

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

DANIEL MALCUM TREIN

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE
AQUISIÇÃO DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR**

PORTO ALEGRE - RS

2025

DANIEL MALCUM TREIN

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE
AQUISIÇÃO DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Nome do orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

PORTO ALEGRE - RS

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

T787p Trein, Daniel Malcum.

Projeto e desenvolvimento de um sistema autônomo de aquisição de dados de radiação solar / Daniel Malcum Trein. - Porto Alegre/RS, 2025.

59 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Unidade Universitária em Porto Alegre, 2025.

1. Radiação solar. 2. Arduino. 3. Datalogger. 4. Instrumentação. I. Haag, Rafael. II. Título.

DANIEL MALCUM TREIN

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE
AQUISIÇÃO DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Haag

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Haag
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs)

Prof. Dr. Celso Maciel da Costa
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (Uergs)

MSc. Raiana Schirmer Soares
USP - Centro Brasil no Clima

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo suporte fundamental durante a graduação. O apoio de vocês foi a base para que eu concluísse esta etapa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Haag, obrigado pela orientação, pela troca de conhecimentos e pela disponibilidade em todas as fases do projeto.

Aos professores da UERGS, pela dedicação e comprometimento com o curso, fundamentais para a minha formação profissional.

Aos meus amigos, obrigado pela parceria e pela descontração que tornaram essa caminhada mais leve.

RESUMO

O conhecimento preciso da disponibilidade do recurso solar local é indispensável para diversas aplicações estratégicas. Contudo, a obtenção desses dados primários é frequentemente limitada pelo elevado custo das estações meteorológicas convencionais. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema autônomo de aquisição de dados de radiação solar de baixo custo, baseado na plataforma Arduino Uno e em sensores de tecnologia fotovoltaica. A metodologia consistiu no projeto de um circuito de condicionamento de sinal utilizando amplificadores de instrumentação (AD620), integrado a módulos de armazenamento (Cartão SD) e referência temporal (RTC), garantindo a operação autônoma do dispositivo através de baterias de Íon-Lítio. Para a validação, realizou-se uma campanha de medição comparativa entre o protótipo e um piranômetro de referência de termopilha (classe *First Class*). Os resultados demonstraram que o estágio analógico do sistema obteve alta fidelidade ($R^2 \approx 0,99$), porém, a etapa de conversão digital apresentou limitações de resolução e sensibilidade a ruídos, resultando em um erro de energia acumulada de -6,4%. Conclui-se que o dispositivo desenvolvido é uma ferramenta viável para estimativas gerais de disponibilidade do recurso solar e aplicações didáticas, embora a arquitetura de digitalização atual restrinja seu uso como instrumentação de referência.

Palavras-chave: Radiação Solar; Arduino; *Datalogger*; Instrumentação.

ABSTRACT

Precise knowledge of local solar resource availability is indispensable for various strategic applications. However, obtaining such primary data is often limited by the high cost of conventional meteorological stations. In this context, this work presents the development and validation of a low-cost autonomous solar radiation data acquisition system based on the Arduino Uno platform and photovoltaic technology sensors. The methodology consisted of designing a signal conditioning circuit using instrumentation amplifiers (AD620), integrated with storage modules (SD Card) and temporal reference (RTC), ensuring the device's autonomous operation through Li-Ion batteries. For validation, a comparative measurement campaign was carried out between the prototype and a thermopile reference pyranometer (First Class). The results showed that the system's analog stage achieved high fidelity ($R^2 \approx 0,99$), however, the digital conversion stage presented limitations regarding resolution and noise sensitivity, resulting in an accumulated energy error of -6.4%. It is concluded that the developed device is a viable tool for general estimates of solar resource availability and didactic applications, although the current digitization architecture restricts its use as reference instrumentation.

