferentes cenários operacionais, avaliando o impacto do Gêmeo Digital na tomada de decisões e na gestão de ativos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 será apresentada uma introdução ao tema, com uma descrição detalhada da tecnologia dos Gêmeos Digitais e sua crescente relevância no contexto da Indústria

4.0. Esse capítulo visa contextualizar o leitor sobre a importância dos Gêmeos Digitais para o monitoramento e otimização de processos em tempo real.

No Capítulo 2, serão apresentados os fundamentos teóricos que sustentam a geração de Gêmeos Digitais, juntamente com as principais ferramentas e conceitos tecnológicos, como IA que tornam sua implementação viável.

No Capítulo 3, serão aprofundados as teorias e os modelos que fundamentam a aplicação da tecnologia de Gêmeos Digitais, destacando os conceitos-chave, abordagens metodológicas e tecnologias habilitadoras que suportam essa inovação.

No Capítulo 4, será detalhada a metodologia e a proposta deste trabalho, com foco nos principais desafios e limitações da aplicação dos Gêmeos Digitais, incluindo barreiras técnicas, altos custos, questões de segurança e privacidade de dados, além de considerações éticas e impactos sociais relacionados à implementação dessa tecnologia.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados das simulações e a análise dos dados obtidos com a aplicação da tecnologia de Gêmeos Digitais.

Por fim, no Capítulo 6, serão apresentadas as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições e resultados obtidos. Serão também sugeridas direções para pesquisas futuras, visando explorar novas aplicações e soluções para superar os desafios identificados ao longo do trabalho.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PANORAMA GERAL SOBRE A ORIGEM DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS

A partir de uma iniciativa do governo alemão em 2011, o conceito de "Indústria 4.0" surge como um modelo para impulsionar a produtividade e a eficiência no setor industrial. Essa revolução, chamada de quarta revolução industrial, diferencia-se das anteriores por seu foco na automação avançada, conectividade e digitalização de processos, levando a indústria a um novo patamar de inovação e competitividade (RODIC, 2017).

Os pesquisadores Rüttimann e Stöckli (2016), destacam que as revoluções industriais anteriores foram marcadas por avanços tecnológicos específicos: a primeira com a introdução da máquina a vapor, a segunda com o uso da eletricidade e a terceira com a expansão da computação e das tecnologias da informação. Já a quarta revolução industrial amplia esse conceito ao transformar a maneira como as indústrias enfrentam os desafios da era digital esta revolução industrial é marcada pelo advento da chamada Internet das Coisas (IoT - acrônimo inglês para "*Internet of Things*") (TRAPPEY et al., 2017).

Portanto, com o advento das revoluções industriais possibilitou inúmeros avanços tecnológicos. Entre esses, destaca-se o tema do gêmeo digital, cujo desenvolvimento conquistou espaço não apenas na indústria, mas também em outras áreas do conhecimento. A seguir, exploraremos os conceitos e a evolução dessa tecnologia e diferentes escopos de aplicação ao longo do tempo (ROLLE, 2019).

2.2. IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS NA AUTOMAÇÃO

A Indústria 4.0 visa integrar e virtualizar sistemas industriais, criando ambientes produtivos totalmente automatizados e conectados (RÜTTIMANN. STÖCKLI, 2016; URIARTE. NG. MORIS, 2018). Segundo Rodic (2017), essa integração permite otimizar processos e agregar valor à cadeia produtiva por meio da digitalização. Na prática, a Indústria 4.0 conecta pessoas, processos, sistemas e ambientes, possibilitando a interação e colaboração contínua entre o físico e o virtual, essencial para a inovação nos processos industriais, processos autômatos os quais, por meio das técnicas e metodologias da Teoria do Controle, realizam longos processos sem a interação em massa da mão de obra humana (ANTUNES, 2020).

Para alcançar o potencial industrial, o governo alemão incentiva o desenvolvimento de fábricas inteligentes, caracterizadas pela autonomia e conectividade ao longo de toda a cadeia produtiva (DALENOGARE, 2018). Essas fábricas se baseiam em tecnologias como Big Data, Internet das Coisas (IoT) e Sistemas Ciber-Físicos, pilares fundamentais da Indústria 4.0 que possibilitam um controle aprimorado dos processos e uma análise mais profunda (COELHO, 2016).

O Gêmeo Digital é uma representação virtual precisa de um objeto ou processo físico, que permite simulações, monitoramento e previsões em tempo real (SOUZA, 2024). Essa tecnologia otimiza a tomada de decisões, contribui para a manutenção preditiva e traz benefícios significativos em diversas áreas industriais. Entre suas vantagens destacam-se a redução de custos, maior eficiência no desenvolvimento de projetos e a possibilidade de realizar testes virtuais, além de previsões de desempenho, o que potencializa o monitoramento preventivo (THAMES. SCHAEFER, 2017).

Para viabilizar esses benefícios, é essencial compreendermos as técnicas e ferramentas que sustentam essa tecnologia. Por meio dessas abordagens, é possível criar réplicas virtuais altamente precisas, capazes de refletir as condições operacionais de sistemas físicos em tempo real. Isso permite análises detalhadas, identificação de falhas de forma preditiva e otimização de processos (SISINNI et al., 2018).

Com base nesses conceitos, será apresentado a seguir um exame das principais técnicas e ferramentas que consolidam o Gêmeo Digital como um dos pilares essenciais da transformação digital no ambiente industrial.

2.3. PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS

A tecnologia de Gêmeos Digitais utiliza ferramentas habilitadoras, as quais quando integradas de forma eficaz, oferecem uma base sólida para o desenvolvimento de gêmeos digitais que refletem com fidelidade as condições operacionais de máquinas, processos ou sistemas completos, possibilitando previsões confiáveis e tomadas de decisão mais rápidas e precisas.

Conforme Lee, Bagheri e Kao (2015), a competitividade na indústria atual exige a aplicação de tecnologias avançadas e flexíveis. Essas tecnologias precisam permitir ciclos de vida de produto mais curtos, maior customização e complexidade operacional crescente. Nesse contexto, a Manufatura Inteligente, um conceito associado à Indústria

4.0, destaca-se por utilizar tecnologias de ponta para melhorar a qualidade, eficiência e desempenho da produção (ZHONG et al., 2017).

Estudos apontam duas abordagens principais para o uso de Gêmeos Digitais: a criação de modelos e arquiteturas voltados para simulações, e a análise de dados para aprimorar a tomada de decisões e prever eventos futuros (UHLEMANN, LEHMANN, STEINHILPER, 2017). Essas abordagens, quando combinadas, estabelecem os Gêmeos Digitais como a base para alcançar a excelência operacional na Indústria 4.0.

Essa tecnologia integra ferramentas avançadas, como realidade aumentada, big data e robôs colaborativos, consolidando-se como um elemento estratégico para aumentar a competitividade industrial (GIMENEZ, 2019). No entanto, o potencial dos Gêmeos Digitais vai além dessas aplicações iniciais, abrangendo diferentes tipos e variações que ampliam suas possibilidades de uso.

A seguir, aprender os tipos de Gêmeos Digitais existentes e como cada um contribui para transformar o ambiente industrial, fortalecendo ainda mais o papel dessa tecnologia na era digital.

2.8. TECNOLOGIA DE GÊMEOS DIGITAIS – MELHORIAS PARA O FUTURO

Focada na busca constante por eficiência, segurança, produtividade operacional e, principalmente, maximização do retorno sobre o investimento, a Indústria 4.0 se apoia em um conjunto de tecnologias e tendências facilitadoras, amplamente reconhecidas como os pilares fundamentais da indústria inteligente (GIMENEZ, 2019).

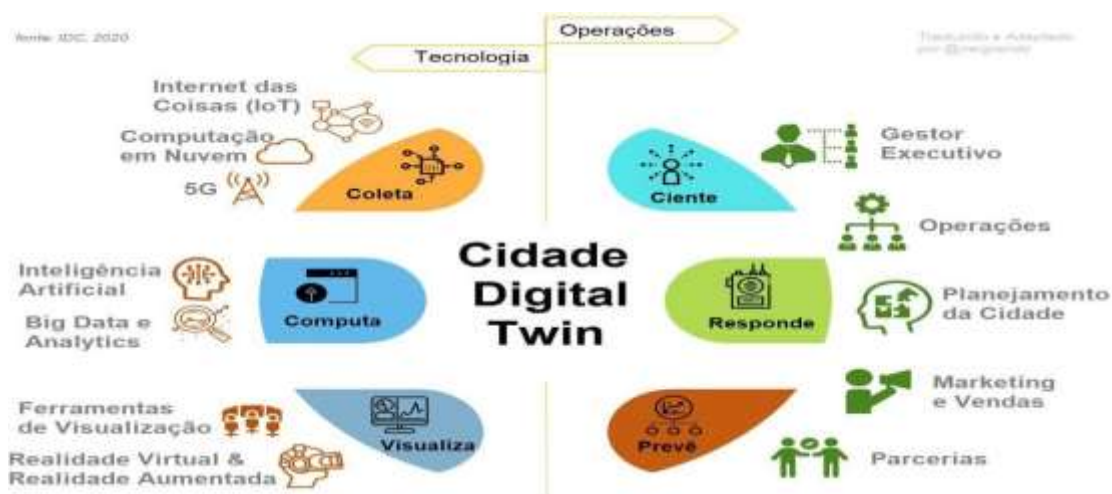
Nesse cenário, nove tecnologias-chave estão transformando os processos industriais de maneira significativa. A Internet das Coisas (IoT) possibilita a troca instantânea de dados entre dispositivos conectados, enquanto a Inteligência Artificial (IA) e o aprendizado de máquina automatizam operações e oferecem análises preditivas avançadas. A análise de Big Data potencializa a tomada de decisões baseadas em dados, enquanto a Manufatura Aditiva, a Robótica Avançada e a Realidade Aumentada viabilizam inovação, flexibilidade e eficiência nos processos produtivos. Tecnologias como Blockchain e Cibersegurança desempenham papéis críticos na garantia da integridade e segurança das operações industriais (SAKURAI, ZUCHI, 2018).

Por fim, o Gêmeo Digital, aliado a simulações virtuais, cria um ambiente de produção moderno, altamente eficiente e capaz de enfrentar os desafios futuros. Essas ferramentas oferecem uma representação fiel dos sistemas físicos, permitindo análises em tempo real e otimizações contínuas, consolidando a Indústria 4.0 como um marco transformador na evolução do setor industrial (LIU et al., 2022; BOFILL et al., 2023).

2.9. COMO OS GÊMEOS DIGITAIS BENEFICIAM A SOCIEDADE

De acordo com Nazir (2020), os Gêmeos Digitais podem abranger todos os níveis de gerenciamento de uma cidade, incluindo a gestão executiva, equipes operacionais (como transporte público, polícia, bombeiros, serviços de emergência e serviços públicos), planejadores urbanos, equipes de marketing e branding, além de terceiros. Na figura 1, é possível observar cada uma dessas funções pode se beneficiar de maneira significativa com a utilização dessa tecnologia:

Figura 1 - Gêmeos Digitais da Cidade: Benefícios e Facilitadores Tecnológicos



Fonte: Imagem Adaptado Dalenogare (2018).

Gestão Executiva:

Os Gêmeos Digitais aprimoram a tomada de decisão em nível executivo, fornecendo uma visão holística e flexível sobre ativos, instalações e processos. Com esses dados, os gestores podem monitorar de forma precisa os indicadores-chave de desempenho (KPIs), permitindo decisões mais informadas e estratégicas (OLIVEIRA, 2024).

Operações na Cidade:

Para as equipes operacionais, os Gêmeos Digitais possibilitam uma abordagem de "controle de missão" nas operações urbanas. O acesso a uma visão em tempo real de ativos individuais, como semáforos, e de cadeias de valor completas, como vias arteriais, permite prever problemas e mitigar riscos antes que se tornem críticos as vulnerabilidades (PEREIRA. DE OLIVEIRA SIMONETTO, 2018).

Planejadores Urbanos:

O planejamento urbano, apesar de ser essencial, apresenta desafios significativos devido à dificuldade em prever os resultados de novos desenvolvimentos ou melhorias. Os Gêmeos Digitais auxiliam nesse processo ao oferecer ferramentas para geração de ideias,

colaboração nas fases iniciais, simulações rápidas e testes de diferentes cenários (ROLLE, 2019).

Equipes de Marketing e Vendas:

Os dados extensivos coletados pelos Gêmeos Digitais possibilitam análises detalhadas, como a identificação de causas-raiz para problemas recorrentes (por exemplo, acidentes em um cruzamento específico). Isso permite criar campanhas de marketing direcionadas e influenciar o comportamento dos cidadãos. Além disso, os dados em tempo real sobre a movimentação de pessoas abrem novas oportunidades de geração de receita, como publicidade direcionada e valorização de imóveis.

Parceiros e Terceiros:

Os Gêmeos Digitais promovem maior colaboração e comunicação com parceiros estratégicos. Ao facilitar o compartilhamento de dados entre diferentes organizações, como agências de transporte público e serviços de carona, aceleram o desenvolvimento de produtos e serviços, otimizando a integração e eficiência entre as partes.

Essa tecnologia, ao unir visão em tempo real, análise preditiva e simulação, transforma a gestão e operação das cidades, tornando-as mais inteligentes, conectadas e adaptáveis às necessidades dos cidadãos e parceiros.

Os Gêmeos Digitais estão revolucionando a gestão de sistemas industriais e urbanos, promovendo simulações em tempo real e maior eficiência. Eles são fundamentais na transformação digital, impactando positivamente a produtividade, a segurança e a sustentabilidade.

No próximo capítulo, será abordada a fundamentação teórica dos Gêmeos Digitais, explorando sua aplicação prática e avanços tecnológicos que apontam para melhorias significativas na eficiência e competitividade no futuro.

CAPÍTULO III

3 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com base na revisão da literatura realizada, encontramos 15 artigos possuem relevância com nosso estudo, mostra que o Gêmeo Digital é amplamente reconhecido como um avanço significativo em diversas áreas do conhecimento, contribuindo para a digitalização de equipamentos e processos. A tabela1, apresenta uma análise das diversas aplicações da tecnologia de cada artigo, categorizados por autor, ano de publicação, título e principais insights.

3.1. ABRANGÊNCIA DOS GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA

A implementação de gêmeos digitais (GD) tem se mostrado uma das principais tendências tecnológicas para a Indústria 4.0, com aplicações que abrangem desde a otimização de processos até a virtualização de recursos e a gestão de cadeias de suprimentos. A abrangência dessas aplicações é evidenciada por diversos estudos recentes, que destacam a importância dos GDs na criação de fábricas inteligentes, na melhoria da rastreabilidade de ativos e na integração de tecnologias como aprendizado de máquina e big data analytics.

De acordo com Gurjanov (2019), destacam que a formação de gêmeos digitais em sistemas ciberfísicos é essencial para a criação de fábricas inteligentes, utilizando áreas de produção avançadas, equipamentos integrados e pessoal qualificado em tecnologias digitais. Essa abordagem permite a simulação e o controle eficiente de processos industriais, contribuindo para a eficácia operacional. Da mesma forma, Samir, Maffei e Onori (2019), enfatizam o papel fundamental da rastreabilidade de ativos em tempo real, que melhora a visibilidade e o controle no chão de fábrica, facilitando decisões de planejamento e agendamento.

A combinação de modelos baseados em dados e aprendizado de máquina é explorada por Jaensch et al. (2018), que propõem um conceito integrado de gêmeos digitais para acelerar o desenvolvimento de sistemas de manufatura. Redelinghuys et al. (2019), complementam essa visão ao apresentar uma arquitetura de seis camadas para gêmeos digitais, que permite a troca de dados entre simulações remotas e o ambiente físico, utilizando tecnologias como IoT e bancos de dados em nuvem.

A virtualização de recursos e a conectividade em nuvem são temas centrais no trabalho de Mengnan et al. (2021), que propõem uma arquitetura genérica para equipamentos de fabricação baseados em nuvem, habilitando serviços de manufatura sob demanda. Essa

abordagem é reforçada por Li et al. (2023), que aplicam o conceito de gêmeos digitais à reciclagem e recuperação de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE), integrando operações de manufatura e remanufatura ao longo do ciclo de vida do produto. A aplicação de gêmeos digitais na produção de motores elétricos é investigada por Mayr et al. (2018), que destacam o potencial de abordagens baseadas em dados, como análise de dados e aprendizado de máquina, para otimizar processos industriais. Liu et al. (2022), ampliam essa discussão ao integrar conceitos como inteligência artificial distribuída e controle autônomo em ambientes de simulação ciberfísica, visando aplicações futuras na Indústria 4.0.

A gestão de riscos e a resiliência na cadeia de suprimentos são abordadas por Ivanov et al. (2019), que demonstram como gêmeos digitais podem integrar operações inteligentes e otimizadas para mitigar disrupções. Ayani et al. (2018), exploram a aplicação de emulação para o condicionamento de máquinas, enquanto Durão et al. (2018), identificam requisitos críticos para a implementação de GDs, como integração de dados e fidelidade em tempo real.

Para Ellgass et al. (2018), propõem um framework para sistemas de manufatura baseados em GDs, utilizando realidade virtual para a virtualização de recursos físicos. Por fim, Uhlemann et al. (2017), oferecem diretrizes para a implementação de GDs em pequenas e médias empresas, destacando a importância de bancos de dados robustos e da integração de sistemas ciberfísicos.

Em síntese, a abrangência dos gêmeos digitais na Indústria 4.0 é vasta, englobando desde a otimização de processos industriais até a gestão de cadeias de suprimentos e a virtualização de recursos. Essas aplicações são suportadas por tecnologias emergentes, como IoT, big data, aprendizado de máquina e realidade virtual, que juntas promovem a transformação digital das operações industriais.

Conforme ilustrado anteriormente, a tecnologia de Gêmeo Digital tem uma flexibilidade de aplicação em diversas áreas do conhecimento, porém vem desempenhando um papel crucial na modernização da manufatura, ao viabilizar decisões rápidas e precisas com base em simulações detalhadas e dados em tempo real. Conforme destacado por Gurjanov (2019), a criação de fábricas inteligentes está intrinsicamente ligada ao uso de tecnologias digitais avançadas e à integração de ambientes físicos e virtuais. Essa abordagem permite a antecipação de ocorrências e a otimização de processos produtivos. Tecnologias como Inteligência Artificial (IA) e computação em nuvem são fundamentais nesse contexto,

pois possibilitam a coleta, o armazenamento e o processamento de grandes volumes de dados de maneira eficiente e integrada.

3.2. CONCEITO DE GÊMEOS DIGITAIS

Nesse contexto, o conceito de Gêmeo Digital surge como uma das principais ferramentas para impulsionar a inovação e a eficiência nos processos industriais. Segundo os pesquisadores Boje et al (2020), o Gêmeo Digital é definido como um modelo virtual que replica um objeto físico ou processo industrial, permitindo a realização de simulações e análises em tempo real. Na figura 2, podemos ter uma visão gráfica do conceito gêmeo digital.

Figura 2 - Visão gráfica de GD



Fonte: Adaptado de Boje et al. (2020).

Com a ampliação do conceito para outras áreas, diferentes interpretações e atributos do Gêmeo Digital foram propostos, muitas vezes associados a casos de uso específicos (VANDERHORN. MAHADEVAN, 2021). De forma geral, o Gêmeo Digital é composto por três elementos fundamentais: o produto físico, seu modelo virtual e as conexões de dados que os integram.

Esse modelo não apenas fundamenta a tecnologia, mas também foi amplamente utilizado em processos industriais, representando um marco na transformação digital. A seguir, exploraremos sua relevância no campo da automação, destacando como o Gêmeo Digital contribui para otimizar operações e promover avanços tecnológicos.

3.3. PRINCIPAIS TIPOS DE GD

Como foi dito anteriormente, as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 possibilitam a integração entre o mundo real e o virtual, permitindo a criação de Gêmeos Digitais (QUINALHA, 2018). Segundo Glaessgen e Stargel (2012), um Gêmeo Digital é definido como uma simulação multifísica, multiescala e probabilística integrada de um sistema, construída com base nos melhores modelos físicos disponíveis, combinados com atualizações de sensores e dados históricos (MARQUES. GONÇALVES. SOUZA, 2021). Essa abordagem possibilita a reprodução fiel dos comportamentos do sistema em um ambiente simulado.

O conceito de Gêmeo Digital abrange três principais dimensões:

- **Produtos físicos** no espaço físico, representando os objetos reais;
- **Produtos virtuais** no espaço virtual, que são suas representações digitais;
- **Produto conectado**, que une os dois elementos por meio de dados e informações compartilhadas.

No espaço virtual, o Gêmeo Digital aprimora a disponibilidade de informações sobre o sistema, incorporando características comportamentais detalhadas. Isso permite não apenas visualizar o produto, mas também testá-lo quanto ao desempenho e à funcionalidade, expandindo significativamente as possibilidades de análise e otimização (GRIEVES, 2014).

O Gêmeo Digital é, essencialmente, uma réplica virtual que reflete em tempo real o comportamento e as condições de um sistema físico. Ele mantém uma sincronização precisa e dinâmica entre os dois domínios, permitindo uma interação contínua e eficaz (GRIEVES, 2022). No espaço físico, dados gerados por diferentes fontes são coletados e integrados. Esses dados, por si só, já possuem valor, mas tornam-se ainda mais úteis quando combinados com informações históricas no ambiente virtual (ROLLE, 2019).

Essa convergência entre os espaços físico e virtual possibilita uma atualização constante do Gêmeo Digital, promovendo melhorias contínuas. Por meio da comparação entre os dois domínios, ajustes podem ser feitos em tempo real, assegurando simulações cada vez mais precisas e alinhadas ao sistema físico original (TAO et al., 2018).

