

Validação de Equipamento de Leitura Óptica para Medidores de Energia Elétrica Baseados no Protocolo ABNT 14522:2008

RIBEIRO NESI, Vinícius
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
vinicius.rn15@aluno.ifsc.edu.br

PAVEI UGGIONI, Périson
Professor da Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
perison.uggioni@ifsc.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada de validação para um equipamento de telemedição óptica, com o objetivo de simular um medidor de energia elétrica em dois aspectos principais: sua característica física e construtiva da porta óptica é fundamentada na norma ABNT NBR 14519:2000, e o outro ponto é a característica do protocolo de comunicação, fundamentada na norma ABNT NBR 14522:2008. Esta bancada de validação é capaz de simular casos de intensidade luminosa mínimas e máximas abrangendo os medidores homologados que contém esta diferença se comparados entre si, e simular um pacote de resposta como feito no medidor com base em suas normas. Para isso se tornar possível foram abordados temas sobre telemedição e infraestrutura de medição avançada AMI, bem como os princípios de funcionamento da comunicação óptica e suas variáveis associadas. Para a medição da intensidade luminosa exigiu-se um estudo e a aplicação de fotodetectores, com foco no espectro do infravermelho próximo (NIR). Já o desenvolvimento da bancada envolveu o uso de sistemas embarcados, com destaque para o microcontrolador ESP32 e sua programação, além da utilização de conceitos de eletrônica para controlar a intensidade do fotodiodo emissor. Esta solução contribui para aumentar a confiabilidade do processo de validação de produtos de telemedição, uma vez que a bancada permitiu identificar variações de intensidade luminosa entre 3,53uA a 17,03uA nos medidores homologados, garantindo uma validação robusta.

Palavras-Chave – Telemedição óptica. Medidores de Energia. Comunicação Óptica. Normas ABNT.

I. INTRODUÇÃO

Tem-se como principal objetivo na gestão de energia elétrica otimizar a sua geração, transmissão, distribuição e consumo de forma eficiente. Buscando minimizar custos, melhorar a eficiência energética, isso tudo, sempre buscando garantir a confiabilidade no seu fornecimento. Para que isso possa se tornar cada vez mais viável é necessário o conhecimento completo das informações que compõem a distribuição da energia elétrica. [1]

Devido à crescente demanda por informações sobre o consumo de energia, tornou-se essencial o desenvolvimento de sistemas capazes de realizar a captação dessas medições de forma rápida, precisa e confiável. Nesse contexto, surge a telemedição, uma tecnologia que permite a leitura remota de dados relevantes para o monitoramento e gerenciamento do consumo de energia elétrica. Com isso, empresas e indústrias podem acompanhar suas operações em tempo real, a telemedição é um dos principais processos para digitalizar o setor elétrico. [2]

Conhecida também como AMI (Advanced Metering Infrastructure) ou infraestrutura de medição inteligente, é a tecnologia que permite a leitura dos medidores de energia elétrica de forma remota, com isso obtendo os dados necessários para que as concessionárias de energia possam utilizar estas informações. Além disso, a AMI permite que as concessionárias tenham acesso aos dados pelo menos uma vez por dia, aumentando o poder de feedback sobre o consumo de energia do cliente, permitindo uma maior compreensão de planejamento e de operação da rede. [3]

Uma das formas de se obter uma AMI é o uso de equipamentos eletrônicos com a função de captar os dados dos medidores de energia elétrica, e enviar esses dados remotamente para um servidor que tem condições de tratar e demonstrar esses dados em um sistema supervísório. Como exemplo, pode-se citar o produto Leitora Óptica que realiza a leitura dos dados por meio da porta óptica dos medidores de energia elétrica, utilizando o protocolo de comunicação estabelecido pela norma ABNT NBR 14522:2008 [4], onde esta norma define os padrões para troca de informações no sistema de medição de energia elétrica, e enviá-los para o servidor e posteriormente para as concessionárias.

A telemedição permite que as concessionárias tenham dados em que possam fiscalizar e avaliar as abordagens que devem tomar, isso acaba dando uma ênfase de que a telemedição deve ocorrer de forma confiável e segura. No entanto, devido à variação da intensidade luminosa entre diferentes modelos de medidores, podem ocorrer falhas na comunicação.

Por isso, estabeleceu-se como principal desafio garantir que as Leitoras Ópticas operassem corretamente com qualquer medidor compatível com a norma ABNT NBR 14519:2000 [5], que estabelece as especificações técnicas dos medidores eletrônicos de energia elétrica, e fosse homologado na empresa, independentemente da incidência luminosa da porta óptica do medidor. Esta variação de incidência luminosa entre diferentes modelos de medidores resultava em falhas de leitura, o que levou à necessidade de recall de diversos lotes. Essas falhas causaram retrabalho em campo, desconforto entre clientes e revendedores, e prejuízos operacionais, assim, evidenciando a necessidade de uma abordagem mais robusta e padronizada no processo de validação do produto.

Com este objetivo, a empresa sentiu a necessidade de aumentar sua confiabilidade no mercado e foi definido que seria necessário padronizar os processos de fabricação e desenvolvimento utilizando como base a norma ISO

9001:2015 [6], que é a norma internacional que estabelece os requisitos para um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ). Foram então mapeados todos os pontos da empresa para que seja possível seguir de forma correta a norma, um dos pontos principais desta norma é a qualidade de produção e validação da Leitora Óptica.