Keywords: Solar Radiation; Arduino; Datalogger; Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro eletromagnético.....	15
Figura 2 - Comparativo entre a radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar e curva típica de um corpo negro de 6000k	16
Figura 3 – Pinagem Arduino Uno	22
Figura 4 - Placa do Arduino Uno utilizada como controladora central.....	24
Figura 5 e 6 - Display LCD equipado com interface de comunicação I2C	25
Figura 7 - Módulo amplificador AD620 utilizado no projeto	25
Figura 8 – Circuito esquemático do Módulo Amplificador de Instrumentação AD620	26
Figura 9 - Esquema de ligação e diagrama do módulo amplificador AD620.....	26
Figura 10 - Módulo de expansão para registro de dados e RTC.....	27
Figura 11 - Piranômetro de referência EKO MS-410.....	27
Figura 12 - Placa de circuito impresso para regulação de tensão (8V e 5V).....	29
Figura 13 - Projeto da disposição dos componentes internos	30
Figura 14 - Vista interna do dispositivo, exibindo a conexão entre baterias, placas e o microcontrolador.....	31
Figura 15 – Fluxograma da inicialização do sistema.....	32
Figura 16 e 17 - Interface de visualização em tempo real no display LCD.....	33
Figura 18 - Esquema de ligação do ajuste de <i>offset</i>	34
Figura 19 – Piranômetros de referência e fotovoltaico instalados em campo	35
Figura 20 – Diagrama esquemático das conexões para coleta de dados	36
Figura 21 - Protótipo finalizado e pronto para operação em campo.....	37
Figura 22 - Consistência Interna: Rastreamento do Software sobre o Hardware.....	38
Figura 23 - Resposta do Hardware Analógico frente à Referência.	38
Figura 24 - Validação Final: Perfil diário do Protótipo vs. Referência.....	39
Figura 25 - Verificação da linearidade da conversão analógico-digital.....	41
Figura 26 - Variabilidade do Hardware Analógico vs. Piranômetro Fotovoltaico	42
Figura 27 – Piranômetro de Referência vs Piranômetro Fotovoltaico	43
Figura 28 - Validação Final: Dispersão entre Protótipo e Piranômetro Fotovoltaico ..	44
Figura 29 - Comparativo da Irradiação Solar acumulada na medição do dia 04/12..	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre tecnologias de sensores de irradiância	20
Tabela 2 - Comparativo técnico entre as principais placas Arduino	21
Tabela 3 – Estimativa de consumo de potência dos componentes.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
CSV	Valores Separados por Vírgula
GND	Terra
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICR	<i>Ion-Lithium Cylindrical Rechargeable</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LCD	Display de Cristal Líquido
LED	Emissor de Luz
PCI	Placa de Circuito Impresso
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RTC	Relógio de Tempo Real
SD	Cartão de Memória
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivos Específicos	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	14
2.1.1 Radiação Solar e a atmosfera terrestre	15
2.1.2 Grandezas Radiométricas: Irradiância e Irradiação	17
2.2 SENSORES DE IRRADIÂNCIA	18
2.3.1 Plataforma Arduino	20
2.3.2 Arduino Uno	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	23
3.2 METODOLOGIA.....	28
3.2.1 Projeto e dimensionamento	28
3.2.2 Desenvolvimento e integração	30
3.2.3 Calibração e validação	33
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO FINAL	37
4.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	37
4.3 ANÁLISE DE VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO	39
4.4 DESEMPENHO ENERGÉTICO	45
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO	51
APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO	56

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial, aliado às demandas cada vez maiores por conforto e avanços tecnológicos, tem intensificado a pressão sobre os sistemas de geração de energia (Oliveira; Mario; Pacheco, 2021). Visto que há uma iminente escassez de combustíveis fósseis e uma necessidade global de alternativas que reduzam os impactos ambientais, torna-se essencial buscar soluções energéticas renováveis. Nesse contexto, observa-se um significativo crescimento na demanda por energia solar fotovoltaica. Para o dimensionamento eficiente e a previsão de geração desses sistemas, o conhecimento preciso da disponibilidade do recurso solar local é indispensável.

Entretanto, existe uma lacuna significativa na disponibilidade dessas informações. Enquanto os dados obtidos via satélite oferecem cobertura global, eles muitas vezes carecem da resolução temporal e espacial que apenas as medições em solo podem oferecer. Por outro lado, a instalação capilarizada de estações de referência enfrenta a barreira do elevado investimento inicial, o que acaba restringindo o monitoramento de precisão a grandes institutos de pesquisa e deixando vastas regiões dependentes de estimativas genéricas.