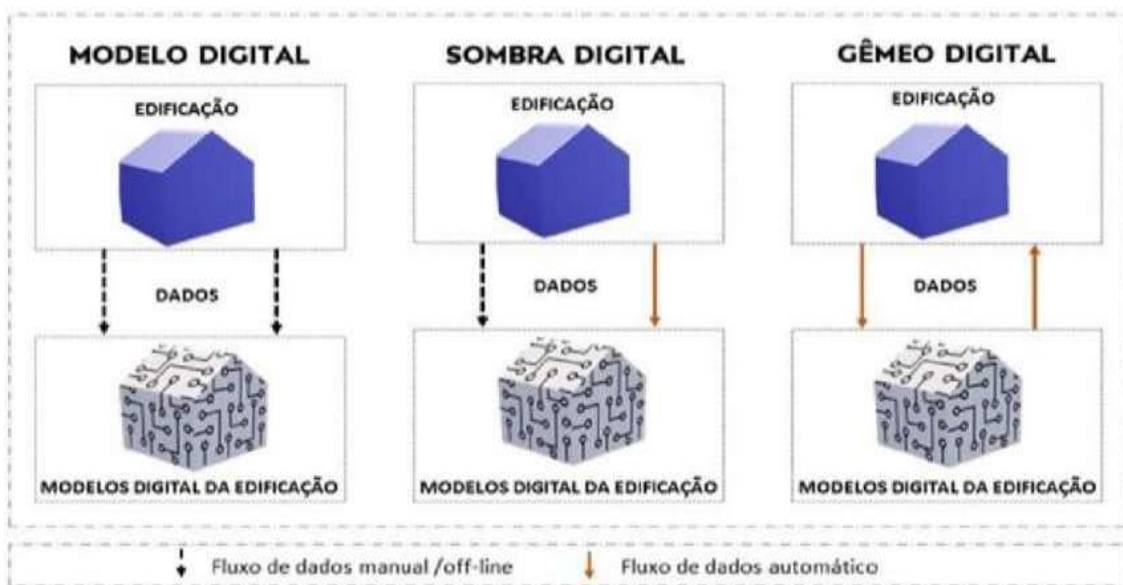
Embora existam diferentes interpretações sobre o conceito de Gêmeo Digital, conforme descrito por diversos autores, todas as abordagens buscam aprimorar a compreensão e a aplicação dessa tecnologia. A seguir, exploraremos essas perspectivas e suas

contribuições para o desenvolvimento e a utilização dos Gêmeos Digitais (SOUZA, 2024).

3.4. DG POR MODELOS

Na literatura, como foi exposto, o conceito de Gêmeos Digitais é frequentemente classificado para facilitar a compreensão e aplicação da representação virtual de elementos do mundo real. Uma categorização amplamente aceita foi proposta por Kritzinger et al. (2018), que organiza os Gêmeos Digitais em três categorias principais, baseadas no nível de integração entre os domínios físico e virtual, como ilustrado na Figura 3:

Figura 3 - Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital



Fonte: MARQUES. GONÇALVES. SOUZA, (2021).

Modelo Digital: Trata-se da representação digital de um objeto físico, porém sem qualquer integração automática com o objeto real. Embora possa utilizar dados reais para sua criação, a troca de informações entre o modelo e o objeto físico ocorre de forma manual (KRITZINGER et al., 2018).

Sombra Digital: Caracteriza-se por um fluxo de dados unidirecional, no qual as alterações no objeto físico atualizam o modelo virtual correspondente. Esse tipo de integração permite monitorar mudanças no ambiente físico, mas não possibilita qualquer interação reversa (SOUZA, 2024).

Gêmeo Digital: Representa o mais alto nível de integração, com um fluxo de dados bidirecional. Nesse caso, o objeto físico envia informações para atualizar o modelo virtual, enquanto o modelo virtual pode, simultaneamente, influenciar e controlar o objeto

físico. Essa interação permite a execução de análises em tempo real e intervenções precisas no ambiente físico (TAO et al., 2019).

Essas categorias são fundamentais para compreender o nível de conectividade e funcionalidade que um sistema de Gêmeos Digitais pode proporcionar. Essa compreensão é crucial para orientar sua aplicação de maneira eficiente em diferentes contextos industriais e tecnológicos.

Outro aspecto importante é a identificação das ferramentas mais adequadas para a implantação de um sistema de Gêmeo Digital. A escolha correta dessas ferramentas é essencial para garantir o sucesso do projeto e o alcance dos objetivos desejados. No próximo tópico, exploraremos os diferentes tipos de ferramentas disponíveis para essa tecnologia e suas respectivas aplicações.

3.5. FERRAMENTAS DE GÊMEOS DIGITAIS

Os autores Bevilacqua et al. (2020), apresentam uma visão abrangente sobre o Gêmeo Digital (GD), destacando que o sistema é composto por quatro ferramentas principais, voltadas para avaliação de riscos, configuração do sistema de simulação e previsão e detecção de anomalias. Na figura 4. Podemos ter uma visão geral das ferramentas disponíveis.

Figura 4 - Ferramentas Aplicadas em Gêmeos Digitais.



Fonte: Adaptado de Bevilacqua et al., (2020).

1. **Ferramenta de Controle e Execução:** possibilita a comunicação entre os sistemas físico e cibernético, integrando saídas de sensores, transdutores, e entradas para controle de atuadores, interruptores, entre outros. Essa ferramenta executa programas

específicos, processa sinais digitais e analógicos provenientes de sensores, e direciona esses sinais aos atuadores da planta industrial.

2. **Ferramenta de Simulação:** permite criar um modelo virtual dos processos, abrangendo tanto a simulação coerente com a planta física quanto modelos comportamentais e funcionais. Essa ferramenta é essencial para testar cenários hipotéticos sem comprometer a segurança da planta física ou de seus operadores. Além disso, ela emite alertas quando os sinais obtidos apresentam discrepâncias significativas em relação aos valores esperados.
3. **Ferramenta de Detecção e Previsão de Anomalias:** desempenha um papel crítico na identificação das causas de falhas (detecção de anomalias) e na previsão do tempo restante para que o sistema opere dentro dos parâmetros aceitáveis antes de falhar ou sair dos limites operacionais da planta (previsão de anomalias e avaliação de vida útil residual).
4. **Plataforma de Servidor em Nuvem:** responsável por receber e armazenar em tempo real os dados provenientes dos sensores e sistemas instalados na planta, permitindo o gerenciamento centralizado e o processamento contínuo dessas informações.

A estrutura robusta do Gêmeo Digital (GD) desempenha um papel crucial no suporte à operação eficiente e à manutenção preditiva das plantas industriais. Por meio da integração contínua entre o ambiente físico e o virtual, o GD possibilita a coleta, análise e interpretação de dados em tempo real, garantindo maior confiabilidade e segurança nos processos produtivos.

Essa tecnologia não apenas otimiza a identificação de falhas e a antecipação de problemas, mas também permite a simulação de cenários e o planejamento de estratégias mais eficazes. Dessa forma, o GD se consolida como uma ferramenta indispensável para o aprimoramento contínuo das operações industriais, promovendo inovação em diversas frentes, como redução de custos, aumento de produtividade e sustentabilidade.

Além disso, a flexibilidade dessa estrutura tecnológica a torna uma base modeladora para inovações futuras. O Gêmeo Digital tem sido um catalisador de melhorias significativas, influenciando o desenvolvimento de novas soluções que moldarão o futuro da indústria (MUSSOMELI, 2018). A capacidade de se adaptar a diferentes demandas e contextos reforça sua importância estratégica como pilar fundamental da transformação digital na era da Indústria 4.0.

No capítulo 4, apresentaremos os materiais e métodos empregados que foram as bases norteadores de nossa pesquisa.

CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS

4 INTRODUÇÃO

O estudo adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, com ênfase na revisão de literatura, buscando proporcionar uma compreensão aprofundada das aplicações da tecnologia de gêmeos digitais. A escolha da abordagem qualitativa permite explorar as interpretações, contextos e significados atribuídos a essa tecnologia, investigando como ela é percebida e empregada enquanto que a quantidade para a modelagem através dos dados (PRODANOV. FREITAS, 2013), afim de gerar a gêmea digital.

A pesquisa qualitativa, de acordo com Asinelli-Luz (2000), caracteriza-se como formativa, voltada para compreender atitudes, crenças e motivações que envolvem o tema, com o objetivo de responder ao "porquê" dos problemas identificados. Essa abordagem não só aprofunda o conhecimento sobre o fenômeno estudado, mas também auxilia na identificação de fatores que influenciam sua adoção e suas implicações práticas.

4.1 PROPOSTA DA PESQUISA

A proposta desta pesquisa é apresentar uma gêmea digital de uma lâmpada LED, cuja imagem será processada através do unity, integrada a um sistema físico controlado por um microcontrolador Arduíno Nano. O Gêmeo Digital da lâmpada LED será visualizado em uma interface no computador, permitindo a interação do usuário com o sistema virtual e físico simultaneamente.

Abaixo está um diagrama que representa a proposta da pesquisa:

Figura 5 - Desenho da proposta



Fonte: Adaptado próprio autor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição do Fluxo da Proposta

1. Sistema Físico (Lâmpada LED):

Representa a lâmpada LED real, que será controlada e monitorada pelo microcontrolador Arduino Nano.

- Equipada com sensores para medir parâmetros como intensidade luminosa, temperatura e consumo de energia.

2. Gêmeo Digital (Réplica Virtual):

- Réplica virtual da lâmpada LED, criada a partir do processamento de imagens por fotometria.
- A imagem da lâmpada é capturada e processada para refletir seu estado real, incluindo intensidade luminosa e outras métricas.

3. Interface do Usuário (Computador):

- Interface gráfica que permite ao usuário interagir com o Gêmeo Digital e o sistema físico.
- Exibe dados em tempo real, como intensidade luminosa, temperatura e consumo de energia, e permite ajustar parâmetros da lâmpada (ligar/desligar, dimmer, etc.).

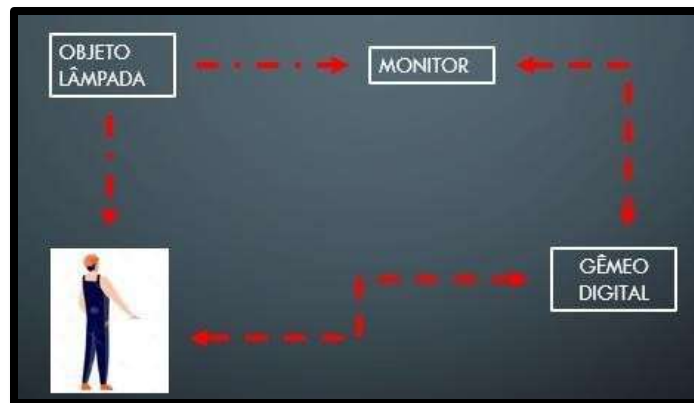
4. Sensores e Arduino Nano (Coleta de Dados):

- O Arduino Nano coleta dados dos sensores acoplados à lâmpada LED (intensidade luminosa, temperatura, etc.) e envia essas informações para o Gêmeo Digital e a interface do usuário.

4.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa bibliográfica será realizada para descrever e analisar a realidade da tecnologia de gêmeos digitais em sua essência. Conforme Noronha e Ferreira (2000), a revisão de literatura é essencial para a construção de qualquer texto científico, possibilitando uma visão consolidada do conhecimento sobre o tema. Essa revisão será orientada para sintetizar informações sobre o desenvolvimento, as aplicações práticas, os desafios e as limitações dos gêmeos digitais. Na figura 6, uma visão geral de como foi realizada o processamento da imagem. O objeto a ser utilizado, foi processado pela aquisição do objeto em tempo real, a técnica de processamento, o ambiente computacional, o retorno do objeto para manuseio, dentre outras que quiseres colocar.

Figura 6 – Processamento de transmissão



Fonte: adaptado pelo próprio autor

O fluxo descrito acima refere-se a um processo que envolve uma explicação detalhada do fluxo, integrando o uso do aplicativo com objeto, monitor, unity para o notebook.

1. Lâmpada com Abajur

Detalhes da lâmpada LED que foram utilizados como base nesse projeto:

Formato e Tipo:

A lâmpada LED tem o formato, como bulbo, pois é mais comum, que se assemelha às lâmpadas incandescentes tradicionais.

Potência:

A potência da lâmpada LED é geralmente baixa em comparação com lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, nesse caso optou-se usar uma de 5W de uso residencial.

Resistência (R):

A resistência elétrica da lâmpada LED é de 10 Ohms. Isso significa que, quando submetida a uma tensão, a lâmpada oferece uma resistência de 10 Ohms ao fluxo de corrente.

Indutância (L):

A indutância da lâmpada LED é de 0.1 Henry (H). A indutância é uma propriedade que afeta o comportamento da lâmpada em circuitos de corrente alternada (AC), podendo influenciar a resposta temporal e a estabilidade do circuito.

Resistência Térmica (Rth):

A resistência térmica da lâmpada LED é de 0.5 K/W. Isso indica a capacidade da lâmpada de dissipar calor. Quanto menor a resistência térmica, mais eficiente é a dissipação de calor, o que é crucial para a longevidade do LED.

Temperatura Ambiente (Tamb):

A temperatura ambiente considerada para operação da lâmpada é de 25°C. Essa é a temperatura do ambiente onde a lâmpada está instalada, e pode afetar a dissipação de calor e a eficiência do LED.

Taxa de Degradação (k):

A taxa de degradação da lâmpada LED é de 0.01, ao longo do tempo, a eficiência luminosa da lâmpada diminui a uma taxa de 1% por unidade de tempo. A degradação é um fator importante para determinar a vida útil da lâmpada.

As lâmpadas LED são conhecidas por sua alta eficiência energética, consumindo menos energia para produzir a mesma quantidade de luz em comparação com lâmpadas incandescentes ou fluorescentes.

Sendo assim, a vida útil de uma lâmpada LED é geralmente longa, podendo variar entre 15.000 a 50.000 horas, dependendo da qualidade do produto e das condições de operação. As lâmpadas LED podem ter diferentes temperaturas de cor, variando de luz quente (amarelada) a luz fria (branca azulada), nessa aplicação optou-se em usar a luz fria.

A partir das imagens processadas, o Unity identifica pontos de interesse entre os frames, permitindo estimar a pose da câmera e alinhar as imagens em um sistema de coordenadas 3D. Esse passo, chamado de Structure from Motion (SfM), gera uma nuvem de pontos inicial, representando as características detectadas em 3D. Com base nessa nuvem, o software cria uma malha 3D mais detalhada, composta por vértices e faces que definem a superfície do modelo.

Por fim, texturas extraídas das imagens originais são aplicadas à malha para conferir realismo ao modelo. Após o refinamento, que corrige imperfeições como buracos ou distorções, o modelo pode ser exportado em formatos compatíveis com diferentes aplicações, como impressão 3D, visualização ou análise. O Unity automatiza essas etapas, permitindo a criação de modelos tridimensionais precisos de forma simples e eficiente.

O Unity processa as imagens capturadas e gera um modelo 3D do objeto, permitindo uma análise mais detalhada e a criação de uma representação digital precisa.

5. Monitor

Para a visualização dos modelos gerados pelo Unity, será utilizado uma taxa de atualização de 120Hz, proporcionando fluidez na rotação e manipulação dos modelos, além de um tempo de resposta de 1ms, essencial para interatividade em projetos com maior demanda gráfica. A cobertura de 99% do espectro sRGB assegura fidelidade de cores, fundamental para aplicações que exigem precisão visual.

Além disso, o monitor conta com um design ultrawide, ideal para multitarefa, permitindo visualizar ferramentas e o modelo simultaneamente, otimizando o fluxo de trabalho. Com suporte à conectividade USB-C e DisplayPort, ele também é compatível com dispositivos modernos e possibilita integração com tecnologias de realidade aumentada (AR) e realidade virtual (VR), facilitando a visualização e manipulação de modelos tridimensionais em ambientes imersivos.

5. Gêmeos Digitais

Para obter o gêmeo digital utilizando o aplicativo Unity, primeiramente, será realizada a captura das informações do objeto via porta serial para o reconhecimento de pontos comuns do objeto.

Após a captura, as imagens serão carregadas no Unity, onde o aplicativo utilizará algoritmos para processar. O software identificará pontos de correspondência entre as imagens, estimará a posição e orientação da câmera, e reconstruirá a nuvem de pontos 3D. Em seguida, será gerada uma malha tridimensional detalhada, que será texturizada com base nas imagens originais. Após o refinamento automático da malha e das texturas, o modelo final será exportado em formatos compatíveis com ferramentas de visualização e análise, integrando-se ao ambiente digital para simulações como parte do conceito de gêmeo digital.

Resumo do Fluxo

Análise de Dados: As imagens são analisadas para medir a intensidade da luz e outras características relevantes.

Criação de Modelo 3D: Com base nas imagens capturadas, um modelo 3D do objeto é gerado, permitindo uma representação digital precisa.

Monitoramento e Controle: O modelo 3D pode ser usado para monitorar e controlar o objeto em tempo real, integrando-se com sistemas de hardware como a Arduíno Nano para controle bidirecional.

Integração com Arduíno Nano

Controle Bidirecional: A Arduíno Nano é usada para controlar fisicamente a lâmpada e monitorar sensores, enquanto o modelo 3D permite o controle virtual. A comunicação bidirecional entre o modelo 3D e a Arduíno Nano é feita via porta serial.

O código utilizado configurar a Arduíno Nano para comunicação serial, permitindo o controle da lâmpada e o envio de dados de sensores para o modelo 3D.

Visualização e Interação

Interface 3D: O modelo 3D é visualizado e interagido em uma interface desktop, utilizando Unity.

Atualização em Tempo Real: Os dados recebidos da Arduíno Nano são usados para atualizar o modelo 3D em tempo real, refletindo o estado atual da lâmpada e as medições dos sensores.

Hardware: Arduíno Nano, sensores (como o ACS712 para corrente), botões e LEDs.

Implementação em Unity

Renderização 3D: O código Unity ao modelo 3D da lâmpada e interagir com a Arduíno Nano.

Exibição de Dados: Os dados recebidos da Arduíno Nano são exibidos na interface 3D, permitindo o monitoramento em tempo real da corrente, tensão, potência e tempo de vida da lâmpada.

Dessa forma, o trabalho será realizado em etapas estruturadas, que incluem desde a concepção do sistema físico e virtual até a validação e análise dos resultados. Como descrito anteriormente, a metodologia adotada combina desenvolvimento técnico, integração de tecnologias, lembrando que todas as características técnicas do componentes listadas a abaixo estão descritas na seção de métodos e ferramentas, e os testes práticos vão para garantir a eficácia do Gêmeo Digital da lâmpada LED. Abaixo, as etapas principais do trabalho:

1. Definição do Sistema Físico

Seleção da Lâmpada LED:

Escolha-se uma lâmpada LED com características adequadas para o experimento, como controle de intensidade (dimmer).

Integração com Arduíno Nano:

O microcontrolador Arduíno Nano será utilizado para controlar a lâmpada e coletar dados dos sensores acoplados. As descrições técnicas estão expostas na seção métodos e materiais, o código ilustrado no Apêndice A.

Instalação de Sensores:

Sensores de corrente serão posicionados para capturar o input de sinais, enquanto sensores de corrente elétrica monitorarão outros parâmetros físicos.

2. Desenvolvimento do Gêmeo Digital

Captura de Imagens

Para reconstruir um modelo 3D preciso da lâmpada LED, é necessário capturar. Em nosso todo esse processo será realizado via scrip utilizando a comunicação serial.

A comunicação serial é um método de transferência de dados entre dispositivos eletrônicos, bit a bit, em sequência, através de um cabo físico (USB, por exemplo).

Essa comunicação segue padrões como:

Baud Rate (Taxa de Transmissão): velocidade em bits por segundo (ex.: 9600 bps).

Protocolo ASCII ou Binário: formato da informação transmitida.

Porta COM: canal lógico que identifica o dispositivo conectado ao computador.

No nosso caso, o Unity usa a porta serial para trocar informações com um microcontrolador.

Utilize o aplicativo Unity para processar as imagens e exportar o modelo 3D em formatos como OBJ ou GLB.

3. Processamento e Exportação

Após capturar as imagens, utiliza-se o aplicativo Unity para alinhar as fotos, gerar o modelo 3D e exportá-lo nos formatos desejados (OBJ ou GLB).

Dessa maneira o modelo 3D gerado garante que todas as partes da lâmpada LED foram reconstruídas com precisão.

Criação do GÊMEO DIGITAL

Com base nos dados obtidos pelo script via comunicação serial, foi desenvolvida uma réplica virtual (DG) da lâmpada LED em um ambiente de simulação. Esse gêmeo digital refletirá em tempo real o estado do sistema físico.

Integração de Dados:

Os dados coletados pelo Arduíno Nano serão integrados ao Gêmeo Digital, garantindo que a réplica virtual seja uma representação precisa do sistema físico, o resultado pode ser observado na seção simulação.

Desenvolvimento da Interface do Usuário

Criação da Interface Gráfica:

Uma interface gráfica será desenvolvida para visualização e interação com o Gêmeo Digital. A interface será programada em uma plataforma compatível com o Arduíno Nano.

Funcionalidades da Interface:

A interface permitirá ao usuário:

Visualizar parâmetros em tempo real (intensidade luminosa e consumo de energia).

Controlar a lâmpada (ligar/desligar, ajustar intensidade).

Simular cenários de falha ou variações de desempenho.

Conectividade:

A interface será conectada ao Arduino Nano via serial, permitindo a comunicação em tempo real entre o sistema físico e o Gêmeo Digital.

O protocolo de comunicação utilizado para integrar com as Arduino Nano no código fornecido, permite comunicação bidirecional em tempo real entre clientes (neste caso, o navegador) e servidores.