Abaixo, tem-se a Fig. 1 onde mostra como é conectado o leitor óptico ao medidor para a comunicação.



Fig. 1: Leitor Óptico e medidor de energia.

A norma ABNT NBR 14522:2008 [4] define o protocolo de intercâmbio de informações entre dispositivos no sistema de medição de energia elétrica, com o objetivo de garantir a compatibilidade entre sistemas e equipamentos de diferentes fabricantes.

Características de transmissão definidas pela norma:

- Velocidade: 9.600 Baud ($\pm 2\%$);
- Tipo de comunicação: Assíncrona;
- Modo: Bidirecional, porém não simultâneo;
- Estrutura do caractere: 1 bit de start (nível lógico “0”), 8 bits de dados e 1 bit de stop (nível lógico “1”).

Para a realização da comunicação Leitor Óptico e medidor é necessário seguir o fluxo definido pela norma, onde o medidor deve ficar enviando bytes ENQ para a sincronização com o Leitor, e então o Leitor envia um comando onde é respondido pelo medidor e se a resposta for válida o Leitor finaliza enviando bytes de ACK, e assim sinalizando ao medidor para voltar a enviar Bytes de sincronização conforme a Fig. 2.

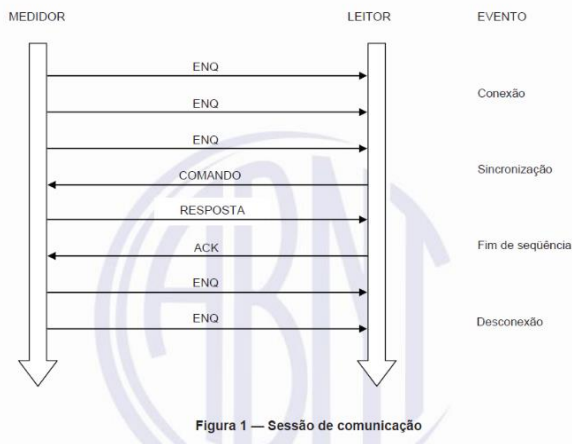


Fig. 2: Sessão de comunicação. Fonte: [4].

Para funcionar, um sistema de comunicação óptica necessita de uma fonte que module a luz, como os fotodiodos emissores NIR presentes em portas ópticas de medidores. Além do meio de transmissão, é fundamental um fotodetector com circuito de amplificação e recuperação, visando restaurar o sinal à sua forma original do transmissor. [7]

Para a comunicação óptica do medidor com a leitora a norma ABNT NBR 14519:2000 [5] descreve as características físicas que devem ser respeitadas pelos medidores de energia elétrica, determinando que deve haver um acoplamento óptico que faça a transmissão no comprimento de onda de 940 nm região do NIR.

Esse acoplamento óptico de acordo com a norma ABNT NBR 14519:2000 [5] é composto por um diodo fotoemissor, e um fototransistor para recepção de dados que devem estar a uma distância de 10 mm entre seus centros, para a comunicação é importante que o acoplamento óptico do medidor e o conector óptico da leitora estejam alinhados tendo uma tolerância de 10° de acordo com a norma.

Segundo a norma ISO 20473:2007 [8], que trata da classificação das faixas do espectro eletromagnético na área de óptica e fotônica, o infravermelho próximo (NIR) compreende a faixa de 780 nm a 3000 nm. Essa região é utilizada em diversas aplicações tecnológicas, incluindo sistemas de comunicação óptica.

Assim, como principal objetivo tem-se o desenvolvimento de uma bancada para testes e validação da comunicação da Leitora Óptica de medidores de energia elétrica, baseada em dados de intensidade de luminosidade, capaz de simular as características ópticas dos medidores homologados. E tem como objetivos específicos:

- Desenvolver a bancada de validação para simular os medidores de energia na validação da Leitora Óptica;
- Mensurar os valores de intensidade luminosa das portas ópticas dos medidores de energia elétrica homologados;
- Estabelecer uma faixa de tolerância segura de intensidade luminosa para atuação confiável da Leitora Óptica, com base nos valores obtidos dos medidores homologados;
- Implementar a bancada de validação utilizando o protocolo de comunicação ABNT NBR 14522:2008, assegurando compatibilidade e comportamento equivalente ao de medidores reais;
- Propor um procedimento de validação padronizado para garantir a eficácia do processo de homologação do produto seguindo a norma ISO 9001;
- Avaliar os resultados obtidos com o uso do medidor genérico no ambiente de produção, verificando sua eficiência na substituição dos medidores reais.

II. METODOLOGIA

A concepção do projeto envolve o estudo sobre as características ópticas envolvidas na comunicação entre leitor e medidor, também se atendo aos protocolos utilizados, será então utilizado o conceito de sistemas embarcados e desenvolver uma placa dedicada a este projeto utilizando o microcontrolador ESP32 [10] para controlar as ações desejadas.