Diante desse cenário, este trabalho investiga a viabilidade técnica de uma arquitetura de medição baseada em sensores fotovoltaicos e microcontroladores de hardware livre. O foco reside na validação experimental de um protótipo que, embora utilize componentes de baixo custo, aplica rigor de engenharia no condicionamento de sinais e na aquisição de dados, avaliando se tal solução pode atuar como uma ferramenta confiável para estudos preliminares de potencial solar e aplicações didáticas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é projetar, desenvolver e validar um sistema autônomo de baixo custo para aquisição e armazenamento de dados de radiação solar global, utilizando a plataforma Arduino e sensores fotovoltaicos.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em: i) dimensionar e construir o circuito de condicionamento de sinal analógico para adequar a saída do sensor à faixa dinâmica do microcontrolador; ii) desenvolver o firmware para leitura, processamento em tempo real, exibição em display LCD e armazenamento de dados em cartão SD; iii) implementar um sistema de alimentação autônomo baseado em baterias de íon-lítio, garantindo a operação independente do protótipo; e iv) realizar a comparação estatística dos dados medidos pelo protótipo com um piranômetro de referência (EKO MS-410), avaliando a linearidade, o erro médio e a confiabilidade do sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo fundamenta os conceitos físicos e técnicos necessários para o desenvolvimento do sistema proposto. Inicialmente, abordam-se os princípios da radiação solar, sua interação com a atmosfera e as grandezas radiométricas envolvidas. Em seguida, discute-se a tecnologia de sensores de irradiância, comparando termopilhas a fotodiodos. Por fim, apresenta-se a arquitetura de microcontroladores, com ênfase nas especificações da plataforma Arduino Uno e suas limitações de conversão analógico-digital.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

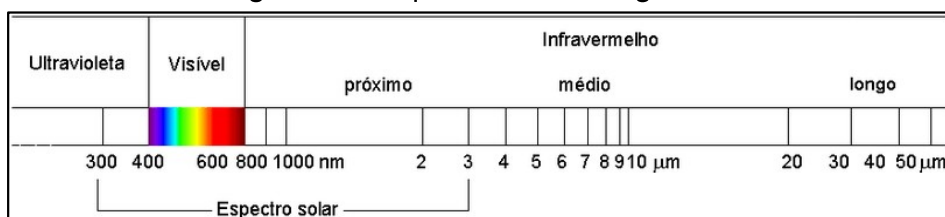
O Sol constitui a principal fonte de energia para os processos naturais e para o desenvolvimento das atividades humanas na Terra. Do ponto de vista físico, ele funciona como um imenso reator de fusão nuclear, no qual núcleos de hidrogênio se combinam para formar hélio sob condições extremas de pressão e temperatura, liberando quantidades enormes de energia térmica. Essa energia é inicialmente conduzida da região central para as camadas externas através da zona radiativa, onde ocorre transporte por radiação, e da zona convectiva, na qual o calor é transferido por movimentos de massas gasosas quentes (IQBAL, 1983). Ao atingir a fotosfera, camada visível do Sol com cerca de 330 km de espessura e temperatura média de aproximadamente 5.800 K, a energia é emitida principalmente na forma de radiação visível (Silva; Araújo, 2022). A fotosfera apresenta uma superfície granulada, composta por grânulos com cerca de 1.500 km de diâmetro e duração média de 10 minutos, evidenciando os processos convectivos que transportam o gás quente da camada interna. Entre esses grânulos, encontram-se regiões mais frias e densas que retornam ao interior solar. Além disso, a fotosfera abriga as manchas solares, áreas de temperatura reduzida em torno de 3.800 K na região central (umbra) e ligeiramente mais elevada na periferia (penumbra), que indicam intensa atividade magnética e seguem ciclos de aproximadamente 11 anos, alternando períodos de máxima e mínima ocorrência (Silva; Araújo, 2022).

A partir da fotosfera, essa energia é irradiada para o espaço em todas as direções sob a forma de ondas eletromagnéticas. A radiação solar é, portanto, a propagação dessa energia através do vácuo, viajando à velocidade da luz ($c \approx$

$3 \times 10^8 \text{ m/s}$). A energia leva aproximadamente 8 minutos e 20 segundos para percorrer a distância média entre o Sol e a Terra, que é de cerca de 150 milhões de quilômetros, ou uma Unidade Astronômica (Vignola *et al.*, 2012).