4.3.1. Modelo Matemático da Representação da Digital Twins através da Representação de funções de transferência no espaço de estados

Para representar a dinâmica de um Gêmeo Digital através de uma lâmpada com abajur, utiliza-se o **modelo de espaço de estados**, uma abordagem matemática amplamente aplicada em engenharia de controle e sistemas dinâmicos. Essa teoria, descrita por Katsuhiko Ogata em "*Engenharia de Controle Moderno*" (5ª edição, 2010), permite descrever o comportamento de sistemas físicos de forma sistemática, capturando suas variáveis internas (estados), entradas (controláveis) e saídas (observáveis). No contexto de gêmeos digitais, esse modelo é ideal porque:

1. **Generaliza sistemas complexos:** Representa múltiplas variáveis interdependentes (como corrente, temperatura e degradação) em equações acopladas.
2. Permite previsão e controle: **Através das equações dinâmicas, é possível simular futuros estados do sistema sob diferentes condições.**
3. Integra dados físicos e virtuais: **Alinha sensores do mundo real (entradas) com respostas do modelo digital (saídas), essencial para twins.**

O modelo é composto por duas equações principais:

4. **Equação Dinâmica de Estado:** Define como as variáveis internas (ex.: corrente, temperatura) evoluem no tempo.
5. Equação Algébrica de Saída: **Relaciona os estados com grandezas mensuráveis (ex.: luminosidade da lâmpada).**
6. A seguir, detalha-se o modelo aplicado a uma lâmpada, com as variáveis de estado propostas: corrente (x_1), temperatura (x_2) e degradação (x_3)

Modelo Dinâmico no Espaço de Estados

1. Equação Dinâmica de Estado:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

$x(t)$: Vetor de estados no instante t . Para a lâmpada, o vetor de estados é composto por:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}$$

$x_1(t)$: Corrente elétrica (I) que passa pela lâmpada. A corrente é influenciada pela tensão aplicada e pela resistência do filamento, conforme a Lei de Ohm.

$x_2(t)$: Temperatura (T) da lâmpada. A temperatura aumenta devido à dissipação de energia elétrica (efeito Joule) e diminui com a dissipação de calor para o ambiente.

$x_3(t)$: Degradação (D) da lâmpada ao longo do tempo. A degradação é causada pelo envelhecimento do material e pelo estresse térmico, que afetam a eficiência e a vida útil da lâmpada.

$\dot{x}(t)$: Derivada temporal do vetor de estados, representando a taxa de variação da corrente, temperatura e degradação ao longo do tempo.

A : Matriz de estado. Descreve como as variáveis de estado interagem entre si. Conforme Ogata [33], a matriz A é fundamental para representar a dinâmica interna do sistema. Para a lâmpada, a matriz A pode ser definida como:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

a_{11} : Efeito da corrente sobre si mesma (e.g., resistência elétrica).

a_{22} : Efeito da temperatura sobre si mesma (e.g., dissipação de calor).

a_{33} : Efeito da degradação sobre si mesma (e.g., envelhecimento do material).

Os demais elementos (a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{23} , a_{31} , a_{32}) descrevem as interações entre corrente, temperatura e degradação. Por exemplo, a_{12} pode representar o efeito da corrente sobre a temperatura (efeito Joule), e a_{23} pode representar o efeito da temperatura sobre a degradação (estresse térmico).

B : Matriz de entrada. Relaciona as entradas externas $u(t)$ com a evolução dos estados.

Para a lâmpada (GD), a matriz B pode ser definida como:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix}$$

b_{11} : Efeito da tensão aplicada sobre a corrente.

b_{21} : Efeito da tensão aplicada sobre a temperatura.

b31: Efeito da tensão aplicada sobre a degradação.

$u(t)$: Entrada do sistema no instante t . Para a lâmpada (GD), $u(t)$ pode ser a tensão elétrica (V) aplicada, que é a principal variável de controle.

Equação Algébrica de Saída:

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t)$$

$y(t)$: Vetor de saída no instante t . Para a lâmpada, $y(t)$ pode representar a luminosidade (L) emitida, que é a variável observável.

C: Matriz de saída. Relaciona os estados internos com a saída observável (luminosidade).

Para a lâmpada, a matriz C pode ser definida como:

$$C = [c11 \ c12 \ c13]$$

c11: Efeito da corrente sobre a luminosidade.

c12: Efeito da temperatura sobre a luminosidade.

c13: Efeito da degradação sobre a luminosidade.

D: Matriz de transmissão direta. Representa a influência direta da entrada $u(t)$ sobre a saída $y(t)$. Para a lâmpada, D pode ser nula ou muito pequena, indicando que a luminosidade depende principalmente dos estados internos.

Descrição dos Componentes no Contexto do Gêmeo Digital (Lâmpada)

Vetor de Estados $x(t)$:

$x1(t)$ (Corrente): A corrente elétrica que passa pela lâmpada está diretamente relacionada à tensão aplicada e à resistência do filamento, conforme a Lei de Ohm.

$x2(t)$ (Temperatura): A temperatura da lâmpada aumenta com a dissipação de energia elétrica (efeito Joule) e diminui com a dissipação de calor para o ambiente.

$x3(t)$ (Degradação): A degradação da lâmpada ocorre ao longo do tempo devido ao envelhecimento do material e ao estresse térmico, que afetam a eficiência e a vida útil da lâmpada.

Matriz de Estado A:

Descreve as interações entre corrente, temperatura e degradação. Por exemplo:

A corrente ($x1$) afeta a temperatura ($x2$) devido ao efeito Joule.

A temperatura ($x2$) afeta a degradação ($x3$) devido ao estresse térmico.

A degradação ($x3$) pode afetar a corrente ($x1$) e a temperatura ($x2$) ao alterar a resistência do filamento.

Matriz de Entrada B:

Relaciona a tensão aplicada ($u(t)$) com a corrente ($x1$), a temperatura ($x2$) e a degradação ($x3$).

Vetor de Saída $y(t)$:

Representa a luminosidade (L) da lâmpada, que depende da corrente, da temperatura e da degradação.

Matriz de Saída C:

Descreve como a corrente, a temperatura e a degradação afetam a luminosidade. Por exemplo, a luminosidade pode diminuir com o aumento da degradação.

No contexto deste trabalho, o modelo no espaço de estados será utilizado para representar a dinâmica de uma lâmpada no Gêmeo Digital. A partir desse modelo, será possível simular o comportamento da lâmpada em diferentes condições de operação, prever sua vida útil e otimizar seu desempenho. A representação no espaço de estados, conforme descrito por Ogata (2010), permite uma descrição matemática precisa do sistema, facilitando a integração de dados em tempo real e a realização de simulações complexas. Essa abordagem é particularmente útil para a análise e o controle de sistemas dinâmicos, como no caso de Gêmeos Digitais aplicados a sistemas físicos.

Muitas outras técnicas estão disponíveis para a obtenção da representação no espaço de estados de funções de transferência.

Para aplicar o modelo matemático de representação de funções de transferência no espaço de estados ao desenvolvimento de um gêmeo digital de uma lâmpada no Unity, podemos seguir os passos abaixo. Vamos integrar os conceitos de espaço de estados com o modelo físico da lâmpada.

REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA PROPOSTA

A representação visual pode ser descrita pela imagem 7, que ilustra a integração entre o mundo físico e o mundo digital, utilizando a tecnologia do Gêmeo Digital.

Figura 7 - Representação da proposta de pesquisa



Fonte: Adaptado pelo autor.

Abaixo está uma descrição do desenho e do funcionamento do sistema:

a) Mundo Físico (Lado Esquerdo do Diagrama):

Lâmpada Física: Representada por um ícone de lâmpada, conectada a um microcontrolador Arduino Nano.

Sensores e Atuadores: Sensores de luz e módulos de relé são utilizados para monitorar e controlar o estado da lâmpada.

Arduino Nano: É o Microcontrolador responsável pela comunicação entre a lâmpada física e o mundo digital.

b) Mundo Digital (Lado Direito do Diagrama):

Gêmeo Digital da Lâmpada: Representado por um modelo gráfico 3D de uma lâmpada em um ambiente virtual.

Interface de Controle: Uma interface gráfica permite ao usuário interagir com o Gêmeo Digital, enviando comandos e visualizando o estado da lâmpada em tempo real.

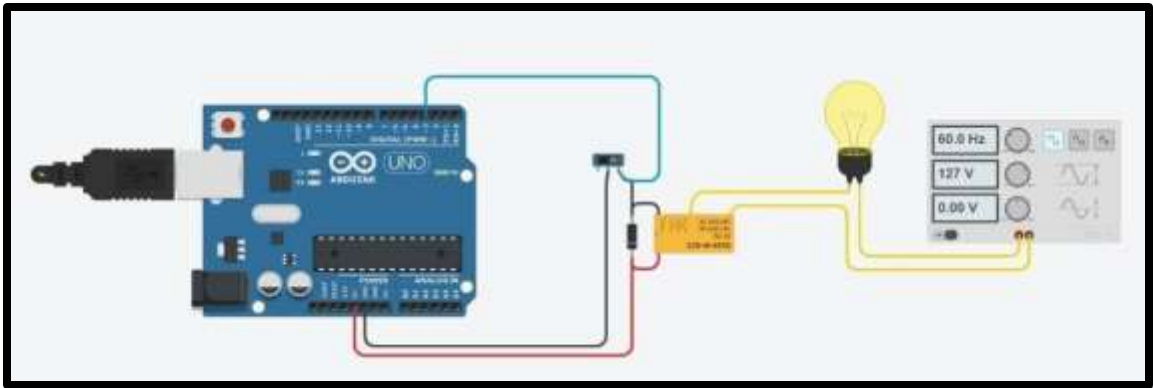
c) Comunicação (Centro do Diagrama):

Conexão Bidirecional: Representada por setas duplas que conectam o mundo físico ao mundo digital, indicando a sincronização em tempo real.

d) Diagrama de Conexão

O diagrama simplificado para auxiliar na montagem:

Figura 8 - Diagrama de circuito



Fonte: Adaptada pelo próprio autor.

d) Descrição do Funcionamento:

Inicialização: O sistema começa com a lâmpada física e seu Gêmeo Digital em estados sincronizados. O Arduino Nano coleta dados dos sensores e envia informações para o Gêmeo Digital via serial.

Monitoramento: O estado da lâmpada física (ligada/desligada, intensidade da luz) é refletido instantaneamente no Gêmeo Digital. O usuário pode visualizar o estado atual da lâmpada através da interface gráfica.

Controle: O usuário pode enviar comandos através da interface digital para alterar o estado da lâmpada física. Por exemplo, ao ligar a lâmpada no Gêmeo Digital, o comando é enviado ao Arduino Nano, que aciona o relé para ligar a lâmpada física.

Simulação: O Gêmeo Digital permite simular diferentes cenários, como variações de intensidade de luz ou padrões de iluminação (HOCHHALTER et al, 2014), que podem ser aplicados à lâmpada física.

Sincronização: Qualquer alteração no mundo físico (como um sensor detectar mudanças na luz ambiente) ou no mundo digital (como um comando do usuário) é refletida instantaneamente no outro lado, garantindo uma sincronização perfeita.

Este sistema demonstra a aplicação prática da tecnologia do Gêmeo Digital, integrando hardware e software para criar soluções inteligentes e eficientes no controle de iluminação.

4.3.2. Materiais Utilizados – Gêmeos Digitais

Tabela 1- Lista de materiais

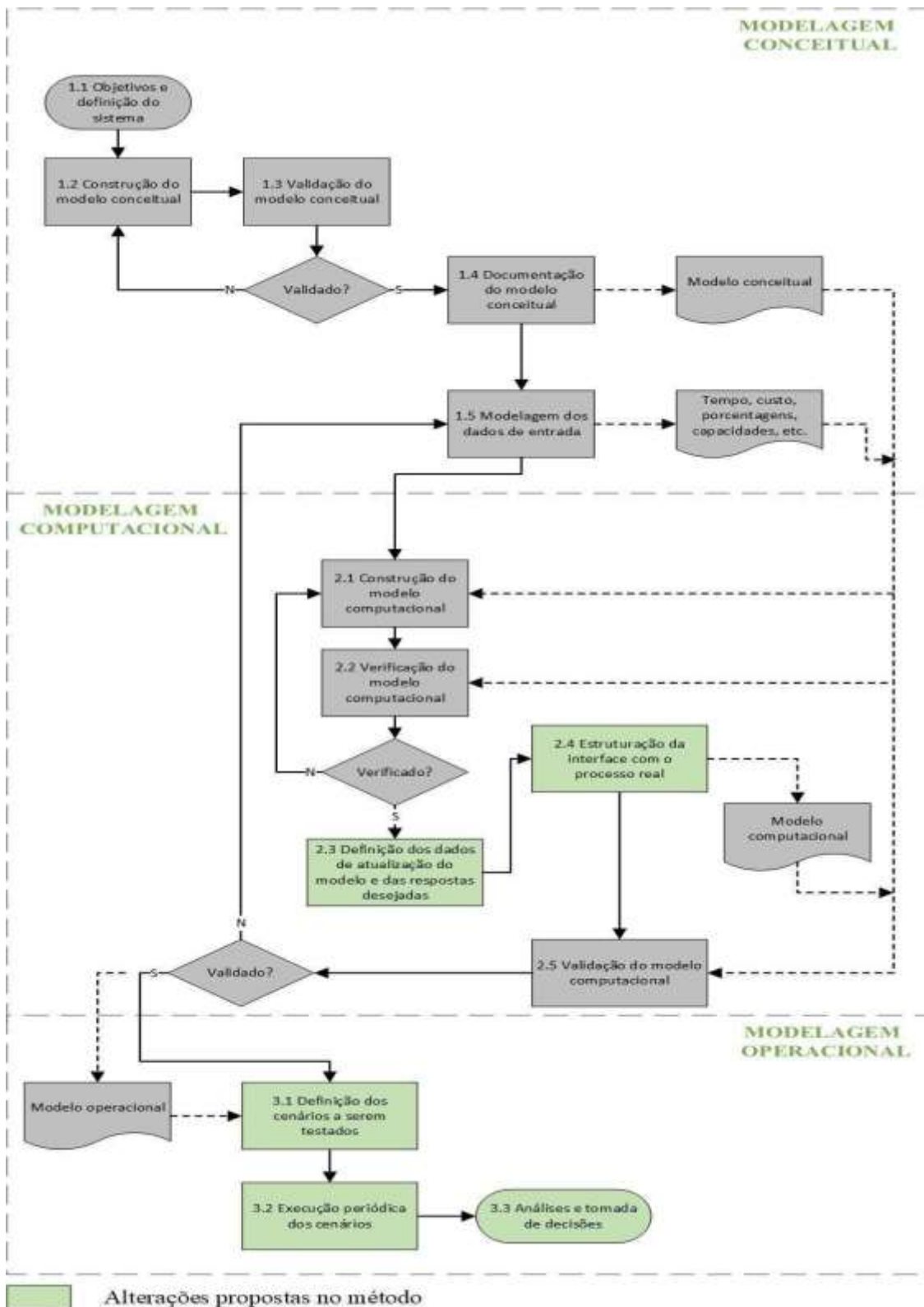
		
<p>Aplicação no CKT Sensor de Corrente (ACS712): Entrada de alta corrente Saida analógica</p>	<p>Aplicação no CKT Botão de (Liga/Desliga)</p>	<p>Aplicação no CKT Arduino Nano</p>
		
<p>Lâmpada led Philips LED 9W</p>	<p>Book Galaxy 3 360 (i5, 16GB RAM)</p>	<p>Relé 24v Single Srd-24vdc-sl-c 5 Pinos</p>
		
<p>Ferro de solda</p>	<p>Estanho para Solda em Tubo 4 metros S-10 Western</p>	<p>Jumperes e Conexões</p>
		
<p>Tampa</p>	<p>Suporte</p>	<p>Filamento Pla Basic 3dfila Impressão 3d 1,75mm 1kg Preto</p>

4.4 Simulações e Desenvolvimento de Modelo Gêmeos Digitais

Nesta seção ao criar um modelo de gêmeos digitais de uma lâmpada que envolve a simulação de seus aspectos físicos e operacionais. Esse modelo pode incluir variáveis

como corrente, temperatura, degradação. A seguir na figura 9, descreva-se a proposta de condução de simulação.

Figura 9 - Proposta de condução de projetos de simulação



Fonte: Adaptado de Montevechi et al., (2010).

Dentro do contexto da proposta de condução de projetos de simulação de Gêmeos Digitais através de uma lâmpada, se faz necessário a criação de um modelo virtual dinâmico que replica o comportamento físico da lâmpada em tempo real. Essa abordagem permite a análise, monitoramento e otimização do sistema físico (a lâmpada) por meio de seu equivalente digital. A seguir, detalhamos os principais aspectos dessa proposta, considerando a modelagem operacional e computacional, bem como as alterações propostas no método.

SIMULAÇÃO

A simulação do modelo propõe a implementação de um Digital Twin (Gêmeo Digital), integrando um dispositivo físico a uma réplica virtual desenvolvida no Unity. O sistema permitirá interação bidirecional em tempo real, possibilitando o controle remoto.

Processo de Modelagem e Validação Utilizando Ferramentas Digitais

A modelagem do suporte para lâmpada foi desenvolvida no software Autodesk Inventor, empregando técnicas de design paramétrico para garantir precisão dimensional e funcionalidade estrutural. A Figura 10 ilustra o modelo finalizado, que integra componentes como base de fixação, braço articulado e conectores, otimizados para compatibilidade com lâmpadas LED.

Figura 10 - Suporte de lâmpada



Fonte: Próprio autor.

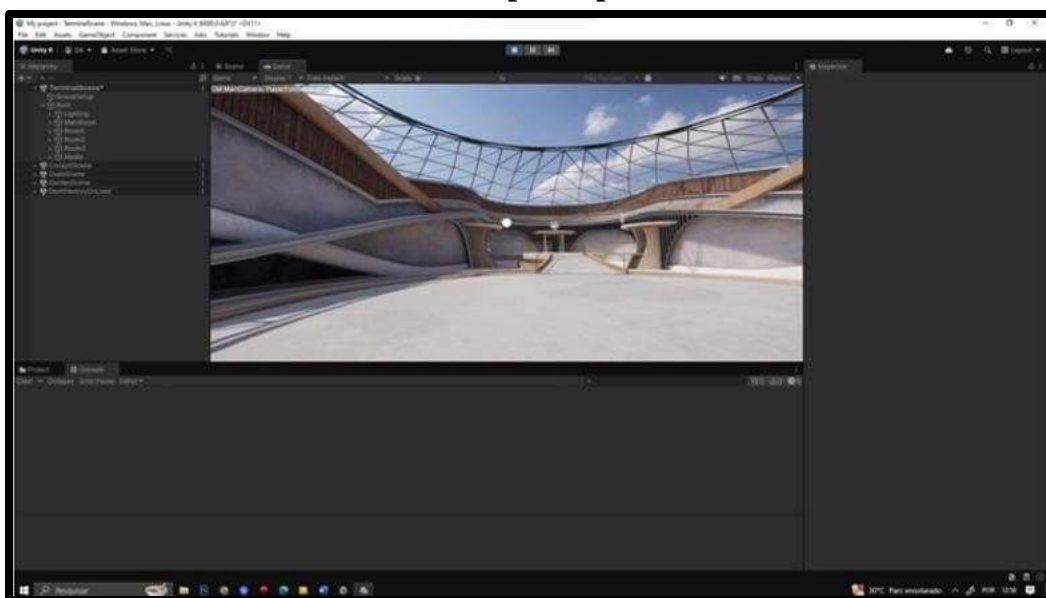
Posteriormente, o arquivo 3D foi submetido à pré-visualização de impressão no próprio software, permitindo ajustes de orientação e suportes para evitar falhas durante a manufatura aditiva. O processo de impressão 3D foi executado em uma impressora de fusão de filamento (FFF), utilizando polímero PLA, selecionado por sua resistência térmica moderada e facilidade de pós-processamento.

Figura 11 - Lâmpada com abajur em ambiente 3D
Fonte: Adaptado pelo autor.



Para validação funcional, o protótipo físico foi integrado a um ambiente de Gêmeo Digital (Digital Twin) desenvolvido no Unity. A Figura 11 demonstra o teste inicial, com a lâmpada em estado desligado (a esquerda da imagem), onde sensores virtuais monitoravam parâmetros como consumo energético e estabilidade térmica. Ao acionar o sistema por meio de um botão virtual, a lâmpada foi ativada (a direita da imagem), confirmando a sincronização bidirecional entre o modelo físico e sua réplica digital, além da resposta adequada aos comandos de controle.

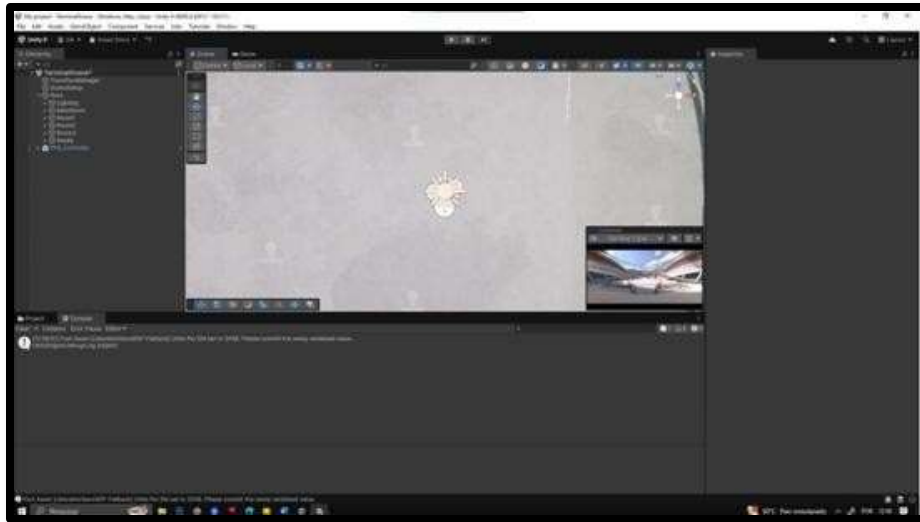
Figura 12- Tela principal Unity
Fonte: Adaptado pelo autor.