As duas partes principais do projeto são a medição da intensidade luminosa, que ficará sob responsabilidade do Cabo Óptico, e a simulação das características físicas e da comunicação de um medidor que será a Porta Óptica, esses dois circuitos principais serão controlados pelo mesmo microcontrolador e para facilitar o uso da bancada em ambiente de produção, há alguns periféricos que serão utilizados e o esquemático do projeto é demonstrado na Fig. 3

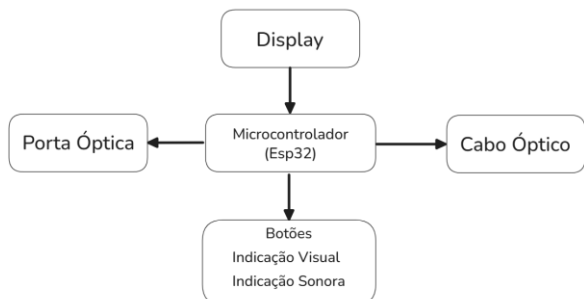


Fig. 3: Diagrama de blocos bancada.

A medição é importante para o conhecimento das características de transmissão, o principal método de medição é baseado na conversão da luz em uma corrente diretamente proporcional à potência óptica incidente, neste caso, o sensor é baseado em dispositivos semicondutores, como os fotodetectores, esses componentes têm uma resposta mais rápida às variações da intensidade luminosa e apresentam grande estabilidade nos valores obtidos nas medições. A responsividade dos dispositivos de fotodeteção varia com o comprimento de onda da luz. [7]

Os fotodetectores são amplamente utilizados em dispositivos optoeletrônicos como receptores ópticos que convertem energia luminosa em energia elétrica. A resposta óptica de fotodetectores em uma faixa de comprimento de onda específica pode ser identificada pela faixa de resposta espectral, essa região é quantificada pela curva de sensibilidade de um fotodetector, que mostra seus espectros de absorção em comprimentos de onda de luz específicos. [9]

Fotodetectores NIR são comumente utilizados em sistemas de comunicação óptica para transmissão de dados. Esses fotodetectores têm capacidade de detectar sinais na faixa de comprimento de onda de 800nm a 1700 nm, que é a faixa espectral usada na maioria dos sistemas de comunicação óptica. Essa faixa de comprimentos de onda é conhecida como "banda de telecomunicações" ou "janela de telecomunicações". [9]

O Fototransistor é um transistor sensível a luz, ou seja, um fotodetector, nos comprimentos de onda entre 400 nm e 1100 nm empregam-se fotodetectores de silício, cuja máxima sensibilidade ocorre em torno de 900 nm e com comprimento de onda de corte em 1110 nm. [7].

Para a recepção dos dados foi selecionado o fototransistor comercial PT204-6C [11] que apresenta uma sensibilidade máxima aos comprimentos de onda em torno de 940 nm (Fig. 4), ideal para a medição da intensidade luminosa da porta óptica dos medidores.

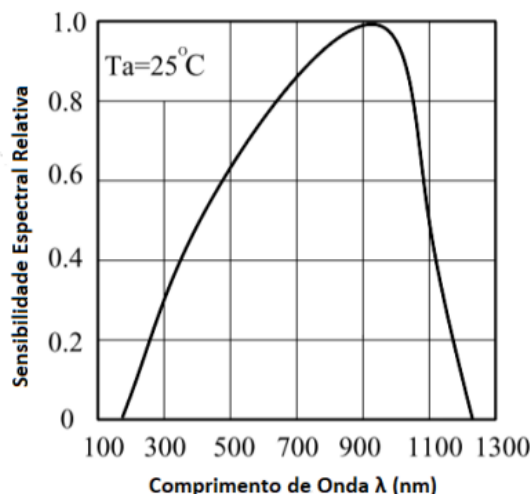


Fig. 4: Curva de Sensibilidade do PT204-6C. Fonte [11].

O fototransistor receptor será conectado em série com um potenciômetro digital AD5220 [12] (Fig. 5), o circuito desse componente inclui um pino de clock, conectado ao microcontrolador; um pino de chip select, que habilita o potenciômetro para operação quando está em nível lógico alto, e um pino Up/Down, responsável pelo controle da resistência. Os terminais do potenciômetro são definidos como A, B e W, sendo que o terminal A é conectado ao VCC, o terminal B ao GND, e o terminal W corresponde ao ponto de resistência variável, que será ligado em série com o fototransistor.

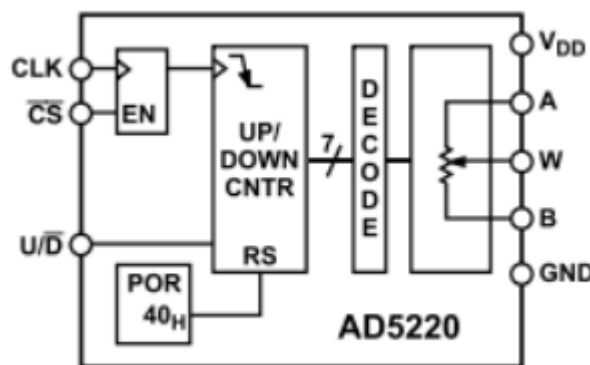


Fig. 5: Circuito do AD5220. Fonte: [12].

A medição da intensidade luminosa será realizada por meio de um divisor de tensão formado entre o potenciômetro e o fototransistor (Fig. 6). À medida que a resistência do potenciômetro é ajustada, a tensão lida pelo microcontrolador se altera, estabelecendo, assim, uma relação entre a intensidade luminosa e a resistência configurada, como a resistência é conhecida, sabe-se então a corrente que a luminosidade está sendo emitida.