Essa radiação não é uniforme, mas composta por fótons de diferentes energias, caracterizando o espectro eletromagnético solar (IQBAL, 1983). Este espectro abrange uma vasta gama de comprimentos de onda e frequências, incluindo o ultravioleta, o visível e o infravermelho, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de DORNELLES (2008)

A distribuição da energia ao longo dessas faixas determina a eficiência com que diferentes tecnologias de conversão, como células fotovoltaicas, podem capturar e transformar a energia solar em eletricidade. Compreender o espectro solar é, portanto, essencial para o dimensionamento de sistemas de geração de energia e para a análise da disponibilidade do recurso solar em diversas regiões.

2.1.1 Radiação Solar e a atmosfera terrestre

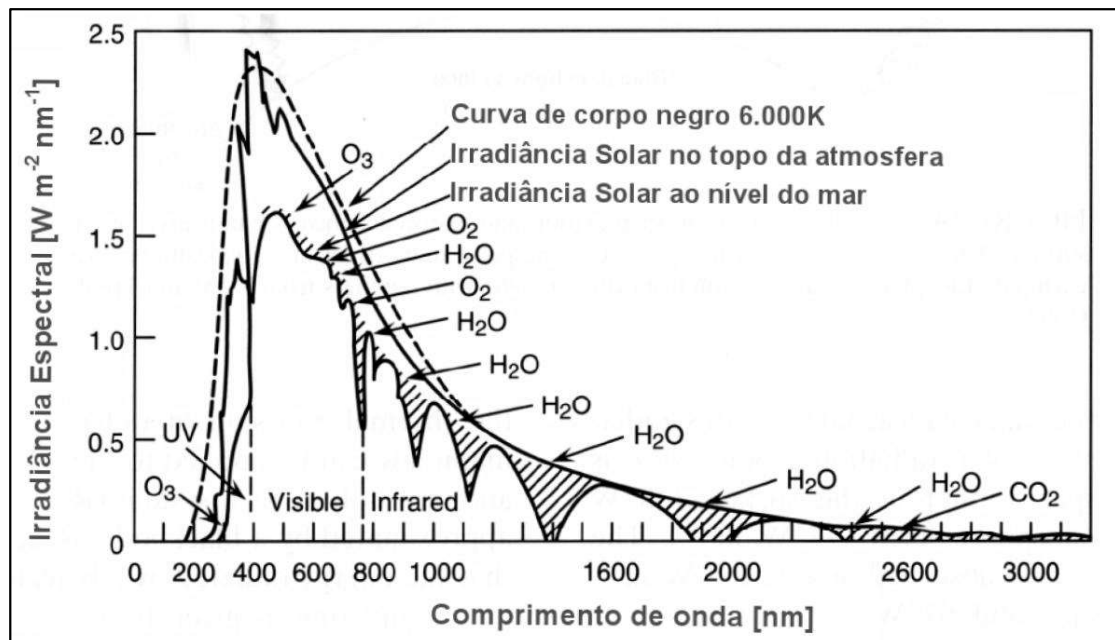
Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar não chega diretamente à superfície, mas passa por uma série de processos que reduzem sua intensidade. Parte da energia é absorvida por gases presentes na atmosfera, como o oxigênio, o ozônio e o vapor d'água, enquanto outra parcela é espalhada por moléculas e partículas em suspensão, incluindo aerossóis e poeira (Gómez *et al.*, 2018). Esses mecanismos de depleção, que modificam tanto a intensidade quanto a qualidade do espectro solar, são divididos em duas categorias principais, a absorção e o espalhamento.

O primeiro fenômeno, a absorção, é um processo seletivo no qual a energia da radiação é convertida em calor por gases atmosféricos. Os principais gases responsáveis por esta absorção em comprimentos de onda curtos são o vapor d'água

(H₂O), o ozônio (O₃), o oxigênio (O₂) e o dióxido de carbono (CO₂) (Gómez *et al.*, 2018).

A Figura 2 ilustra a distribuição espectral da radiação solar. Observa-se que, no topo da atmosfera, a curva apresenta alta correlação com a emissão teórica de um corpo negro a 6000 K. Contudo, ao atingir o nível do mar, o espectro sofre atenuação significativa devido aos mecanismos de depleção, sendo possível identificar os comprimentos de onda de absorção causadas por gases que compõe a atmosfera.

Figura 2 - Comparativo entre a radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar e curva típica de um corpo negro de 6000k



Fonte: HAAG (2007).

O segundo mecanismo, o espalhamento, ocorre quando a radiação solar colide com moléculas de gás ou partículas em suspensão (como poeira e aerossóis) e é redirecionada em múltiplas direções. É este processo que dá origem à radiação difusa, componente da radiação solar que atinge a superfície vindo de todas as partes do céu, e não apenas do disco solar (Vignola *et al.*, 2012).