Quanto ao ambiente virtual, a configuração inicial no Unity (Figura 12) partiu de uma cena padrão, contendo elementos básicos como câmera principal e iluminação ambiente.

Figura 13 - Ambiente de renderização

Fonte: Adaptado pelo autor.



A etapa final (Figura 13) exibe a renderização completa do cenário, com texturas realistas, sombras dinâmicas e efeitos de pós-processamento, criando uma representação fiel do espaço físico para simulações iterativas.

Este fluxo de trabalho combinou ferramentas de CAD, manufatura aditiva e desenvolvimento de ambientes virtuais, destacando a eficácia da integração entre modelagem física e digital para validação de projetos técnicos.

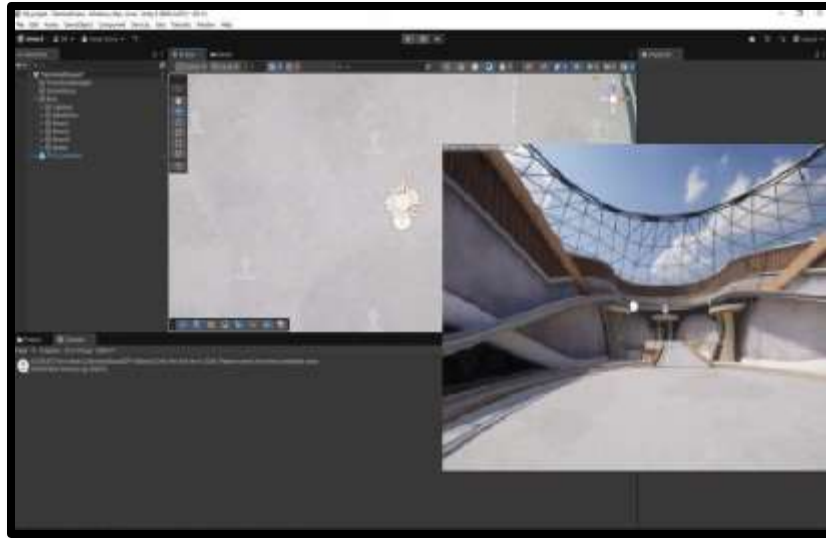
Passo a Passo da Configuração do Hardware

O processo inicia com a montagem do circuito, utilizando um Arduino Nano, sensor de corrente ACS712, interruptor e lâmpada LED. Em seguida, o suporte da luminária é impresso em 3D na Creality K1 Max, garantindo um design personalizado e funcional. Por fim, realiza-se a conexão segura da lâmpada em corrente alternada (AC) ao sistema, integrando todos os componentes para operação controlada via microcontrolador.

Desenvolvimento do Software

A primeira etapa consistiu na programação do Arduino para estabelecer comunicação bidirecional com o Unity via porta serial, garantindo a troca de dados entre o hardware e o ambiente virtual. Paralelamente, foi desenvolvida no Unity uma interface interativa que simula fielmente o comportamento da luminária, incluindo recursos de acionamento, ajuste de intensidade e feedback visual em tempo real. Na figura 14, pode-se observar o ambiente de desenvolvimento do modelo GD, usando o framework Unity.

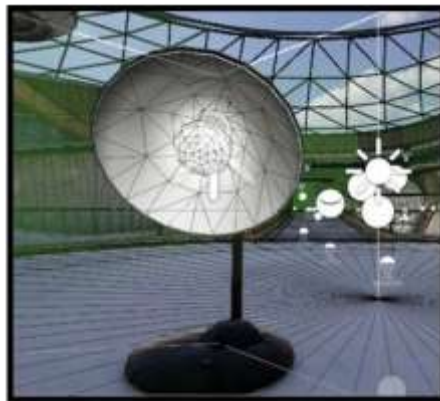
Figura 14 - Ambiente Unity.



Fonte: Adaptado pelo autor.

Em seguida, implementou-se o código de sincronização que pode ser visto na íntegra no apêndice desse estudo, esse código é responsável por manter a coerência entre os estados do dispositivo físico e do modelo digital. Na figura 15, pode-se contemplar o resultado da implementação, onde a lâmpada encontra-se no estado ligado ou desligado.

Figura 15 - Estado do modelo GD



Fonte: Adaptado pelo autor.

Por fim, realizaram-se testes iterativos para validar a comunicação, corrigir eventuais falhas e ajustar parâmetros, assegurando que a simulação responda com precisão aos comandos e aos dados do hardware.

ORÇAMENTO DO PROJETO

Tabela 2 - Investimento em materiais

Item	Marca	Modelo	Preço (R\$)
Computador	Samsung	Book Galaxy 3 360 (i5, 16GB RAM)	6.000,00
Microcontrolador	Arduino	Nano	50,00
Sensor de Corrente	Keyestudio	ACS712	30,00
Lâmpada	Philips	LED 9W	20,00
Interruptor	Margirius	Simples	10,00
Suporte 3D	-	Arquivo STL	-
Impressora 3D	Creality	K1 Max	4.500,00
Fios e conexões	Diversos	-	50,00

Fonte: Adaptado pelo autor.

O projeto contou com um investimento estratégico em equipamentos e componentes para garantir desempenho, precisão e durabilidade. A base do sistema é um computador Samsung Book Galaxy 3 360, equipado com processador i5 e 16GB de RAM, responsável pelo processamento da simulação no Unity e análise de dados em tempo real. Para o hardware, optou-se pelo Arduino Nano, um microcontrolador versátil e de baixo custo, integrado ao sensor de corrente Keyestudio ACS712, que monitora o consumo energético da lâmpada Philips LED 9W. O controle físico foi simplificado com um interruptor Margirius e complementado por fios e conexões para garantir segurança e estabilidade nas ligações.

A estrutura física da luminária foi personalizada por meio de impressão 3D, utilizando a impressora Creality K1 Max e um arquivo STL desenvolvido sob medida. Essa abordagem permitiu a criação de um suporte adaptável às necessidades do projeto, sem custos adicionais com moldes ou peças prontas. O investimento total em materiais somou R\$ 6.660,00, os valores discriminados estão presentes na tabela 2, vale ressaltar que foi priorizado componentes de qualidade para garantir precisão na comunicação entre o Gêmeo Digital e o dispositivo real. A combinação desses recursos viabilizou não apenas a automação, mas também a coleta de dados para análises preditivas e otimizações futuras.

Softwares Utilizados no Projeto

A especificação detalhada das versões dos softwares empregados no projeto é fundamental por diversos motivos **estratégicos e técnicos**:

Reprodutibilidade do Projeto: A indicação precisa das versões (como Unity 2022.3.5f1 e Arduino IDE 2.1.0) garante que outros desenvolvedores ou equipes possam replicar o ambiente de desenvolvimento exato, evitando incompatibilidades de bibliotecas, APIs ou funcionalidades específicas. Isso é crítico para manutenções futuras ou escalabilidade do sistema.

Compatibilidade e Estabilidade: Softwares como o Autodesk Inventor (para modelagem 3D) e o Creality Print (para fatiamento de impressão 3D) possuem atualizações frequentes que podem alterar fluxos de trabalho ou formatos de arquivo. A documentação da versão utilizada assegura que todos os componentes do projeto — do modelo digital à peça física — mantenham coerência técnica.

Suporte e Solução de Problemas: Em caso de erros ou necessidades de depuração, conhecer as versões exatas permite buscar soluções específicas em fóruns técnicos ou documentações oficiais, economizando tempo e recursos. Por exemplo, bugs conhecidos no Arduino IDE 2.1.0 podem ser contornados com patches documentados.

Atualizações Controladas: A lista serve como base para planejar futuras migrações de versões, avaliando riscos e benefícios de novas atualizações sem comprometer o funcionamento existente.

Transparência e Profissionalismo: Documentar as ferramentas utilizadas demonstra rigor metodológico e facilita a comunicação em equipes multidisciplinares, especialmente em projetos que envolvem integração entre software (Unity), hardware (Arduino) e fabricação digital (Inventor/Creality Print).

Um exemplo Prático seria a escolha do Unity 2022.3.5f1 (versão LTS - Long-Term Support) garante suporte prolongado e atualizações de segurança, essencial para um Digital Twin que requer estabilidade.

Já o Arduino IDE 2.1.0 introduz melhorias na compilação e monitoramento serial, críticas para a comunicação bidirecional com o hardware. A descrição minuciosa das versões não é mero formalismo, mas uma prática que assegura eficiência, colaboração e longevidade do projeto.

Resumo do Capítulo IV – Materiais e Métodos

O capítulo apresenta uma abordagem qualitativa e quantitativa para estudar a tecnologia de Gêmeos Digitais, com foco na criação de uma réplica virtual de uma lâmpada LED sincronizada com um sistema físico controlado por um microcontrolador Arduino Nano. A pesquisa qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, busca entender o contexto e as aplicações da tecnologia, enquanto a abordagem quantitativa permite a modelagem matemática e a análise de dados em tempo real.

O projeto é dividido em três componentes principais:

Sistema Físico: Uma lâmpada LED equipada com sensores (intensidade luminosa, temperatura e consumo de energia), controlada pelo Arduino Nano.

Gêmeo Digital: Uma réplica virtual da lâmpada, criada a partir de processamento) e integrada a uma interface no Unity.

Interface do Usuário: Permite interação bidirecional, exibindo dados em tempo real e ajustando parâmetros como intensidade luminosa e estado da lâmpada.

A metodologia inclui:

Modelagem matemática no espaço de estados, representando variáveis como corrente, temperatura e degradação da lâmpada. A simulação no Unity para prever comportamento e vida útil do sistema.

Os resultados preliminares mostram a eficácia da comunicação entre hardware e software, com sincronização em tempo real e capacidade de simulação de cenários. O investimento em equipamentos (R\$ 6.660,00) incluiu itens como computador, impressora 3D e componentes eletrônicos, garantindo precisão e reprodutibilidade.

O capítulo demonstra a viabilidade do Gêmeo Digital para a otimização de sistemas físicos, com potencial aplicação em automação residencial e industrial. A integração de técnicas de fotometria, modelagem 3D destaca-se como inovadora para estudos futuros.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As imagens apresentadas no trabalho refletem o processo de implementação do Gêmeo Digital da lâmpada LED, desde a modelagem teórica até a integração física-virtual.

O conceito de Gêmeo Digital, apresentava inicialmente símbolos genéricos, sem vinculação explícita ao contexto industrial. Revisões incorporaram ícones específicos (como sensores e microcontroladores) e fluxos de dados bidirecionais, alinhando-a melhor aos objetivos do projeto.

Na diagramação original não destacava adequadamente a diferença entre os fluxos unidirecional e bidirecional. Dessa forma, incluso setas diferenciadas por espessura e cor, além de notas que enfatizam a interatividade do Gêmeo Digital.

Durante o Processamento da Imagem e Representação da Proposta, deparou-se com desafios técnicos durante a renderização do objeto 3D, como variações na iluminação ambiente, que geravam ruídos nas capturas. Para mitigar isso, foram realizados ajustes no posicionamento da câmera e utilizados filtros de suavização no Unity. Além disso, a integração inicial entre o Arduíno Nano e o modelo 3D apresentava latência elevada (acima de 300 ms), resolvida com a otimização do código de comunicação serial e a redução da taxa de amostragem para 5 Hz.

Dentro Ambiente Unity observou-se texturas inconsistentes no modelo 3D da lâmpada, especialmente nas áreas de sombreamento. Para garantir maior realismo, reprocessamos as malhas utilizando algoritmos de baking de luz (pré-cálculo de iluminação) e aplicamos materiais Physically Based Rendering (PBR), que simulam propriedades físicas de superfícies, como reflexão e absorção de luz.

CAPÍTULO VI

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste projeto validou a viabilidade técnica e prática da aplicação de Gêmeos Digitais em sistemas de automação simples, como uma lâmpada LED. A integração entre hardware (Arduino Nano, sensores) e software (Unity, modelos matemáticos) permitiu não apenas a sincronização em tempo real, mas também a simulação preditiva de cenários de falha e otimização energética.

Os principais desafios incluíram a calibração precisa dos sensores de corrente ACS712, que exigiu ajustes iterativos nos circuitos de condicionamento de sinal, e a compatibilização entre formatos de arquivos 3D (STL, GLB) durante a importação para o Unity. A superação dessas barreiras reforçou a importância de uma abordagem multidisciplinar, combinando conhecimentos em eletrônica, programação e modelagem computacional.

Este projeto serve como base para explorar aplicações mais complexas, consolidando os Gêmeos Digitais como pilares da transformação digital em engenharia.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramentos desta pesquisa, sugere-se prioritariamente o desenvolvimento de modelos de degradação não-lineares que incorporem variáveis ambientais como umidade e vibração, proporcionando uma representação mais precisa do envelhecimento dos LEDs. Paralelamente, recomenda-se a implementação de protocolos de comunicação híbridos para aumentar a robustez do sistema em ambientes industriais, aliado à adoção de sensores de maior precisão com técnicas avançadas de filtragem de ruído. Outro eixo importante seria a expansão da plataforma para permitir o gerenciamento inteligente de redes de iluminação em larga escala através de algoritmos de IA. Estas melhorias visam transformar o protótipo atual em uma solução industrial escalável, combinando precisão técnica com aplicabilidade prática em cenários reais.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Rockenbach Ítalo; SHWARZER, Eduarda; CLETO, Gechele Marcelo. **Gêmeos Digitais e Indústria 4.0: uma síntese de estudos de caso**. X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP, Paraná, 2020. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09232020_180901_5f6bb8056b8ca.pdf Acesso em 01 Nov. 2024.
- ANTUNES, Ricardo. *Uberização, trabalho digital e indústria 4.0*. São Paulo: Bomtempo Editorial, 2020.
- ASINELLI-LUZ, A. A. da. **Educação e prevenção ao abuso de drogas: limites e possibilidades**. Tese de doutorado. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001083003>. Acesso em: 02 Nov. 2024.
- AYANI, M.; GANEBÄCK, M.; NG, A. H. C. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*. Anais. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118302968>. Acesso em: 02 Nov. 2024.
- BEVILACQUA, M.; BOTTANI, E.; CIARAPICA, F. E.; COSTANTINO, F.; DI DONATO, L.; FERRARO, A.; MAZZUTO, G.; MONTERIÙ, A.; NARDINI, G.; ORTENZI, M.; et al. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants. *Sustainability*, v. 12, n. 3, p. 1088, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12031088>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- BOFILL, J.; ABISADO, M.; VILLAVERDE, J.; SAMPEDRO, G. A. Exploring Digital Twin-Based Fault Monitoring: Challenges and Opportunities. *Sensors*, v. 23, p. 7087, 16 ago. 2023. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s23167087.
- BOJE, Calin; GUERRIERO, Annie; KUBICKI, Sylvain; REZGUI, Yacine. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, v. 114, p. 103179, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
- CAPGEMINI RESEARCH INSTITUTE. *Mirroring reality: Digital twins in aerospace and defense*. 2023. Disponível em: <https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2023/05/Final-Web-Version-Report-Digital-Twins-in-AD.pdf>. Acesso em: 10 Nov. 2024.
- COELHO, P. M. *Rumo à Indústria 4.0*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/36992>. Acesso em: 01 Nov. 2024.
- DALENOGARE, L. S. *A Indústria 4.0 no Brasil: Um Estudo dos Benefícios Esperados e Tecnologias Habilitadoras*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/185799>. Acesso em: 01 Nov. 2024.
- DITZEL, LFS. ALEXANDRE, PF. SELEME, R. SILVA, W. de A. ZATTAR, IC (2020). Gêmeo digital na produção: Uma revisão sistemática da literatura / Gêmeo digital na fabricação: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 6 (9), 66183–66197. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-158>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

DURÃO, L. F. C. S. HAAG, Sebastian. ANDERL, Reiner. SCHÜTZER, Klaus. ZANCUL, Eduardo. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 540, p. 204–214, 2018. Disponível em: <https://dl.ifip.org/hal-02075585v1>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

ELLGASS, W. HOLT, N. SALDANA-LEMUS, H. RICHMOND, J. VATANKHAH BARENJI, A. GONZALEZ-BADILLO, G. "Um conceito de gêmeo digital para sistemas de produção." Anais do Congresso e Exposição Internacional de Engenharia Mecânica ASME 2018. Volume 2: Manufatura Avançada. Pittsburgh, Pensilvânia, EUA. 9 a 15 de novembro de 2018. V002T02A073. ASME. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-87737>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

GIMENEZ, D. M.; SANTOS, A. L. Indústria 4.0, manufatura avançada e seus impactos sobre o trabalho. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Instituto de Economia. Campinas: UNICAMP, 2019. Disponível em: <https://www.eco.unicamp.br/images/arquivos/artigos/TD/TD371.pdf>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

GRIEVES, M. W. **Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication**. Copyright© Dr. Michael W. Grieves, LLC 2014, p. 7. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication >. Acesso em: 20 set. 2024

GRIEVES, Michael; *Intelligent digital twins and the development and management of complex systems*. Digital Twin, [s.l.], v. 1, p. 1-24, mai. 2022. Disponível em: <https://digitaltwin1.org/articles/2-8>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

GURJANOV, A. V. ZAKOLDAEV, DA. SHUKALOV, AV. ZHARINOV, IO Formation principles of digital twins of Cyber-Physical Systems in the smart factories of Industry 4.0. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Anais.2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/483/1/012070>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

HOCHHALTER, Jacob D.; LESER, William P.; NEWMAN, John A.; GLAESSGEN, Edward H.; GUPTA, Vipul K.; YAMAKOV, Vesselin I.; CORNELL, Stephen R.; WILLARD, Scott A.; HEBER, Gerd. **Coupling damage-sensing particles to the digital twin concept**. 2014. p. 10. CrossRef. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140006408/downloads/20140006408.pdf>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

IVANOV, D. et al. Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility. International Series in Operations Research and Management Science, v. 276, p. 309–332, 2019.

JAENSCH, F. et al. Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning. Proceedings of the 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP 2018. Anais. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8600844>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0based manufacturing systems. Manufacturing Letters, v. 3, p. 18–23, 2015. Disponível em: DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001. Acesso em: 01 Nov. 2024.

KRITZINGER, Werner; KARNER, Matias; TRAAR, Georg; HENJES, Jan; SIHN, Wilfried. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018. ISSN 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>. Acesso em: 1 jan. 2025.

LI, Jubo. WANG, Songlin. YANG, Jianjun. ZHANG, Huijie. ZHAO, Hengbo. 2023. "A Digital Twin-Based State Monitoring Method of Gear Test Bench" Applied Sciences 13, no. 5: 3291. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13053291>. Acesso em: 11 Nov. 2024.

LIU, He. XIA, Min. WILLIAMS, Darren. SUN, Jianzhong. YAN, Hongsheng. Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. Journal of Sensors, Hindawi, v. 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6129995>. Acesso em: 10 Nov. 2024.

MARQUES, Sarah. GONÇALVES, Pedro. SOUZA, Pedro. (2021). Reflexões Sobre Gêmeos Digitais (GD) No Ambiente Construído. Revista Jatobá. 4. Disponível em: DOI: 10.5216/revjat.v4.74705. Acesso em: 03 Nov. 2024.

MAYR, A. WEIGELT, M. VON LINDENFELS, J. SEEFRIED, J. ZIEGLER, M. MAHR, A. FRANKE, J. Electric Motor Production 4.0 - Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors. 2018 8th International Electric Drives Production Conference, EDPC - Proceedings. Anais. 2018. Disponível em: <https://cris.fau.de/publications/213347246/>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

MENGNAN. Liu, S. FANG, H. DONG, C. XU, “**Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,**” J. Manuf. Syst. vol. 58, pp. 346–361, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301072?via%3Dihub>. Acesso em: 01 Nov. 2024.

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F.; OLIVEIRA, M. L. O.; SILVA, A. L. F. **Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: Na application in a Brazilian tech company.** In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Baltimore, MD: 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2010.5678908>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

MUSSOMELI, A. MEEKER, B. SHEPLEY, S. SCHATSKYM D. *Expecting digital twins.* Copyright© Deloitte Insights, publicado em: 02 mai. 2018. Disponível em: Understanding digital twin technology | Deloitte Insights. Disponível em: https://www.deloitte.com/content/dam/insights/articles/2024/3773_expecting-digital-twins/di-expecting-digital-twins.pdf. Acesso em: 02 Nov. 2024.

NAZIR, Safder. How Digital Twins Enable Intelligent Cities. 2020. Disponível em: <https://e.huawei.com/br/blogs/industries/insights/2020/how-digital-twins-enable-intelligent-cities>. Acesso em: 19 nov. 2024.

NORONHA, D. P.; FERREIRA, S. M. S. P. **Revisões de literatura.** In: CAMPELLO, B. S.; CONDÓN, B. V.s; KREMER, J. M. (Org.). *Fontes de informação para pesquisadores e profissionais* Belo Horizonte: UFMG, 2000. Disponível em: https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/197553/mod_folder/content/0/fontes_de_in

formacao_para_pesquisadores_e_profissionais_parte_001.pdf?forcedownload=1.
Acesso em: 02 Nov. 2024.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. Tradução de Heloísa Coimbra de Souza. Revisão técnica de Eduardo Aoun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. (Título original: Modern control engineering). ISBN 978-85-4301-375-6.