Para realizar esta medição analógica foi necessário utilizar um AMPOP MCP6002 [13], com ganho unitário para não afetar os dados de recepção, e em outra via, os dados são tratados utilizando um buffer [14] para deixar o sinal estável para o ESP32.

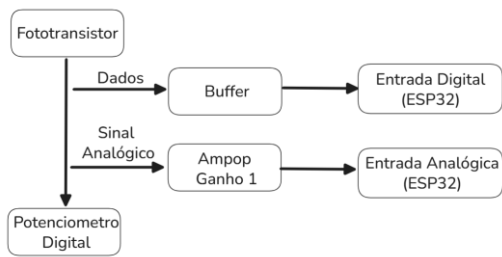


Fig. 6: Circuito receptor.

Para a montagem da porta óptica foi necessário estudos relacionados a controlar a intensidade do fotodiodo emissor [15], conforme a Fig. 7.

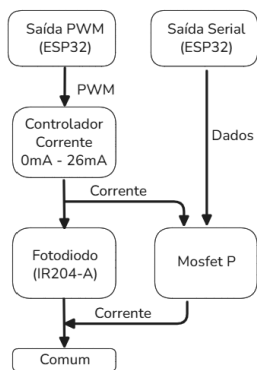


Fig. 7: Circuito Emissor.

Para o controle de corrente, foi desenvolvido um circuito utilizando o transistor BC817 [16], no qual é aplicado um sinal PWM proveniente do microcontrolador. Esse sinal passa por um filtro RC, responsável por suavizar a forma de onda e convertê-la em uma tensão contínua proporcional ao ciclo de trabalho do PWM. Considerando a queda de aproximadamente 0,7 V entre base e emissor VBE do transistor, a tensão resultante aplicada ao resistor de sensoriamento (R15) permite o controle linear da corrente, uma vez que, conforme a Lei de Ohm ($V = R \cdot I$), há uma relação direta entre o valor do PWM e a corrente conduzida pelo circuito. Assim, com uma variação de 0 a 3,3 V no sinal PWM, obtém-se uma variação correspondente de 0 a 2,6 V sobre o resistor, controlando de forma precisa a corrente no circuito.

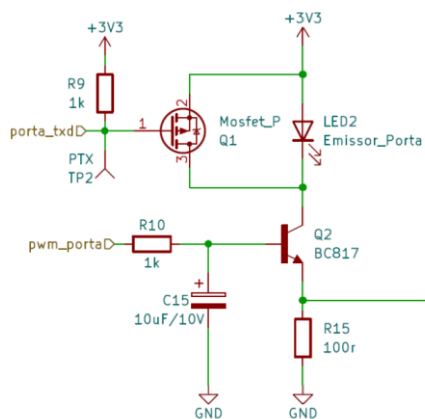


Fig. 8: Circuito de controle de corrente e comunicação.

Para o envio dos dados, foi utilizado um MOSFET de canal P, responsável por desligar o LED emissor conforme os bytes são transmitidos. Dessa forma, o LED opera de maneira sincronizada com o processo de comunicação, garantindo que a emissão luminosa ocorra apenas nos intervalos adequados. O diagrama completo do circuito pode ser observado na Fig. 8, onde se destacam as etapas de controle de corrente e de transmissão óptica.

Com o esquemático eletrônico finalizado, foi desenvolvido um case utilizando um software de modelagem 3D, posteriormente impresso em impressora 3D. O case tem como finalidade principal a proteção do circuito eletrônico, considerando que a bancada será instalada em um ambiente de produção. Além disso, o invólucro também desempenha o papel de Interface Homem-Máquina (IHM), abrigando um display e botões de interação, conforme a Fig. 9.

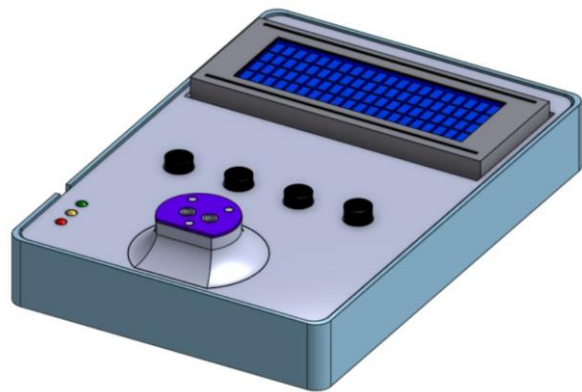


Fig. 9: Projeto 3D.

Em seguida, foi realizada a etapa de desenvolvimento do firmware, implementado integralmente na plataforma Visual Studio, utilizando o ambiente de desenvolvimento da Espressif Systems, empresa responsável pelo ESP32, microcontrolador empregado no projeto. Essa escolha proporcionou um ambiente robusto e integrado para a programação, compilação e depuração do código, facilitando a implementação das rotinas de controle e comunicação do sistema.