OLIVEIRA, Eric Sampaio de; BACCI, Silvio César Cardoso; PARIS, Lucio Rogerio Pelizer; MENEGASSI, Wladimir José Camillo; ANTUNES NETO, Joaquim M. F. Automação nos processos industriais: processo de implementação e o papel do gestor de tecnologia da informação. Prospectus, Itapira: FATEC de Itapira "Ogari de Castro Pacheco", v. 6, n. 1, p. 153-203, jan./jun. 2024. Disponível em: <https://prospectus.fatec.itapira.edu.br/index.php/pst/article/download/220/156/397>. Acesso em: 1 jan. 2025.

PEREIRA, Adriano; DE OLIVEIRA SIMONETTO, Eugênio. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 16, n. 1, 2018. Disponível em: <http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/4938>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

QUINALHA, E., Gêmeos Digitais, O Futuro da Indústria 4.0: Estudo de Caso, Universidade Tecnológica do Paraná, 2018. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/19971/2/CT_CEREC_II_2018_02.pdf. Acesso em: 01 Nov. 2024.

REDELINGHUYS, A.; BASSON, A.; KRUGER, K. A six-layer digital twin architecture for a manufacturing cell. Studies in Computational Intelligence, v. 803, p. 412–423, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-03003-2_32. Acesso: 03 Nov. 2024.

RODIC, B. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. **Organizacija**, v. 50, p. 193–207, 2017. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.1515/orga-2017-0017>. Acesso em: 01 Nov. 2024.

ROLLE, Rodrigo Pita. Arquitetura para criação de gêmeos digitais com foco na Indústria 4.0. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/183651/3/rolle_rp_me_bauru.pdf. Acesso em: 01 jan. 2025.

RÜTTIMANN, Bruno; STÖCKLI, Martin. Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A due clarification regarding the supposed clash of two production systems. Journal of Service Science and Management, v. 9, p. 485–500, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/jssm.2016.96051>. Acesso em: 4 abr. 2025.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. As revoluções industriais até a indústria 4.0. Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/386/335>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

SAMIR, Kousay; MAFFEI, Antonio; ONORI, Mauro A. Real-Time asset tracking: a starting point for Digital Twin implementation in Manufacturing. Procedia CIRP, [S.l.],

v. 81, p. 719–723, 2019. ISSN 2212-8271. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119304871>. Acesso em: 27 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.182>.

SISINNI, E. SAIFULLAH, A. HAN, S. JENNEHAG, U. GIDLUND, M. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, 2018. vol. 14, no. 11, pp. 4724-4734, nov. 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401919>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

SOUZA, João Vitor Oliveira. Simulações e gêmeos digitais na indústria 4.0: desafios e benefícios para o setor automobilístico. 2024. 38. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/7094>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

TAO, F.; CHENG, J.; QI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, H.; SUI, F. *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data*. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 3563– 3576 (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

TAO, Fei. ZHANG, He. LIU, Ang. NEE, Andrew YC. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

THAMES, J. L. SCHAEFER, D. (2017). Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges. In L. Thames, & D. Schaefer (Eds.), *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing* (1 ed., pp. 1-33). Article Chapter 1 (Springer Series in Advanced Manufacturing). Springer. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9>. Acesso em: 02 Jan. 2025.

TRAPPEY, Amy J. C.; TRAPPEY, Charles V.; GOVINDARAJAN, Usharani Hareesh; CHUANG, Allen C.; SUN, John J. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, [S.l.], v. 33, p. 208–229, 2017. ISSN 1474-0346. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034616301471>. Acesso em: 27 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.11.007>.

UHLEMANN, T. H.-J.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. Anais. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116313129?via%3Dihub>. Acesso em: 03 Nov. 2024.

URIARTE, A. G.; NG, A. H.; MORIS, M. U. Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, v. 25, p. 586–593, 2018. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1501495/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

VANDERHORN, Eric; MAHADEVAN, Sankaran. Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, v. 145, p. 113524, 2021. DOI: 10.1016/j.dss.2021.113524. Acesso em: 02 Nov. 2024.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, v. 3, p. 616–630, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

APÊNDICE A – Código para Arduino Nano

```
// Código para Arduino Nano
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
int sensorPin = A0;
int interruptor = 2;
int estadoLuz = 0;
void setup() {
    pinMode(interruptor, INPUT);
    mySerial.begin(9600);
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    estadoLuz = digitalRead(interruptor);
    int sensorValor = analogRead(sensorPin);
    Serial.println(estadoLuz);
    mySerial.println(sensorValor);
    delay(500);
}
```

APÊNDICE B – Código para Unity (C#)

```
using System.IO.Ports;
using UnityEngine;

public class LampController : MonoBehaviour {
    SerialPort serialPort = new SerialPort("COM3", 9600);
    public GameObject lamp;

    void Start() {
        serialPort.Open();
    }

    void Update() {
        if (serialPort.IsOpen) {
            string data = serialPort.ReadLine();
            if (data == "1") {
                lamp.SetActive(true);
            } else {
                lamp.SetActive(false);
            }
        }
    }
}
```

```
D:\The_Hackers> cd NewCSharpScripts && notepad %cd%\SerialLightController.cs
using System;
using System.IO.Ports;
using System.Threading;

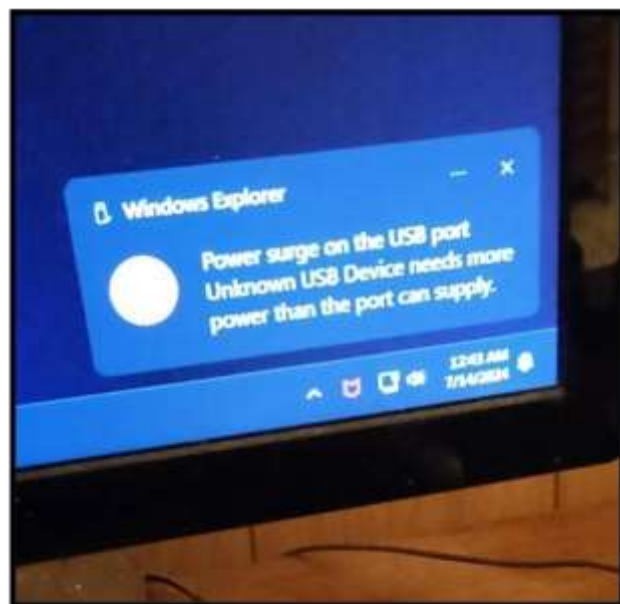
namespace SerialLightController
{
    public class SerialLightController : IDisposable
    {
        public Light Spotlights; // arrasta spotlight_spot_000 (11) ead
        public Light Spotlights; // arrasta a outra spotlight_spot_000 ead
        SerialPort serialPort = new SerialPort("COM", 9600); // nome "COM"




        public void Start()
        {
            serialPort.Open();
        }

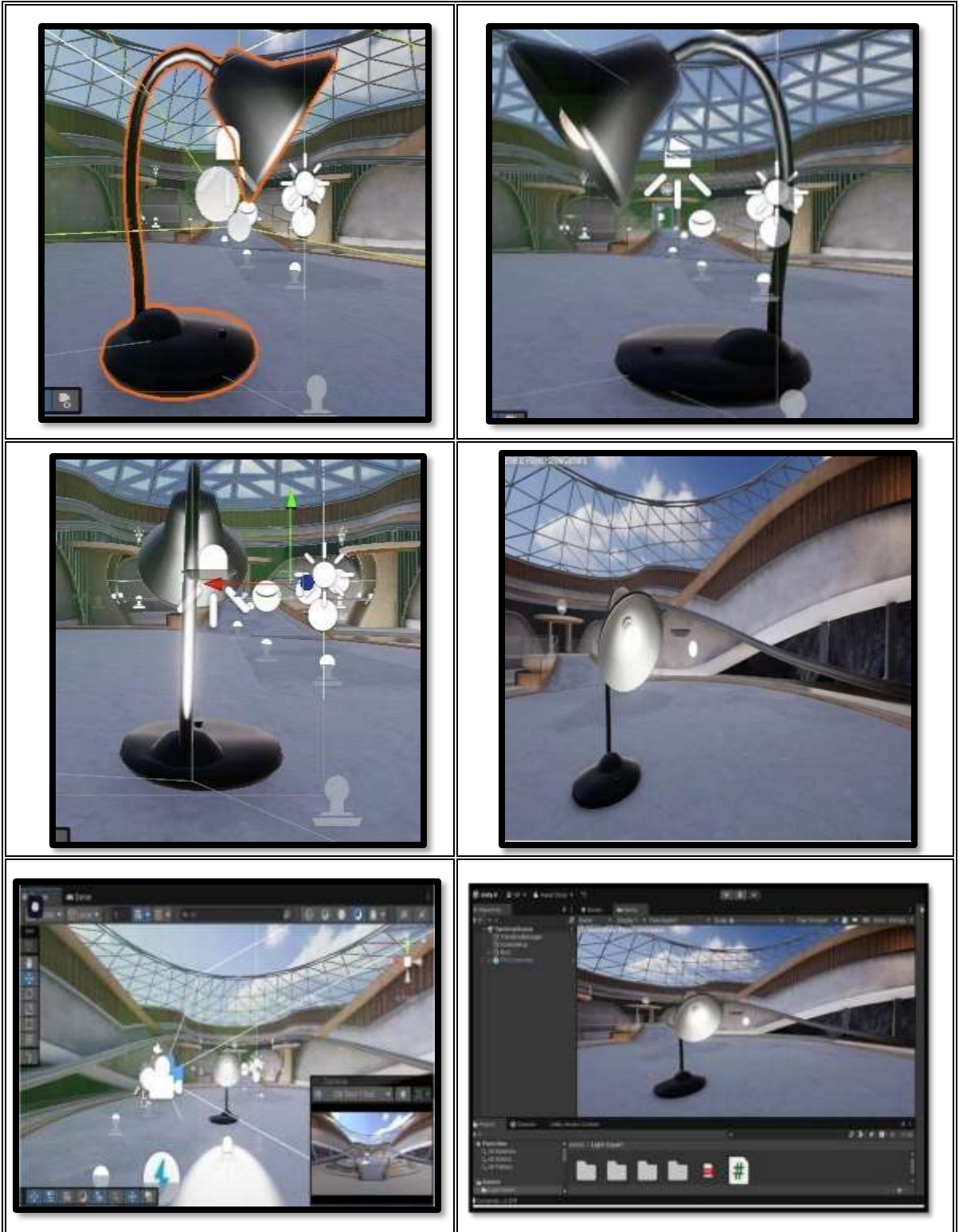
        public void Update()
        {
            if (serialPort.BytesToRead > 0)
            {
                try
                {
                    // ...
                }
            }
        }
    }
}

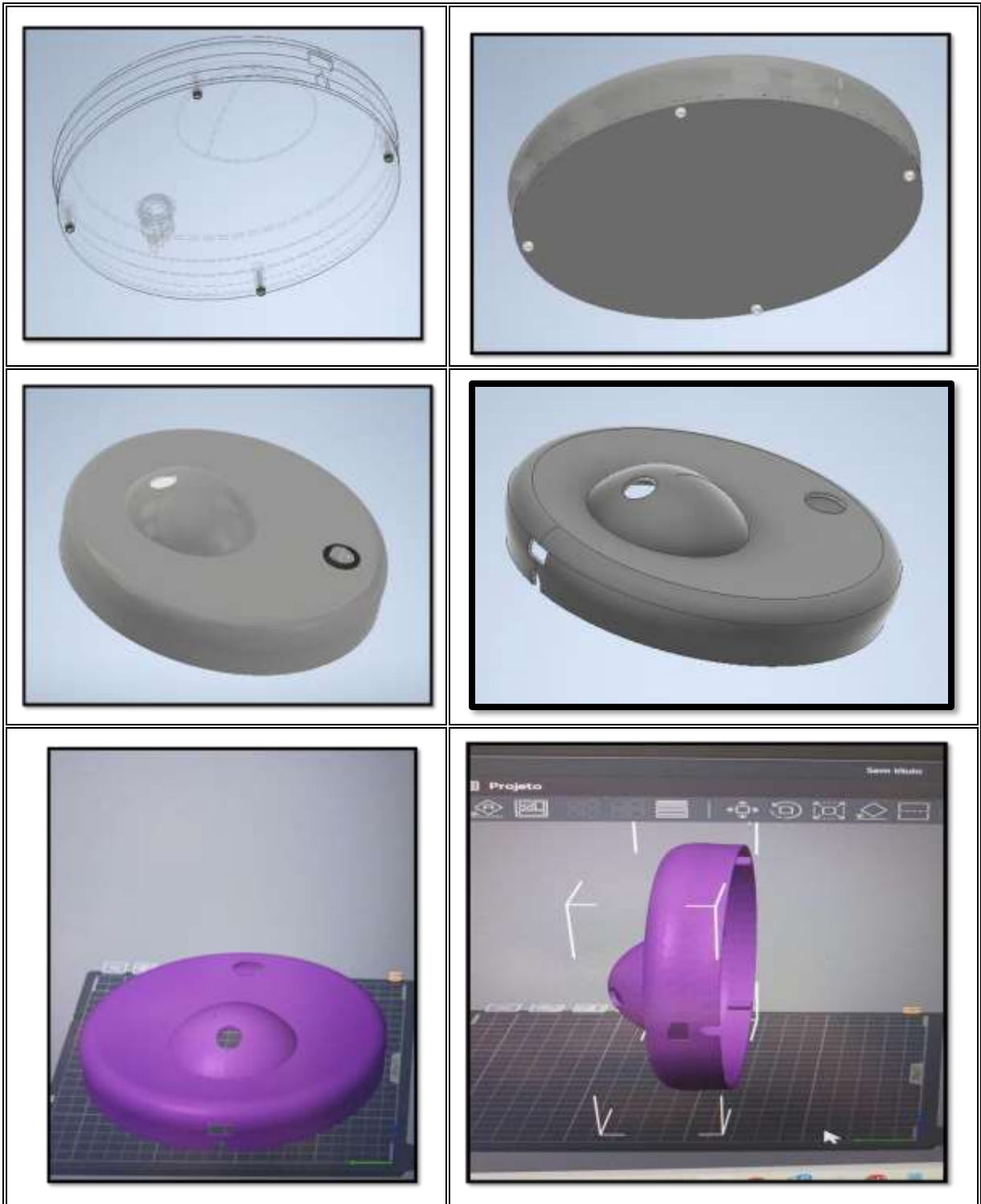
Process: SADA - console:320x100 - 10/10/2019 - 10:00:00 - 10/10/2019 - 10:00:00
visualstudioforunity.exe requested to download the .NET Runtime.
Downloading .NET version(s) 8.0.14-004 ..... Done!
.NET 8.0.14-004 executable path: c:\Users\Arvanjo\AppData\Local\Microsoft\VisualStudio\17.0\dotnet\8.0.14-004\dotnet.exe
```

APÊNDICE C – Fotos do Experimento

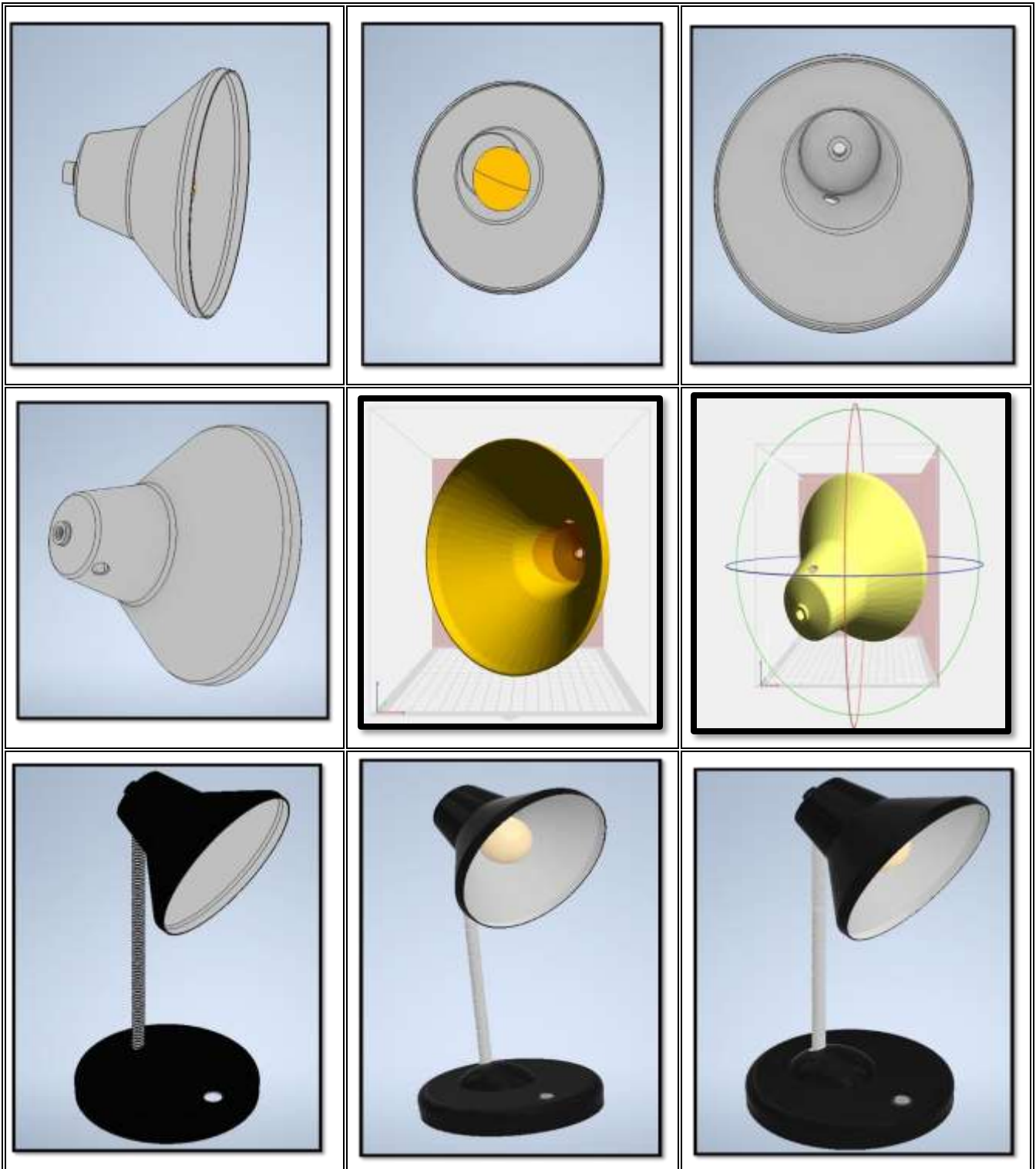


	Portas (COM e LPT)
	Serial Padrão por link Bluetooth (COM3)
	Serial Padrão por link Bluetooth (COM4)



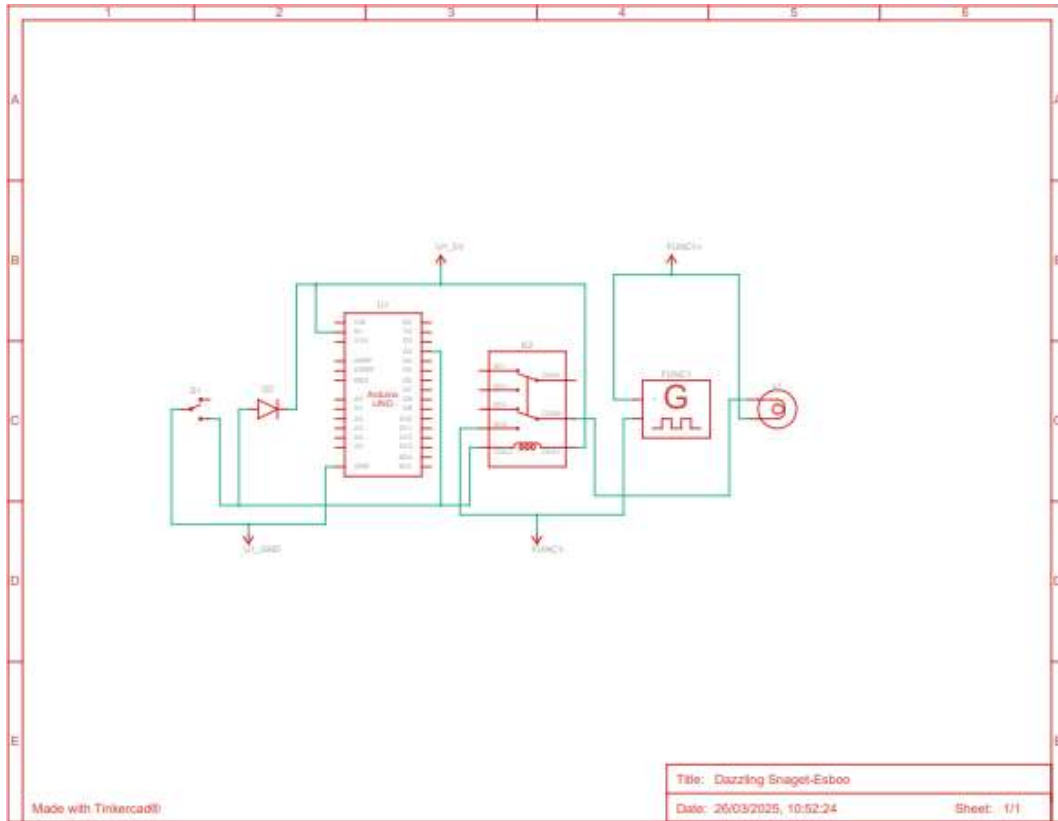


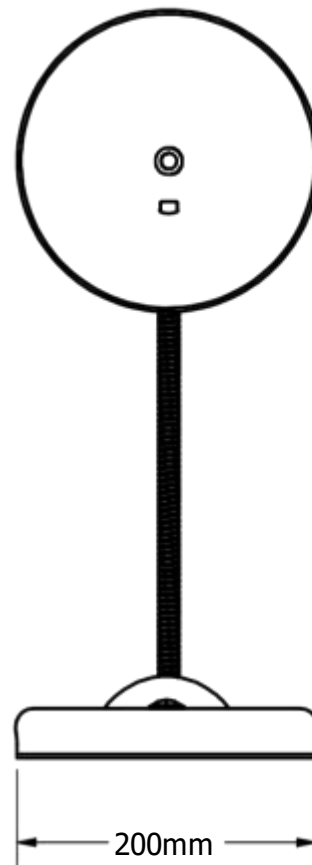
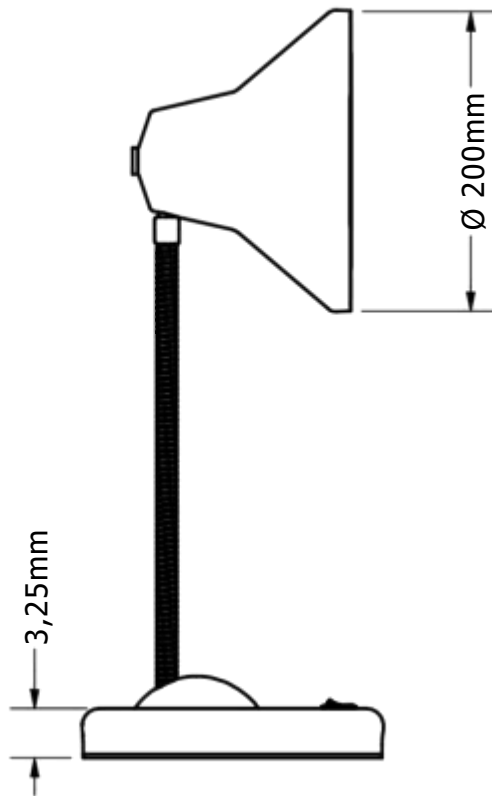






APÊNDICE D – Esquema Elétrico





INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS

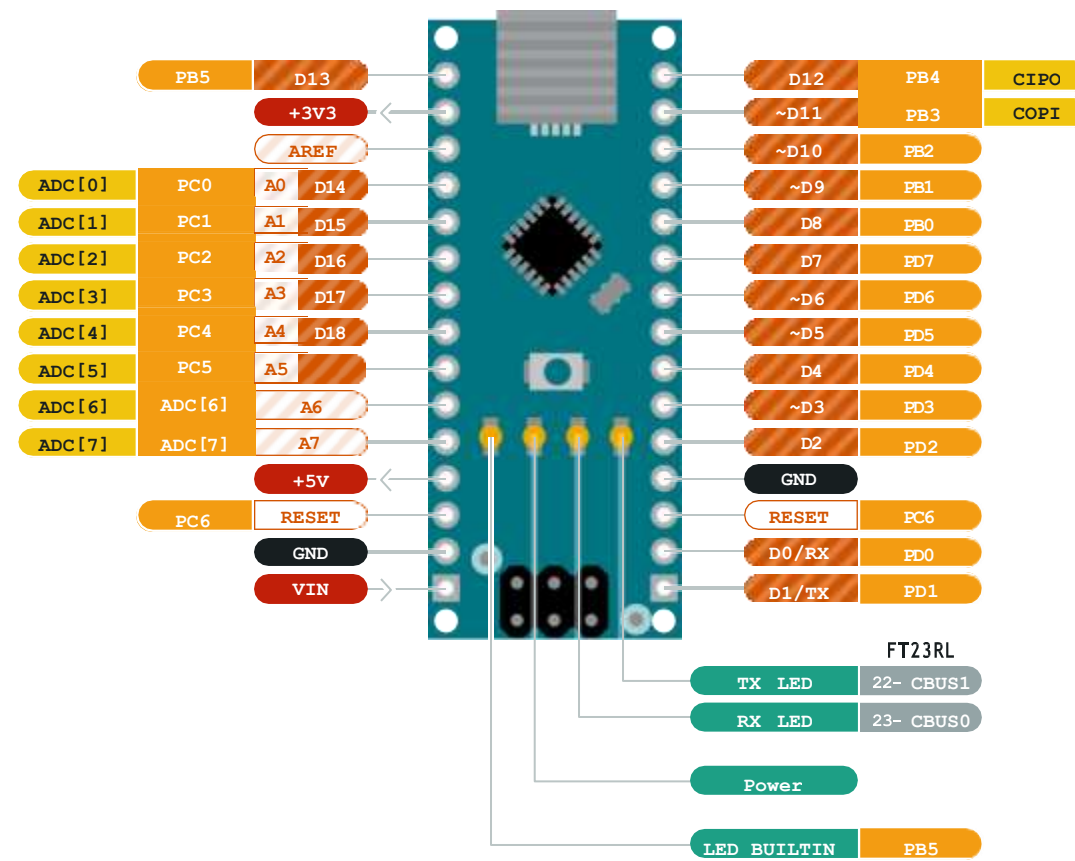
Curso: Engenharia de Controle e Automação

Aluno: Gabriel da Silva Paiva

Luminária

Escala: 1/5

Prancha: ÚNICA

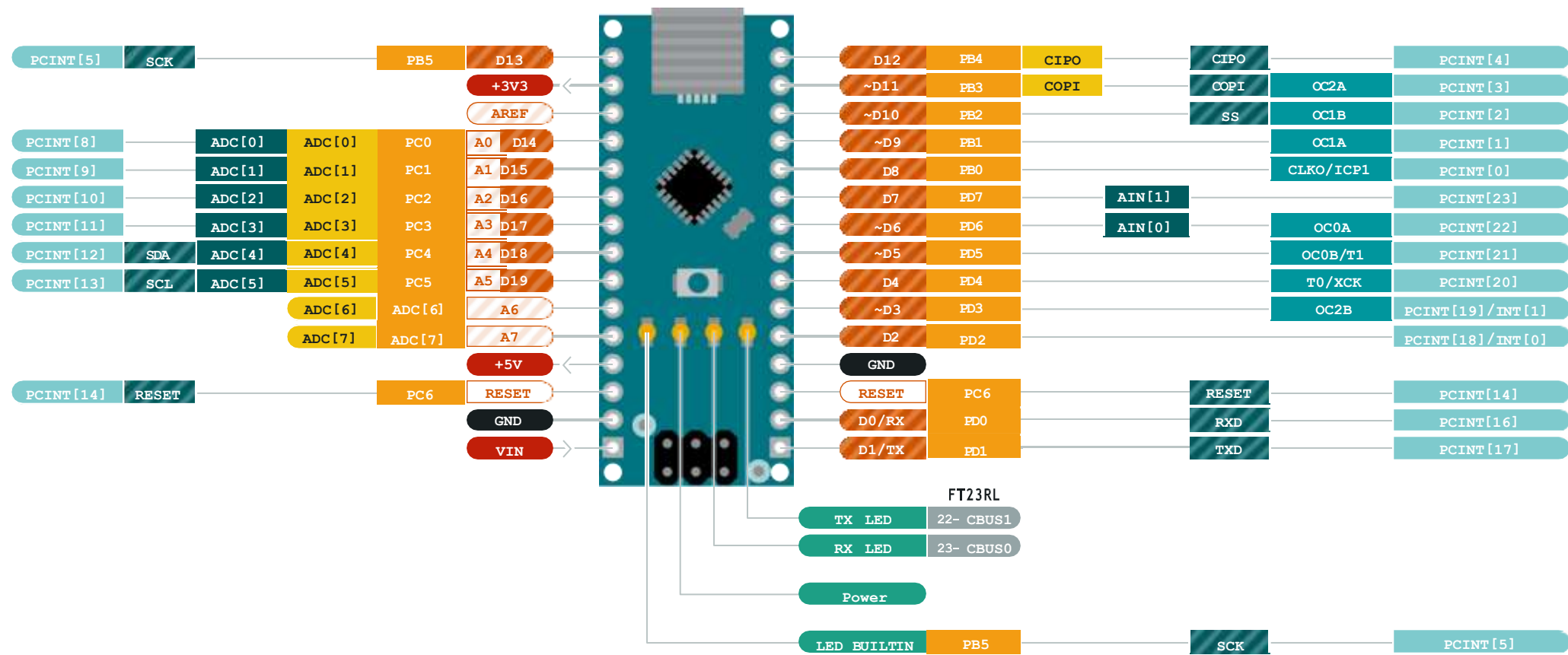


- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default

- ⚠ **MAXIMUM** current per I/O pin is 20mA
- ⚠ **MAXIMUM** current per +3.3V pin is 50mA
- ⚠ **VIN** 7-12 V input to the board.

NOTE: CIPO/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default
- Analog
- Communication
- Timer
- Interrupt
- Sercom

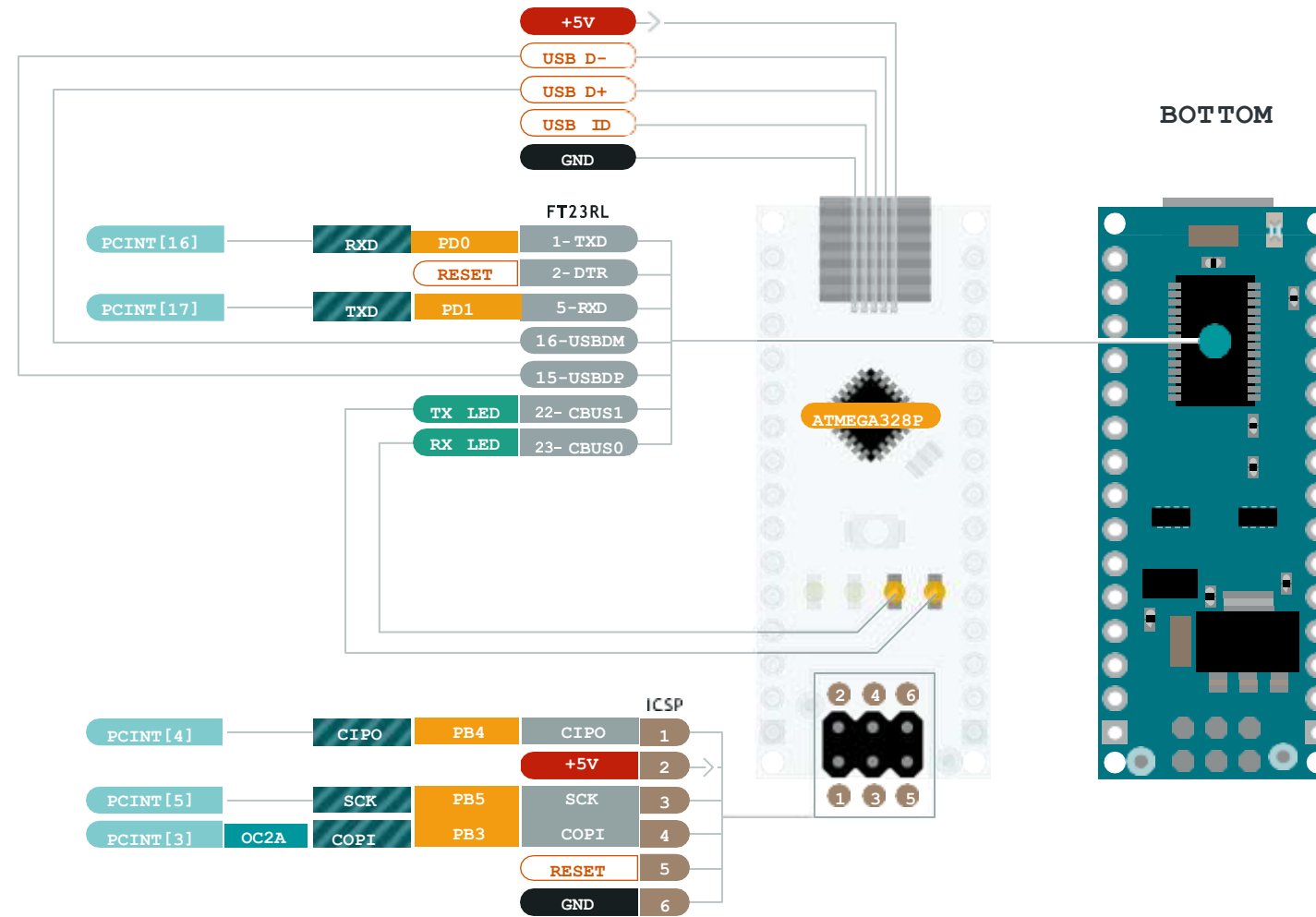
⚠️ MAXIMUM current per I/O pin is 20mA

⚠️ MAXIMUM current per +3.3V pin is 50mA

VIN 7-12 V input to the board.

NOTE: CIPO/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





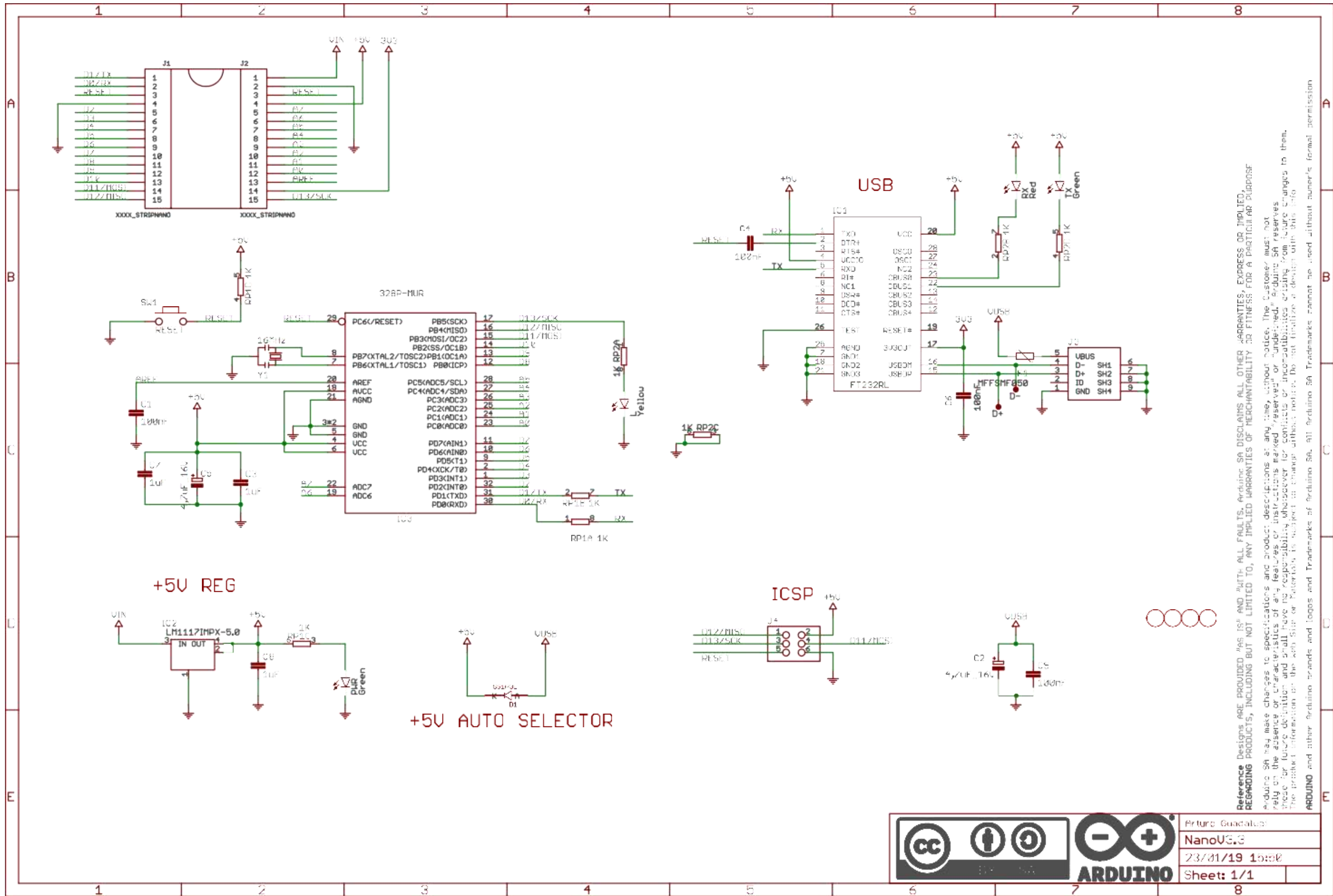
- | | | | | | | | |
|--|--------------|--|------------------------|--|------------|--|---------------|
| | Ground | | Digital Pin | | Analog Pin | | Communication |
| | Power | | Analog Pin | | Timer | | Interrupt |
| | LED | | Other Pin | | Sercom | | |
| | Internal Pin | | Microcontroller's Port | | | | |
| | SWD Pin | | Default | | | | |

- MAXIMUM** current per I/O pin is 20mA
- MAXIMUM** current per +3.3V pin is 50mA

VIN 7-12 V input to the board.

NOTE: CIPO/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino SA DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino SA may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino SA reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the web site or literature is subject to change without notice. Do not finalize a design until this info. ARDUINO and other Arduino brands and logos and Trademarks of Arduino SA. All Arduino SA Trademarks cannot be used without numeric formal permission.

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kV_{RMS} Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

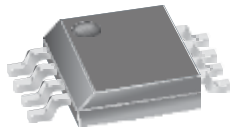
FEATURES AND BENEFITS

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A=25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC-8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.4 kV_{RMS} minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



TÜV America
Certificate Number:
U8V 15 05 54214 038
CB 13 06 54214 026

PACKAGE: 8-Lead SOIC (suffix LC)



Not to scale

DESCRIPTION

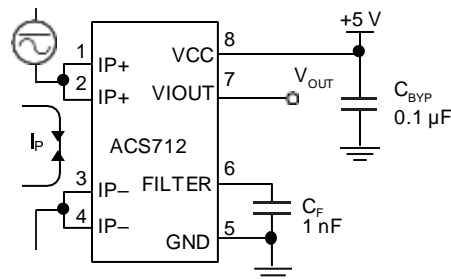
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_P , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

ACS712

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kV_{RMS} Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

DESCRIPTION (continued)

the device at up to 5× overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

SELECTION GUIDE

Part Number	Packing [1]	T _A (°C)	Current Sensing Range, I _P (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
-S VARIANT [2]				
ACS712ELCTR-20A-S	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-S	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66
-T VARIANT [3]				
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66

[1] Contact Allegro for additional packing options.

[2] -S denotes the lead-free construction with tin-silver-based solder bumps.

[3] -T denotes Pb-contained construction with Pb-based solder bumps. Operating performance of -T and -S devices are identical. -T devices are RoHS compliant using allowed exemptions provided in Annex III and IV of Directive 2011/65/EU [Exemptions 7(a), 15, 15(a), as applicable].

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V _{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Output Voltage	V _{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V _{RIOUT}		-0.1	V
Output Current Source	I _{IOUT(SOURCE)}		3	mA
Output Current Sink	I _{IOUT(SINK)}		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I _P	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T _A	Range E	-40 to 85	°C
Maximum Junction Temperature	T _{J(max)}		165	°C
Storage Temperature	T _{stg}		-65 to 170	°C

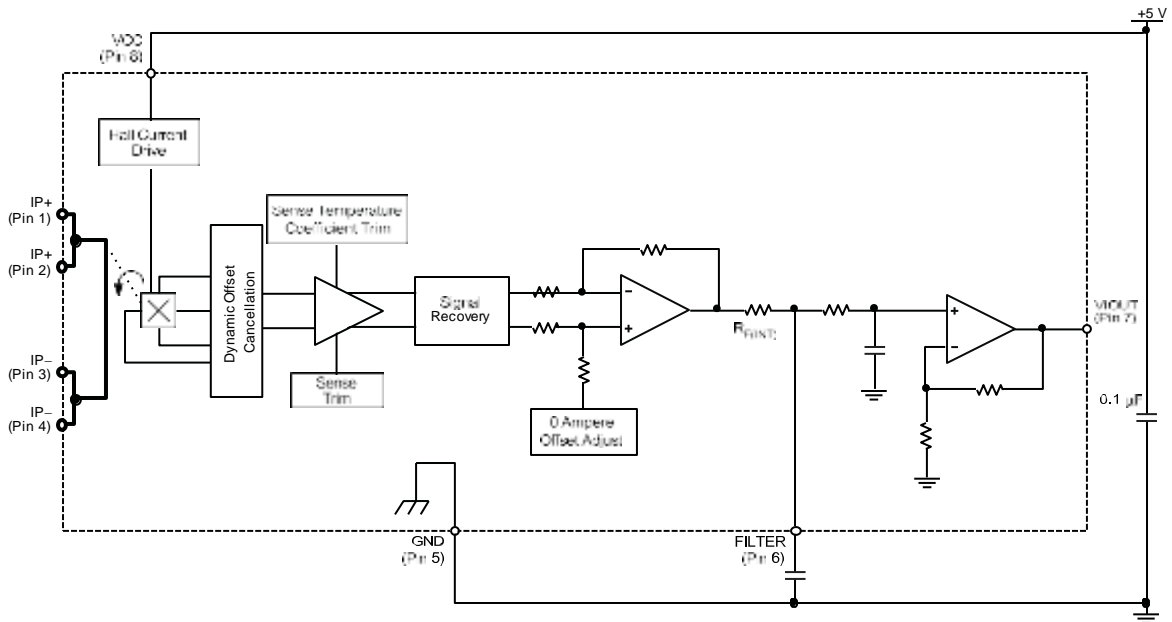
ISOLATION CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Unit
Withstand Voltage ^[1]	V _{ISO}	Agency rated for 60 seconds per UL 62368-1 (edition 3)	2400	V _{RMS}
Working Voltage for Basic Isolation	V _{WVBI}	Maximum approved working voltage for basic (single) isolation according to UL 62368-1 (edition 3)	420	V _{PK} Or V _{DC}
			297	V _{RMS}
Impulse Withstand Voltage	V _{IMPULSE}	Tested ±5 pulses at 2/minute in compliance to IEC 61000-4-5, 1.2 μs (rise)/ 50 μs (width)	4000	V _{PK}
Clearance	D _{CL}	Minimum distance through air from IP leads to signal leads.	4	mm
Creepage	D _{CR}	Minimum distance along package body from IP leads to signal leads	4	mm
Distance Through Insulation	DTI	Minimum internal distance through insulation	63	μm
Comparative Tracking Index	CTI	Material Group II	400 to 599	V

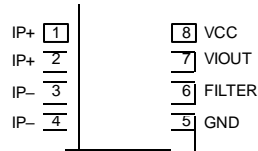
[1] 100% Production-tested for 1 second in accordance with UL 62368-1 (edition 3).