O microcontrolador ESP32 é amplamente utilizado em projetos embarcados por oferecer alto desempenho e conectividade, contando internamente com o FreeRTOS (Free Real-Time Operating System), um sistema operacional de tempo real que permite a execução de múltiplas tarefas de forma concorrente. O uso do FreeRTOS possibilita ao desenvolvedor estruturar o código em tasks, ou tarefas independentes, que são gerenciadas por um escalonador interno responsável por definir qual delas deve ser executada a cada momento, de acordo com suas prioridades e estados. Essa abordagem facilita a organização do programa, permitindo que cada funcionalidade seja tratada separadamente, de forma assíncrona e eficiente.

No presente projeto, optou-se por utilizar o modelo de programação baseado em tasks com o objetivo de melhorar a modularidade, a clareza e o desempenho do sistema. Por meio da criação de tarefas independentes, o ESP32 é capaz de executar diferentes processos simultaneamente, aproveitando seus dois núcleos de processamento, a Fig. 10, demonstra as tasks utilizadas.

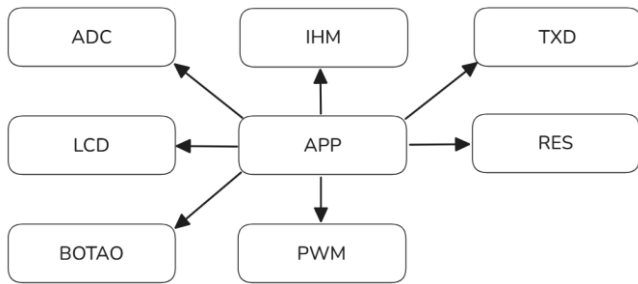


Fig. 10: Tasks.

Onde cada task tem sua função, ADC, controla os pinos de leitura analógica, IHM, atualiza as variáveis que devem ser exibidas e as telas, TXD, monta o pacote de resposta ao comando do Leitor, LCD inicializa a comunicação I2C com o display, RES, controla o potenciômetro digital, BOTAO, verifica se houve ações nos pinos dos botões, PWM, controla o pino que envia o sinal pwm para o controle da corrente e APP é onde se gerencia toda a lógica de uso de cada uma das tasks.

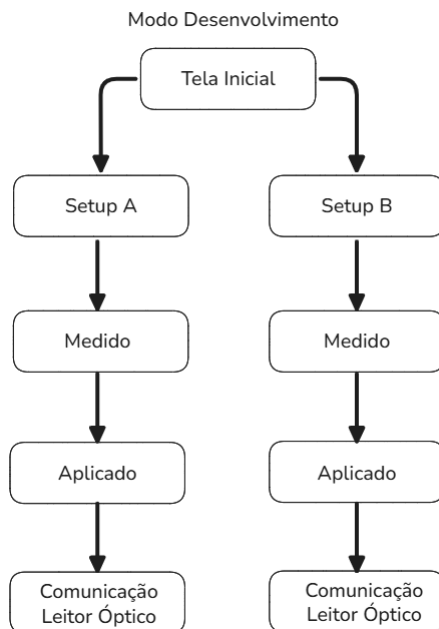


Fig. 11: Modo Desenvolvimento.

Na tela inicial, é possível escolher entre Setup A e Setup B. Ambas as telas possuem as mesmas funcionalidades, porém o objetivo dessa separação é permitir, durante o processo de desenvolvimento, a avaliação simultânea de dois medidores. Assim, os valores medidos e aplicados de cada setup são independentes, possibilitando a realização de testes com intensidades diferentes, bastando apenas alternar entre as telas.

A etapa de medição ocorre no circuito do cabo óptico ao pressionar o botão F3. Nesse caso, é aplicado um PWM de 50% ao LED emissor, uma vez que alguns medidores somente ativam a porta óptica quando recebem um sinal externo. O potenciômetro digital é ajustado para o tap 1, sendo realizada uma leitura analógica da tensão, posteriormente convertida em corrente. Essa medição também é realizada para os taps 2 e 3, e, em seguida, é calculada a média das coletas. À medida que

a resistência aumenta, a tensão também se eleva, mantendo uma corrente constante nos três taps medidos, o que garante maior qualidade na coleta da intensidade.

A etapa de aplicação ocorre no circuito da porta óptica, sendo aferida pelo circuito do cabo óptico. Nesse processo, o receptor da porta óptica é inicializado com o tap 3, considerado uma margem segura para recepção, enquanto o emissor é configurado com 50% de PWM. Em seguida, o circuito do cabo óptico, que possui armazenado o valor de referência do medidor, aguarda que a porta óptica simule esse valor. Para isso, aplica-se o método da busca binária, por meio do qual o valor de PWM é ajustado iterativamente, à medida que o cabo realiza as medições e as compara com os valores da porta óptica.

A etapa de comunicação do Leitor Óptico permanece em espera na porta serial até o recebimento de um comando válido. Ao receber um comando, o sistema identifica o seu tipo, exibe-o na interface e gera uma resposta correspondente, composta pelo comando recebido, o serial do medidor, valores nulos e, por fim, o cálculo do CRC da mensagem.

Para a inserção da bancada no modo de produção, o firmware foi modificado com o intuito de simplificar sua utilização. Como o objetivo dessa etapa é realizar a validação nas intensidades mínima e máxima, previamente estabelecidas após a coleta de dados, definiu-se que o Setup A seria responsável por aplicar a intensidade mínima, enquanto o Setup B aplicaria a intensidade máxima. Ambos foram devidamente testados e calibrados. Nesse contexto, a função principal do programa é fornecer o valor de PWM correspondente às intensidades configuradas, além de monitorar o acionamento dos botões para alternar entre as telas e aguardar a comunicação serial entre o Leitor e a bancada para execução das ações.