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Pinout Diagram



Terminal List

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS [1]: Over full range of T_A, C_F = 1 nF, and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V _{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I _{CC}	V _{CC} = 5.0 V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	C _{LOAD}	V _{IOUT} to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	R _{LOAD}	V _{IOUT} to GND	4.7	–	–	kΩ
Primary Conductor Resistance	R _{PRIMARY}	T _A = 25°C	–	1.2	–	mΩ
Rise Time	t _r	I _P = I _{P(max)} , T _A = 25°C, C _{OUT} = open	–	3.5	–	μs
Frequency Bandwidth	f	-3 dB, T _A = 25°C; I _P is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	E _{LIN}	Over full range of I _P	–	1.5	–	%
Symmetry	E _{SYM}	Over full range of I _P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	V _{IOUT(0)}	Bidirectional; I _P = 0 A, T _A = 25°C	–	V _{CC} × 0.5	–	V
Power-On Time	t _{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, T _J = 25°C, 20 A present on leadframe	–	35	–	μs
Magnetic Coupling [2]			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance [3]	R _{F(INT)}			1.7		kΩ

[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P, and ambient, T_A, and internal leadframe temperatures, T_A, provided that the Maximum Junction Temperature, T_{J(max)}, is not exceeded.

[2] 1G = 0.1 mT.

[3] R_{F(INT)} forms an RC circuit via the FILTER pin.

COMMON THERMAL CHARACTERISTICS [1]

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Operating Internal Leadframe Temperature	T _A	E range	-40	–	85	°C
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Value		Units	
Junction-to-Lead Thermal Resistance [2]	R _{θJL}	Mounted on the Allegro ASEK 712 evaluation board	5		°C/W	
Junction-to-Ambient Thermal Resistance	R _{θJA}	Mounted on the Allegro 85-0322 evaluation board, includes the power consumed by the board	23		°C/W	

[1] Additional thermal information is available on the Allegro website.

[2] The Allegro evaluation board has 1500 mm² of 2 oz. copper on each side, connected to pins 1 and 2, and to pins 3 and 4, with thermal vias connecting the layers. Performance values include the power consumed by the PCB. Further details on the board are available from the Frequently Asked Questions document on our website. Further information about board design and thermal performance also can be found in the Applications Information section of this datasheet.

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: T_A = -40°C to 85°C, C_F = 1 nF, and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I _P		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I _P , T _A = 25°C	180	185	190	mV/A
Noise	V _{NOISE(PP)}	Peak-to-peak, T _A = 25°C, 185 mV/A programmed Sensitivity, C _F = 47 nF, C _{OUT} = open, 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	ΔV _{OUT(Q)}	T _A = -40°C to 25°C	-	-0.26	-	mV/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.08	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	T _A = -40°C to 25°C	-	0.054	-	mV/A/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.008	-	mV/A/°C
Total Output Error [2]	E _{TOT}	I _P = ±5 A, T _A = 25°C	-	±1.5	-	%

[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P, and ambient temperatures, T_A, provided that the Maximum Junction Temperature, T_{J(max)}, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P, with I_P = 5 A. Output filtered.

x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: T_A = -40°C to 85°C, C_F = 1 nF, and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I _P		-20	-	20	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I _P , T _A = 25°C	96	100	104	mV/A
Noise	V _{NOISE(PP)}	Peak-to-peak, T _A = 25°C, 100 mV/A programmed Sensitivity, C _F = 47 nF, C _{OUT} = open, 2 kHz bandwidth	-	11	-	mV
Zero Current Output Slope	ΔV _{OUT(Q)}	T _A = -40°C to 25°C	-	-0.34	-	mV/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.07	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	T _A = -40°C to 25°C	-	0.017	-	mV/A/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.004	-	mV/A/°C
Total Output Error [2]	E _{TOT}	I _P = ±20 A, T _A = 25°C	-	±1.5	-	%

[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P, and ambient temperatures, T_A, provided that the Maximum Junction Temperature, T_{J(max)}, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P, with I_P = 20 A. Output filtered.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: T_A = -40°C to 85°C, C_F = 1 nF, and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I _P		-30	-	30	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I _P , T _A = 25°C	63	66	69	mV/A
Noise	V _{NOISE(PP)}	Peak-to-peak, T _A = 25°C, 66 mV/A programmed Sensitivity, C _F = 47 nF, C _{OUT} = open, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
Zero Current Output Slope	ΔV _{OUT(Q)}	T _A = -40°C to 25°C	-	-0.35	-	mV/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.08	-	mV/°C
Sensitivity Slope	ΔSens	T _A = -40°C to 25°C	-	0.007	-	mV/A/°C
		T _A = 25°C to 150°C	-	-0.002	-	mV/A/°C
Total Output Error [2]	E _{TOT}	I _P = ±30 A, T _A = 25°C	-	±1.5	-	%

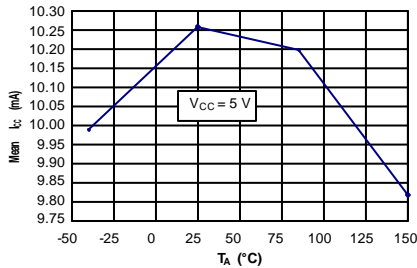
[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P, and ambient temperatures, T_A, provided that the Maximum Junction Temperature, T_{J(max)}, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P, with I_P = 30 A. Output filtered.

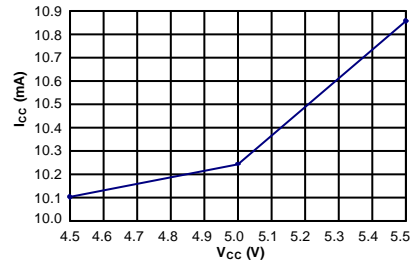
CHARACTERISTIC PERFORMANCE

$I_p = 5\text{ A}$, unless otherwise specified

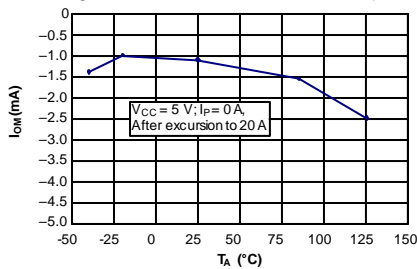
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



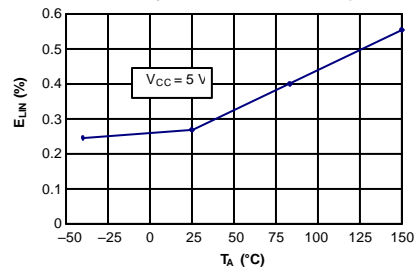
Supply Current versus Supply Voltage



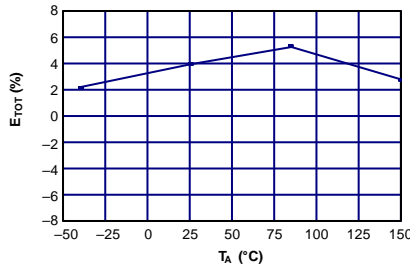
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



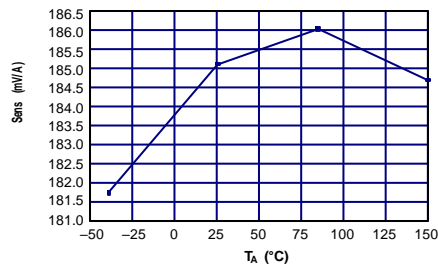
Nonlinearity versus Ambient Temperature



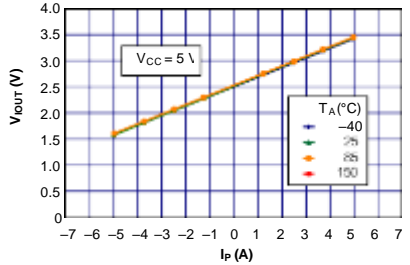
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



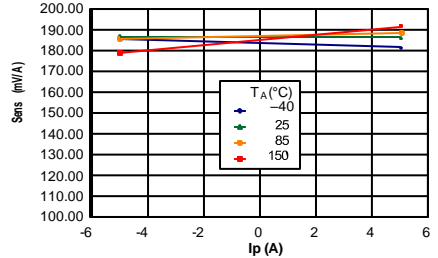
Sensitivity versus Ambient Temperature



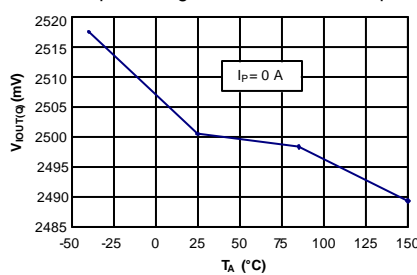
Output Voltage versus Sensed Current



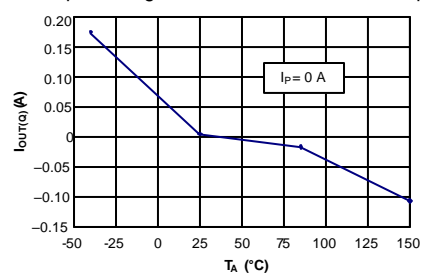
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



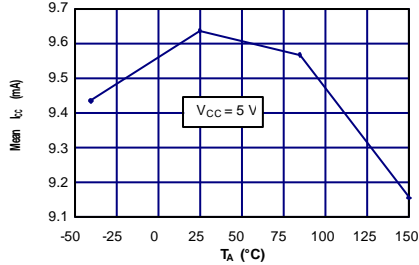
0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature



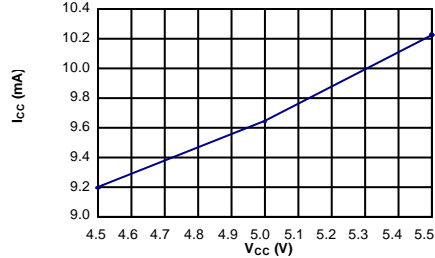
CHARACTERISTIC PERFORMANCE

$I_p = 20\text{ A}$, unless otherwise specified

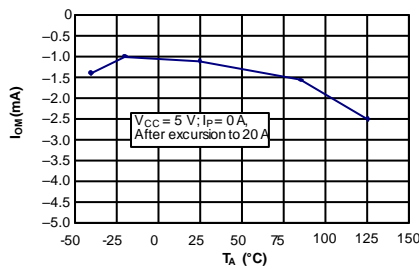
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



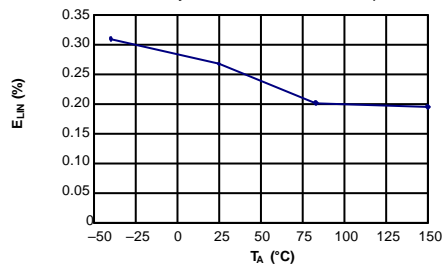
Supply Current versus Supply Voltage



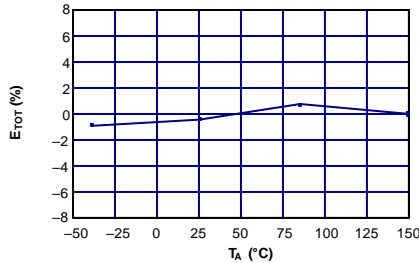
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



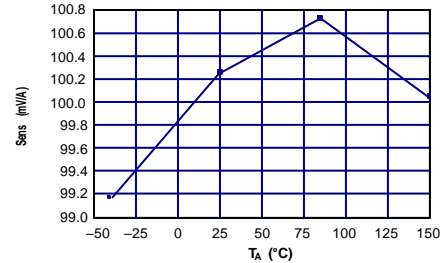
Nonlinearity versus Ambient Temperature



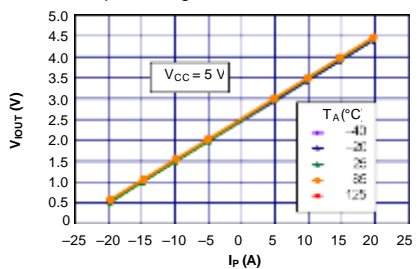
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



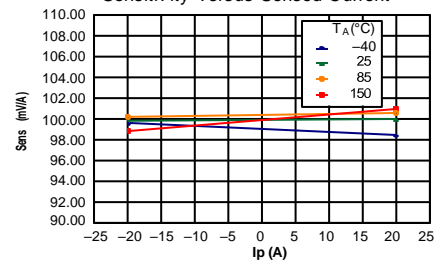
Sensitivity versus Ambient Temperature



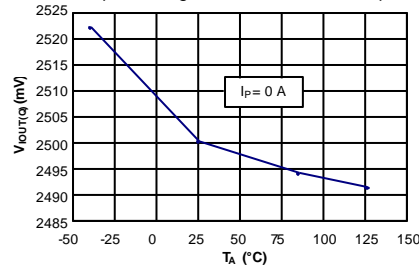
Output Voltage versus Sensed Current



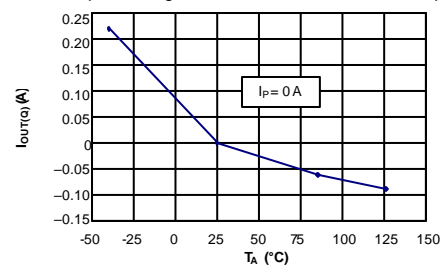
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



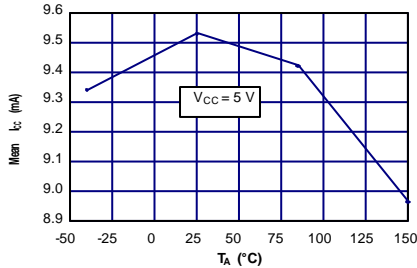
0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature



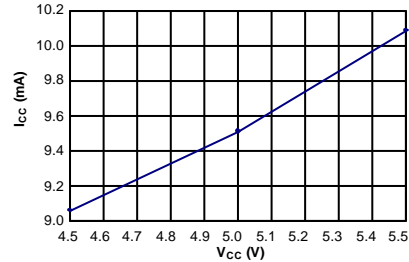
CHARACTERISTIC PERFORMANCE

$I_p = 30\text{ A}$, unless otherwise specified

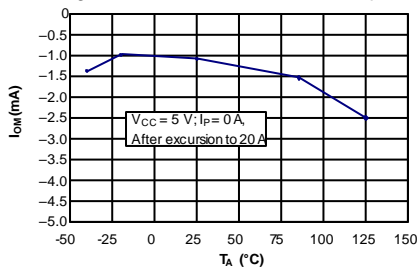
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



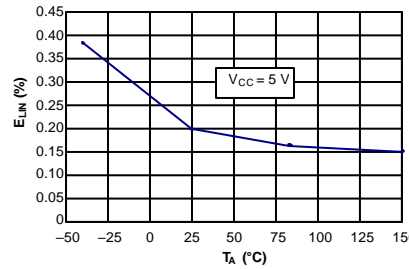
Supply Current versus Supply Voltage



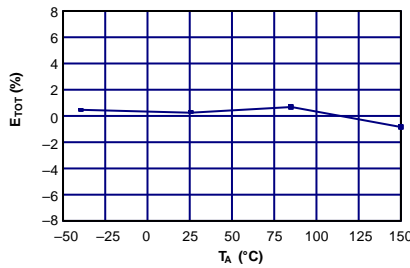
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



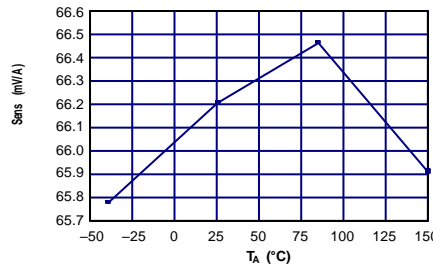
Nonlinearity versus Ambient Temperature



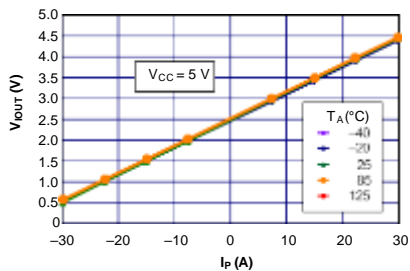
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



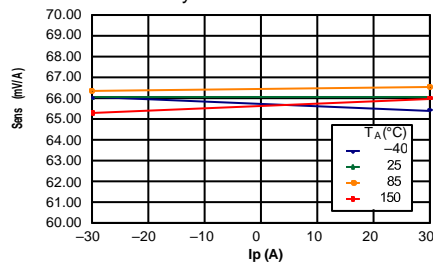
Sensitivity versus Ambient Temperature



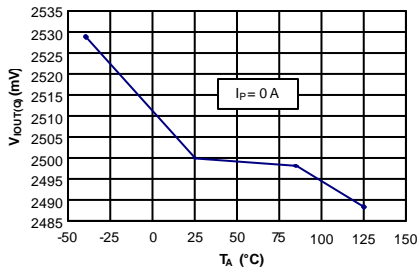
Output Voltage versus Sensed Current



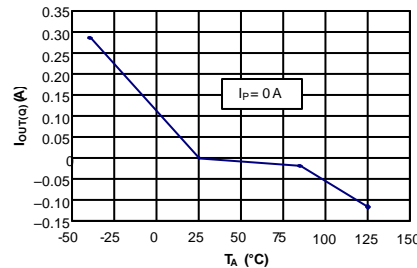
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature



DEFINITIONS OF ACCURACY CHARACTERISTICS

Sensitivity (Sens). The change in device output in response to a 1A change through the primary conductor. The sensitivity is the product of the magnetic circuit sensitivity (G/A) and the linear IC amplifier gain (mV/G). The linear IC amplifier gain is programmed at the factory to optimize the sensitivity (mV/A) for the full-scale current of the device.

Noise (V_{NOISE}). The product of the linear IC amplifier gain (mV/G) and the noise floor for the Allegro Hall effect linear IC (≈ 1 G). The noise floor is derived from the thermal and shot noise observed in Hall elements. Dividing the noise (mV) by the sensitivity (mV/A) provides the smallest current that the device is able to resolve.

Linearity (E_{LIN}). The degree to which the voltage output from the IC varies in direct proportion to the primary current through its full-scale amplitude. Nonlinearity in the output can be attributed to the saturation of the flux concentrator approaching the full-scale current. The following equation is used to derive the

$$\text{linearity } \left\{ \begin{array}{l} y: \\ 100 \left[1 - \frac{\Delta \text{ gain} \times \% \text{ sat} (V_{\text{IOUT_full-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}})}{2 (V_{\text{IOUT_half-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}})} \right] \end{array} \right.$$

where $V_{\text{IOUT_full-scale amperes}}$ = the output voltage (V) when the sampled current approximates full-scale $\pm I_P$.

Symmetry (E_{SYM}). The degree to which the absolute voltage output from the IC varies in proportion to either a positive or negative full-scale primary current. The following formula is used to derive symmetry:

$$100 \left(\frac{V_{\text{IOUT_+full-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}}}{V_{\text{IOUT(Q)}} - V_{\text{IOUT_full-scale amperes}}} \right)$$

Quiescent output voltage (V_{IOUT(Q)}). The output of the device when the primary current is zero. For a unipolar supply voltage, it nominally remains at $V_{CC}/2$. Thus, $V_{CC} = 5$ V translates into $V_{\text{IOUT(Q)}} = 2.5$ V. Variation in $V_{\text{IOUT(Q)}}$ can be attributed to the resolution of the Allegro linear IC quiescent voltage trim and thermal drift.

Electrical offset voltage (V_{OE}). The deviation of the device output from its ideal quiescent value of $V_{CC}/2$ due to nonmagnetic causes. To convert this voltage to amperes, divide by the device sensitivity, Sens.

Accuracy (E_{TOT}). The accuracy represents the maximum deviation of the actual output from its ideal value. This is also known as the total output error. The accuracy is illustrated graphically in the output voltage versus current chart at right.

Accuracy is divided into four areas:

- **0 A at 25°C.** Accuracy at the zero current flow at 25°C, without the effects of temperature.
- **0 A over Δ temperature.** Accuracy at the zero current flow including temperature effects.
- **Full-scale current at 25°C.** Accuracy at the full-scale current at 25°C, without the effects of temperature.
- **Full-scale current over Δ temperature.** Accuracy at the full-scale current flow including temperature effects.