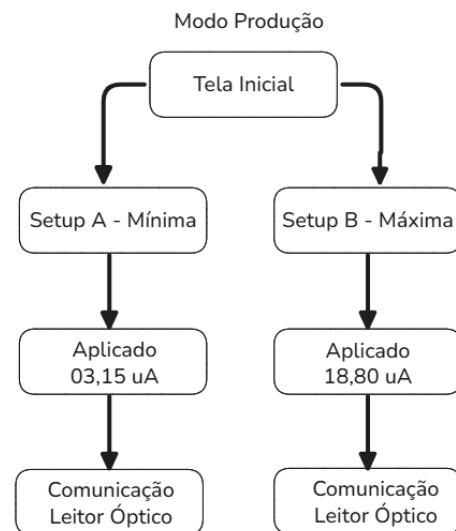


Fig. 12: Fluxograma modo produção.

III. RESULTADOS

O processo de coleta de resultados iniciou-se com a montagem da placa eletrônica do protótipo. A placa de circuito impresso (PCI) foi fabricada por uma empresa terceirizada especializada, enquanto a montagem dos

componentes foi realizada manualmente (Fig. 13). Após a conclusão da montagem, procedeu-se à verificação dos circuitos, a fim de assegurar que seu comportamento estivesse de acordo com o planejado durante o desenvolvimento do esquemático elétrico. Para isso, os testes foram conduzidos de forma incremental, adicionando-se uma *task* de cada vez e ajustando o firmware conforme necessário, até que todos os circuitos funcionassem de maneira integrada e estável.

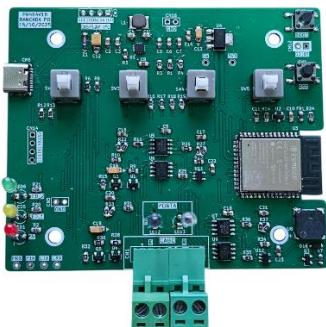


Fig. 13: Placa eletrônica montada.

A Fig. 14 apresenta a montagem final da Bancada PO, incluindo o *case* desenvolvido e impresso em impressora 3D. Nela, é possível observar a organização dos componentes na interface física, com destaque para os botões devidamente nomeados de acordo com suas funcionalidades operacionais. O cabo óptico possui a função de coletar a intensidade luminosa dos medidores e auxiliar no processo de calibração da porta óptica da bancada, a qual tem como objetivo simular as características ópticas de comunicação dos medidores reais. Os botões são utilizados para navegação e aplicação de comandos por meio do display, enquanto os LEDs indicadores têm as seguintes funções: L1 indica que a placa está energizada, L2 sinaliza a inicialização concluída e L3 representa o sistema em funcionamento.



Fig. 14: Bancada PO montada.

Durante a etapa inicial de validação, o foco foi a comunicação entre o Leitor Óptico e a bancada. O objetivo

era verificar se o sistema conseguia interpretar corretamente o comando recebido e enviá-lo de volta, mantendo a estrutura do pacote de dados. Esse pacote é composto por 258 bytes, contendo no início o identificador de resposta e, no final, o CRC, calculado de acordo com o conteúdo da mensagem. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 15, que ilustra a troca de dados entre os dispositivos. Nela, a ponteira verde representa a requisição proveniente do Leitor Óptico, enquanto a ponteira amarela indica a resposta gerada pela bancada, demonstrando que o sistema respondeu corretamente ao comando de teste e validando o funcionamento do protocolo de comunicação.

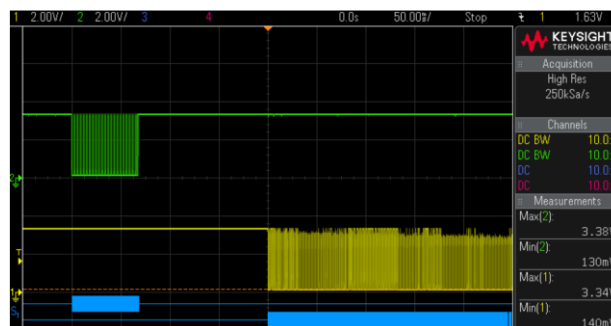


Fig. 15: Comunicação Leitor Óptico e Bancada.

Após a realização individual de cada teste, procedeu-se à fase prática de validação da bancada, voltada para a coleta da intensidade luminosa dos medidores. No menu inicial do sistema, é possível selecionar entre os setups A e B (Fig. 16), opção utilizada para permitir a avaliação de dois medidores simultaneamente durante o desenvolvimento. Para esta etapa, entretanto, a intensidade luminosa, seja mínima ou máxima, não influencia o processo de verificação, sendo selecionado apenas o setup A para a execução dos testes demonstrativos.



Fig. 16: Menu da bancada.

A etapa de medição (Fig. 17) consiste no processo em que o cabo óptico realiza a coleta da intensidade luminosa e a apresenta ao usuário em forma de corrente elétrica. Ao pressionar o botão F3, o sistema executa a coleta e exibe o valor medido no display. Essa medição pode ser repetida até três vezes, com o objetivo de verificar se há variação na intensidade emitida pelo medidor durante as coletas

sucessivas. Cada valor obtido é registrado manualmente em uma tabela, permitindo a comparação posterior entre as leituras e a análise da estabilidade da intensidade óptica.



Fig. 17: Etapa de medição.

A etapa de aplicação (Fig. 18) tem como objetivo reproduzir na porta óptica a intensidade luminosa previamente medida pelo cabo óptico. Ao pressionar o botão F4, o sistema aplica na porta óptica uma intensidade equivalente àquela registrada durante a medição do medidor, garantindo que a simulação ocorra de forma fiel e controlada. Essa função foi utilizada durante os testes para validar o comportamento da bancada e verificar a precisão da reprodução das intensidades medidas. Em modo de produção, entretanto, a aplicação será configurada para operar com valores fixos de intensidade mínima e máxima, assegurando a padronização do processo de calibração.



Fig. 18: Etapa de aplicação.

A etapa de validação (Fig. 19) tem como objetivo verificar se a bancada é capaz de validar corretamente o Leitor Óptico. Para realizar o teste, basta energizar a placa conforme suas especificações e conectar o cabo óptico à

bancada. Ao ser detectada a conexão, o leitor emite uma indicação sonora, confirmando que a comunicação com o servidor foi estabelecida. Em seguida, ao pressionar o botão de teste, o leitor inicia a comunicação com a bancada, e o teste é considerado aprovado quando a mensagem “teste ok” é exibida na tela de produção. Para o modo de produção, mensagens adicionais serão implementadas no display, com o objetivo de fornecer informações claras sobre o status do sistema durante a operação.



Fig. 19: Etapa de validação.

Com a bancada em funcionamento, foram coletados os dados de intensidade dos medidores homologados, apresentados nas tabelas a seguir. Nelas, o código corresponde à numeração atribuída ao medidor ao chegar à empresa, o modelo refere-se à designação fornecida pelo fabricante, e o valor medido representa a intensidade luminosa convertida em corrente, expressa em microampères (μA). A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os medidores da fabricante Landys.

TABELA I. INTENSIDADES MEDIDAS FABRICANTE 1.

CÓDIGO	MODELO	MEDIDO (UA)
023	E34A	03,53
009	E34A	03,60
014	E650-G1	04,97
031	SAGA 2000	07,79
002	SAGA 1000	07,90
036	SAGA 1000	08,05
029	E750-G1	08,73
096	E450	16,33
112	E450	16,35
054	E430	16,45
111	E430	16,55
001	E650-G2	17,03

A Tabela 2 reúne os resultados referentes aos medidores dos modelos Eletra, Nansem e Elo, complementando a análise comparativa das intensidades obtidas nas medições.

TABELA II. INTENSIDADE MEDIDAS FABRICANTES 1, 2 E 3.

CÓDIGO	MODELO	MEDIDA (UA)
070	KS70	10,45
041	KS70	10,75
095	ARES 7023	14,40
081	ARES 7021	15,48
027	ELO 2113	15,95
020	ELO 2113	16,10
097	ELO 2123-D	16,59

Com os resultados obtidos foi possível avaliar que a diferença entre intensidade entre os modelos homologados é considerável, e com os testes foi possível avaliar que medidores de mesmo modelo possuem intensidades aproximadas, o que é um sinal positivo e indica repetibilidade para os medidores de mesmo modelo que serão encontrados no cliente, com estas duas tabelas foi possível determinar os valores mínimos e máximos de intensidade que será aplicada a porta óptica da bancada.

Com as observações realizadas no momento dos testes foi identificado que a variação ficou dentro do esperado e assim foi definido que a tolerância para a bancada simular será de 10%, como podemos observar na tabela 3, que indica a tolerância mínima e máxima, e o modelo representativo daquela intensidade.

TABELA III. LIMITES DE INTENSIDADE.

INTENSIDADE	CORRENTE (UA)	MODELO
Mínima	03,53	E34A
Máxima	17,03	E650-G2

Após a conclusão de todas as etapas de teste, a bancada foi introduzida no ambiente de produção. Nessa fase, foi realizado o treinamento do colaborador responsável pelo manuseio do equipamento, e em seguida foram aplicados testes abrangentes com um lote de 30 leitores (Fig. 20).



Fig. 20: Lote de 30 Leitores para produção.

Com o intuito de validar da comunicação com os leitores ópticos nas intensidades mínimas e máximas. Esse procedimento permitiu avaliar o desempenho da bancada em

condições reais de operação, garantindo que todas as funcionalidades desenvolvidas se comportassem conforme o planejado durante as etapas de desenvolvimento e testes.

Para a avaliação da bancada, foram selecionados seis Leitores de forma aleatória (Fig. 21) e submetidos a alterações que simulam erros comuns ocorridos durante a montagem por terceiros. Cada leitor recebeu uma modificação específica, conforme o número de série:

- Serial 76: resistor do circuito receptor com valor incorreto;
- Serial 72: LED receptor com altura incorreta;
- Serial 91: LED receptor com tensão incorreta;
- Serial 81: resistor do circuito emissor com valor incorreto;
- Serial 01: LED emissor com altura incorreta;
- Serial 92: LED emissor com tensão incorreta.