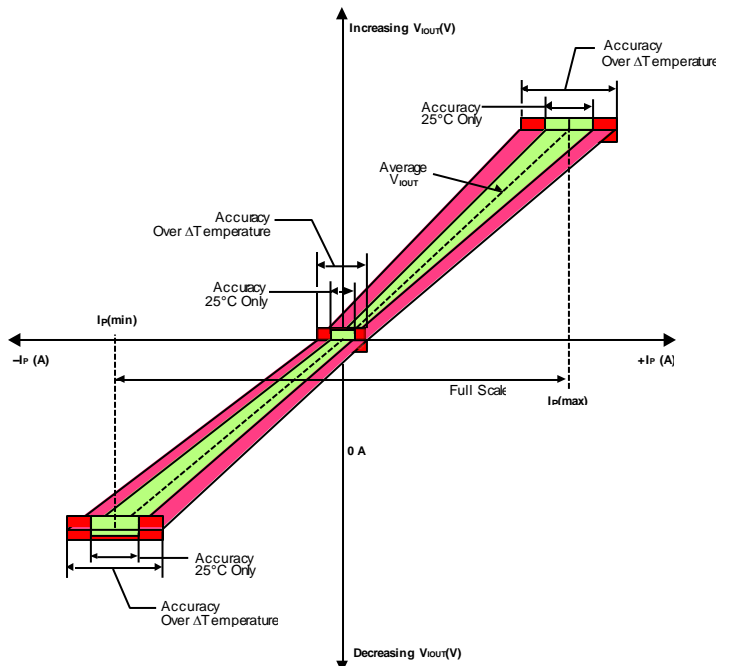
Ratiometry. The ratiometric feature means that its 0 A output, $V_{\text{IOUT(Q)}}$, (nominally equal to $V_{CC}/2$) and sensitivity, Sens, are proportional to its supply voltage, V_{CC} . The following formula is used to derive the ratiometric change in 0 A output voltage, $\Delta V_{\text{IOUT(Q)RAT}}$ (%).

$$\Delta V_{\text{IOUT(Q)RAT}} (\%) = \frac{V_{\text{IOUT(Q)}/V_{CC}} / V_{\text{IOUT(Q)}/5V}}{V_{CC} / 5V} \cdot 100$$

The ratiometric change in sensitivity, $\Delta \text{Sens}_{\text{RAT}}$ (%), is defined as:

$$\Delta \text{Sens}_{\text{RAT}} (\%) = \frac{\text{Sens}_{V_{CC}} / \text{Sens}_{5V}}{V_{CC} / 5V} \cdot 100$$

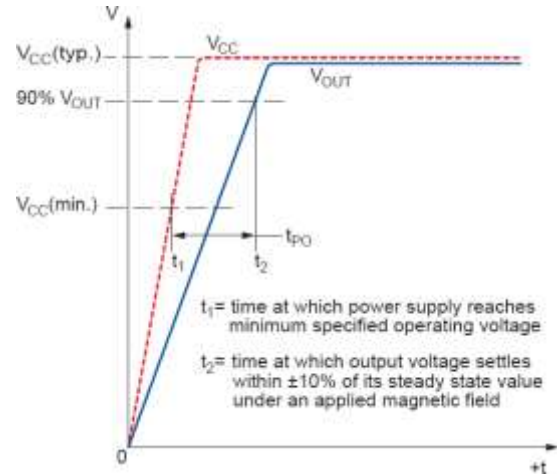
Output Voltage versus Sampled Current
Accuracy at 0 A and at Full-Scale Current



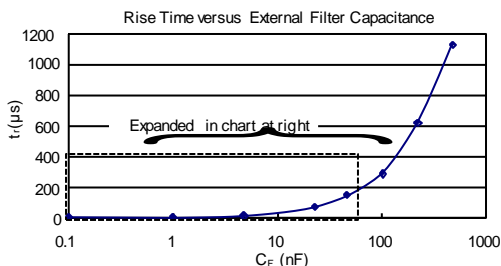
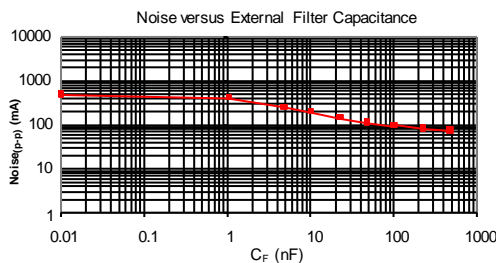
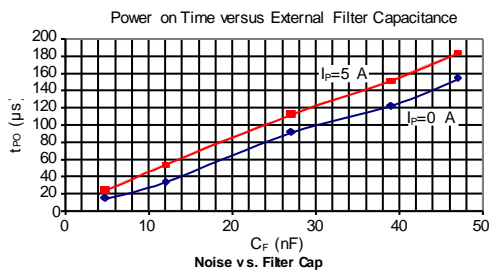
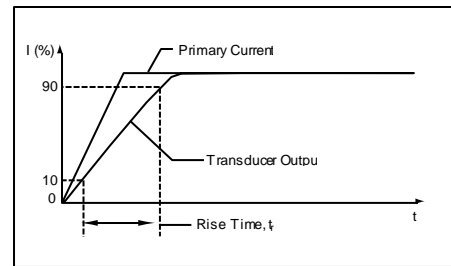
DEFINITIONS OF DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS

Power-On Time (t_{PO}). When the supply is ramped to its operating voltage, the device requires a finite time to power its internal components before responding to an input magnetic field.

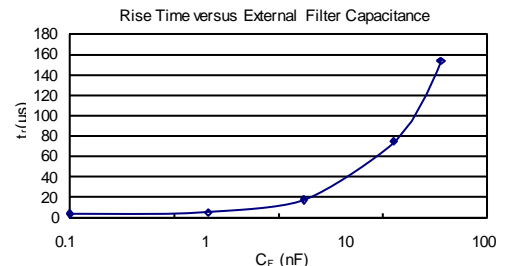
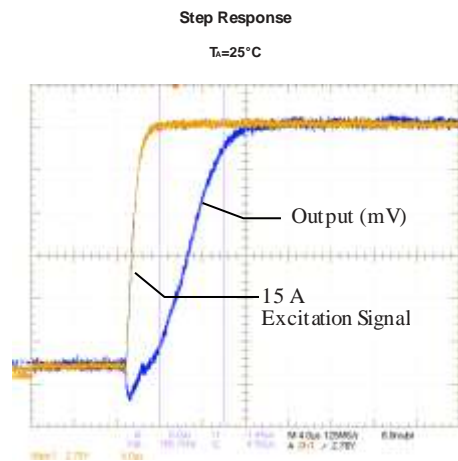
Power-On Time, t_{PO} , is defined as the time it takes for the output voltage to settle within $\pm 10\%$ of its steady state value under an applied magnetic field, after the power supply has reached its minimum specified operating voltage, $V_{CC(min)}$, as shown in the chart at right.



Rise time (t_r). The time interval between a) when the device reaches 10% of its full-scale value, and b) when it reaches 90% of its full scale value. The rise time to a step response is used to derive the bandwidth of the device, in which $f(-3 \text{ dB}) = 0.35 / t_r$. Both t_r and $t_{RESPONSE}$ are detrimentally affected by eddy current losses observed in the conductive IC ground plane.



C_F (nF)	t_r (µs)
Open	3.5
1	5.8
4.7	17.5
22	73.5
47	88.2
100	291.3
220	623
470	1120

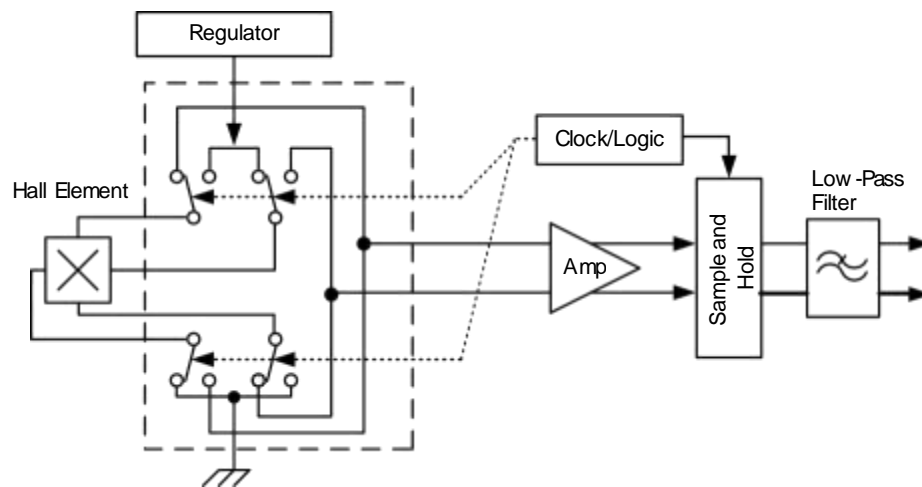


CHOPPER STABILIZATION TECHNIQUE

Chopper Stabilization is an innovative circuit technique that is used to minimize the offset voltage of a Hall element and an associated on-chip amplifier. Allegro has a Chopper Stabilization technique that nearly eliminates Hall IC output drift induced by temperature or package stress effects. This offset reduction technique is based on a signal modulation-demodulation process. Modulation is used to separate the undesired DC offset signal from the magnetically induced signal in the frequency domain. Then, using a low-pass filter, the modulated DC offset is suppressed while the magnetically induced signal passes through

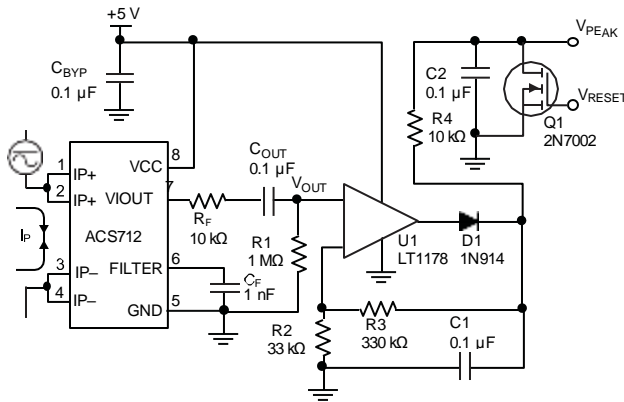
the filter. As a result of this chopper stabilization approach, the output voltage from the Hall IC is desensitized to the effects of temperature and mechanical stress. This technique produces devices that have an extremely stable Electrical Offset Voltage, are immune to thermal stress, and have precise recoverability after temperature cycling.

This technique is made possible through the use of a BiCMOS process that allows the use of low-offset and low-noise amplifiers in combination with high-density logic integration and sample and hold circuits.

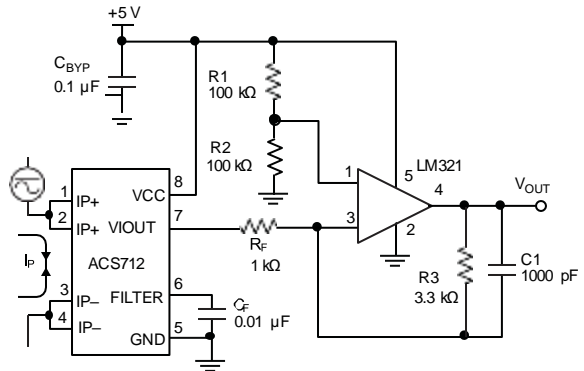


Concept of Chopper Stabilization Technique

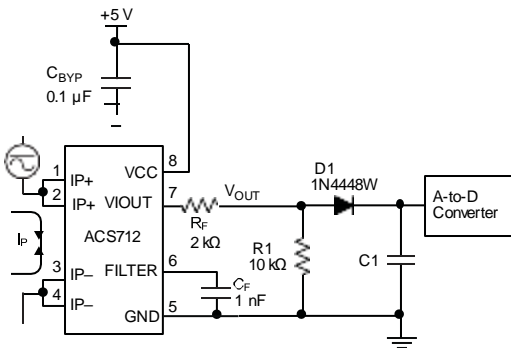
TYPICAL APPLICATIONS



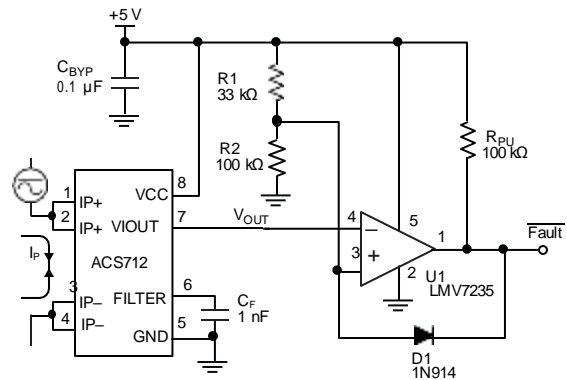
Application 2. Peak Detecting Circuit



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS712ELC-05A).



Application 4. Rectified Output. 3.3 V scaling and rectification application for A-to-D converters. Replaces current transformer solutions with simpler ACS circuit. C1 is a function of the load resistance and filtering desired. R1 can be omitted if the full range is desired.



Application 5. 10 A Overcurrent Fault Latch. Fault threshold set by R1 and R2. This circuit latches an overcurrent fault and holds it until the 5 V rail is powered down.

IMPROVING SENSING SYSTEM ACCURACY USING THE FILTER PIN

In low-frequency sensing applications, it is often advantageous to add a simple RC filter to the output of the device. Such a low-pass filter improves the signal-to-noise ratio, and therefore the resolution, of the device output signal. However, the addition of an RC filter to the output of a sensor IC can result in undesirable device output attenuation — even for DC signals.

Signal attenuation, ΔV_{ATT} , is a result of the resistive divider effect between the resistance of the external filter, R_F (see Application 6), and the input impedance and resistance of the customer interface circuit, R_{INTFC} . The transfer function of this resistive divider is given by:

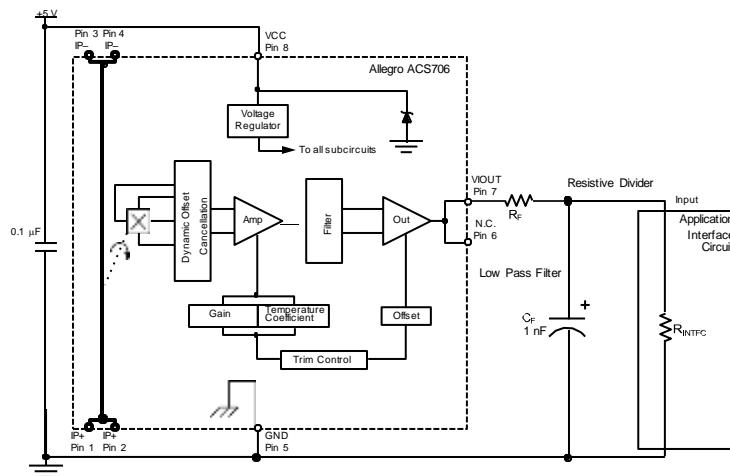
$$\Delta V_{ATT} = V_{IOUT} \left(\frac{R_{INTFC}}{R_F + R_{INTFC}} \right)$$

Even if R_F and R_{INTFC} are designed to match, the two individual resistance values will most likely drift by different amounts over

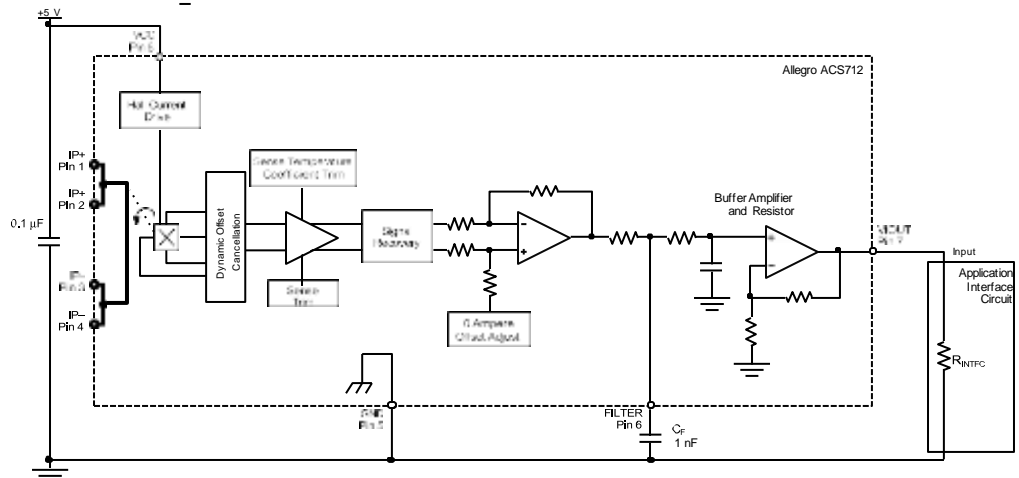
temperature. Therefore, signal attenuation will vary as a function of temperature. Note that, in many cases, the input impedance, R_{INTFC} , of a typical analog-to-digital converter (ADC) can be as low as 10 k Ω .

The ACS712 contains an internal resistor, a FILTER pin connection to the printed circuit board, and an internal buffer amplifier. With this circuit architecture, users can implement a simple RC filter via the addition of a capacitor, C_F (see Application 7) from the FILTER pin to ground. The buffer amplifier inside of the ACS712 (located after the internal resistor and FILTER pin connection) eliminates the attenuation caused by the resistive divider effect described in the equation for ΔV_{ATT} . Therefore, the ACS712 device is ideal for use in high-accuracy applications that cannot afford the signal attenuation associated with the use of an external RC low-pass filter.

Application 6. When a low pass filter is constructed externally to a standard Hall effect device, a resistive divider may exist between the filter resistor, R_F , and the resistance of the customer interface circuit, R_{INTFC} . This resistive divider will cause excessive attenuation, as given by the transfer function for ΔV_{ATT} .



Application 7. Using the FILTER pin provided on the ACS712 eliminates the attenuation effects of the resistor divider between R_F and R_{INTFC} , shown in Application 6.



Package LC, 8-pin SOIC

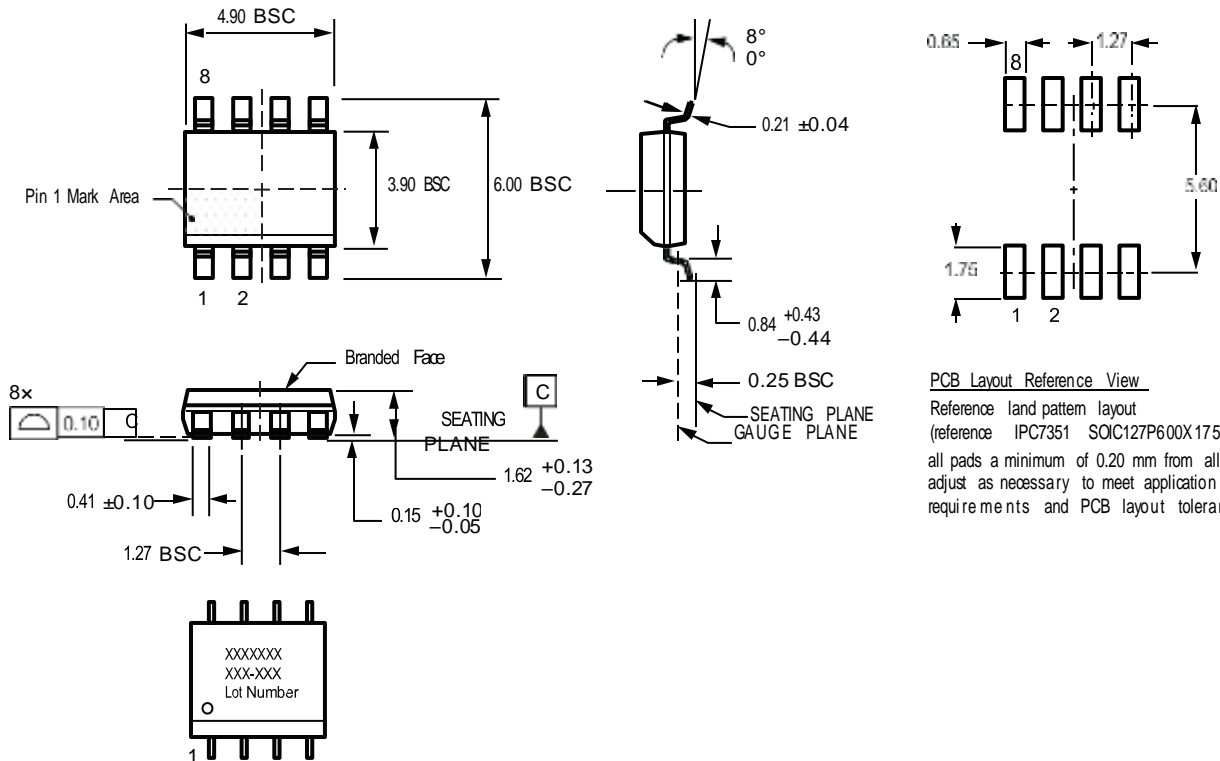
For Reference Only; not for tooling use

(reference Allegro DWG-0000385, Rev. 2 or JEDEC MS-012AA)

Dimensions in millimeters – Not to scale

Dimensions exclusive of mold flash, gate burrs, and dambar protrusions

Exact case and lead configuration at supplier discretion within limits shown



PCB Layout Reference View

Reference land pattern layout

(reference IPC7351 SOIC127P600X175-8M);

all pads a minimum of 0.20 mm from all adjacent pads; adjust as necessary to meet application process requirements and PCB layout tolerances.

Standard Branding Reference View

Lines 1, 2 = 8 characters

Line 3 = 5 characters

Line 1: Part Number

Line 2: Temp, Pkg - Amps

Line 3: First 5 Characters of Assembly Lot Number

Belly Brand: Country of Origin, Lot Number

Branding scale and appearance at supplier discretion

REVISION HISTORY

Number	Date	Description
15	November 16, 2012	Update rise time and isolation, I _{OUT} reference data, patents
16	June 5, 2017	Updated product status
17	December 10, 2018	Updated certificate numbers
18	May 17, 2019	Updated TUV certificate mark, and minor editorial updates
19	January 30, 2020	Updated product status and minor editorial updates
20	February 7, 2022	Updated package drawing (page 14)
21	February 9, 2023	Updated selection guide heading (page 2)
22	February 13, 2024	Updated Selection Guide (page 2) and Isolation Characteristics (page 3); removed patent information (page 16)

Copyright 2024, Allegro MicroSystems.

Allegro MicroSystems reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in any devices or systems, including but not limited to life support devices or systems, in which a failure of Allegro's product can reasonably be expected to cause bodily harm.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

Copies of this document are considered uncontrolled documents.

For the latest version of this document, visit our website:

www.allegromicro.com