Esse procedimento permitiu avaliar se a bancada seria capaz de identificar e lidar com falhas típicas, garantindo a confiabilidade do sistema mesmo diante de erros de montagem.



Fig. 21: Leitores modificados.

Cada leitor foi testado em níveis de intensidade mínima de 3,15uA (Fig. 22) e máxima de 18,80uA (Fig. 23), realizando-se três medições por condição, a fim de avaliar a repetibilidade e consistência do desempenho da bancada.



Fig. 22: Intensidade mínima.



Fig. 23: Intensidade máxima.

Nos leitores sem alterações ou defeitos, o processo de validação foi realizado com sucesso, sem apresentar problemas ou falhas durante a execução dos testes, ao receber uma comunicação óptica, o display apresenta o comando recebido (Fig. 24).



Fig. 24: Comando recebido.

Em seguida, é exibida a confirmação de que a operação ocorreu corretamente (Fig. 25), permitindo ao usuário acompanhar o fluxo de comunicação e verificar o funcionamento adequado da bancada.



Fig. 26: Leitor aprovado.

Nos leitores em que foram intencionalmente inseridos defeitos, todos os erros foram detectados corretamente pela bancada (Fig. 27), demonstrando a eficiência do sistema de validação. Esse resultado garante que os problemas identificados durante o desenvolvimento não voltarão a ocorrer em ambiente de produção, reforçando a confiabilidade do processo de teste.



Fig. 27: Leitor reprovado.

Após a validação em ambiente de produção, os 30 leitores foram testados utilizando os medidores de referência de intensidade luminosa. Os seis leitores que apresentaram defeitos durante os testes na bancada foram reprovados, uma vez que não conseguiram se comunicar corretamente em condições de intensidade mínima ou máxima. Os testes foram realizados nos medidores previamente catalogados como de baixa e alta luminosidade, garantindo que o desempenho da bancada fosse avaliado em toda a faixa operacional dos dispositivos.

IV. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados. Com este estudo, foi possível coletar os dados de intensidade luminosa de cada medidor e avaliar corretamente as variações existentes entre os diferentes modelos homologados.

Este processo aumenta a confiabilidade dos produtos e proporciona à empresa um controle mais preciso sobre o que é produzido, garantindo que cada produto atenda às tolerâncias de utilização previamente estabelecidas.

Dessa forma, verificou-se que a utilização da bancada no ambiente de produção é tecnicamente viável, já que o sistema foi capaz de detectar variações de incidência luminosa e apontar leitores que não atendiam aos parâmetros definidos, contribuindo diretamente para o aumento da confiabilidade do processo de validação.

V. REFERÊNCIA

- [1] FURLER, Walter et al. Electrical grid's load factor improvement from load modulations and advanced measurement infrastructure. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024.

- [2] FLÁVIO, Maia. Como aplicar a telemetria de energia em empresas e 29 indústrias, WAY2. 2021. Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/telemetria-deenergia/>. Acesso em: 5 outubro. 2025.
- [3] MCKENNA, Killian et al. Advanced Metering Infrastructure for Distribution Planning and Operation: Closing the loop on grid-edge visibility. IEEE Electrification Magazine, v. 10, n. 4, p. 58–65, 1 dez. 2022.
- [4] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14522:2008. Intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia elétrica - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.
- [5] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14519:2000. Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - Especificação. Rio de Janeiro, 2000.
- [6] ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9001:2015. Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos.
- [7] RIBEIRO, José Antônio J. Comunicações Ópticas. 4. ed. Rio de Janeiro: Érica, 2009. E-book. p.5. ISBN 9788536521930. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521930/>. Acesso em: 20 setembro. 2025.
- [8] ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 20473:2007. Óptica e fotônica — Bandas espectrais.
- [9] GUNDEPUDI, Karthikay et al. A review on the role of nanotechnology in the development of near-infrared photodetectors: materials, performance metrics, and potential applications. Journal of Materials ScienceSpringer, , 1 set. 2023.
- [10] ESPRESSIF. ESP32 Series Datasheet. 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 30 setembro. 2025.
- [11] EVERLIGHT. PT204-6C Datasheet. 2005. Disponível em: <https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docs/us/4819/PT204-6C.pdf>. Acesso em: 28 outubro. 2025.
- [12] ANALOG DEVICES. AD5220 Datasheet. 2010. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5220.pdf>. Acesso em: 28 outubro. 2025.
- [13] MICROCHIP. MCP6001/2/4 Datasheet. 2019. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MSLD/ProductDocuments/DataSheets/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>. Acesso em 15 outubro. 2025.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. SN74LV1T34 Datasheet. 2013. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lv1t34.pdf?ts=1763367176964&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FSN74LV1T34%252Fpart-details%252FSN74LV1T34DBVR. Acesso em: 15 outubro. 2025
- [15] EVERLIGHT. IR204-A Datasheet. 2010. Disponível em https://www.mouser.com/catalog/specsheets/everlight_ever-s-a0003161355-1.pdf. Acesso em: 25 de outubro. 2025.
- [16] DIODES INCORPORATED. BC817 Datasheet. 2016. Disponível em: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds11107.pdf>. Acesso em 25 de outubro de 2025.