Como consequência dos processos de interação atmosférica descritos anteriormente, a radiação solar atinge a superfície terrestre dividida em três componentes distintos. A compreensão desses componentes é essencial para a correta instrumentação e análise de dados solarimétricos (Vignola *et al.*, 2012).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é classificada de acordo com sua interação atmosférica. A componente denominada radiação direta corresponde

ao fluxo de energia que atravessa a atmosfera sem sofrer desvios significativos, incidindo sobre a superfície diretamente do disco solar. Em contrapartida, os processos de espalhamento por moléculas de ar e nuvens originam a radiação difusa, que atinge a superfície proveniente de toda extensão do céu, e não apenas de um ponto focal. A soma destas duas parcelas resulta na radiação global, que representa a energia total disponível e é a grandeza padrão monitorada em estações meteorológicas. Adicionalmente, quando se analisa superfícies inclinadas, deve-se considerar a radiação refletida, que consiste na fração da energia global que incide no solo e retorna ao ambiente, cuja intensidade é proporcional ao coeficiente de reflexão da superfície, conhecido como albedo.

2.1.2 Grandezas Radiométricas: Irradiância e Irradiação

Uma vez compreendido o fenômeno físico da radiação solar e seus componentes, para a finalidade de aquisição de dados e engenharia é fundamental quantificar este fenômeno através de suas grandezas radiométricas. Embora o termo "radiação" descreva o processo de transferência de energia, as métricas padrões para sua medição são a Irradiância (uma medida de potência) e a Irradiação (uma medida de energia). Para a correta aquisição de dados, é crucial diferenciar estas duas grandezas:

Irradiância (G): É a taxa instantânea de energia solar que incide sobre uma unidade de área, ou seja, a densidade de potência do fluxo radiante. A unidade padrão para a irradiância é o Watt por metro quadrado (W/m^2). Em um dia claro, ao meio-dia, a irradiância global em uma superfície horizontal pode se aproximar de $1000 W/m^2$. O objetivo do dispositivo deste trabalho é medir esta grandeza em tempo real.

Irradiação (H): Refere-se à energia cumulativa total incidente sobre uma unidade de área durante um intervalo de tempo especificado (por exemplo, uma hora ou um dia). A irradiação é a integração da irradiância ao longo do tempo. Suas unidades são de energia por área, comumente expressas em Watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2) ou Joule por metro quadrado (J/m^2). O cálculo do "total diário" no dispositivo refere-se a esta grandeza.

A relação entre Irradiação (H) e Irradiância (G) para um período de tempo de t_1 a t_2 é expressa pela Equação 1:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (1)$$

Onde H é a irradiação (Energia), expressa em Joules por metro quadrado (J/m^2) ou Watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2), $G(t)$ é a função da irradiância instantânea (Potência) no tempo t e o diferencial de tempo é representado por dt .

Para sistemas de aquisição de dados digitais, onde a leitura não é contínua, mas sim discreta (amostrada a cada intervalo Δt), essa integral é aproximada por um somatório (IQBAL, 1983):

$$H \approx \sum_{i=1}^n G_i * \Delta t \quad (2)$$

Essa distinção é crucial para o dispositivo desenvolvido, pois enquanto o sensor mede a irradiância instantânea, o microcontrolador deve processar esses dados para calcular a irradiação acumulada diária.

2.2 SENSORES DE IRRADIÂNCIA

A medição sistemática da radiação solar global, que representa a energia total (direta mais difusa) disponível em uma superfície horizontal, é uma prática padrão realizada por agências meteorológicas e centros de pesquisa. O instrumento padrão universalmente utilizado para essa finalidade é o piranômetro. Os piranômetros são projetados para medir a irradiância global incidente em uma superfície plana a partir de um ângulo sólido hemisférico (todo o céu).

Para aplicações que exigem o detalhamento das componentes da radiação, utilizam-se instrumentos complementares. A componente direta é medida por pireliômetros, instrumentos de campo de visão estreito que necessitam ser montados em rastreadores solares para acompanhar a trajetória do Sol. Já a componente difusa é obtida através de piranômetros equipados com um anel ou disco de sombreamento, que bloqueia a incidência direta do disco solar, permitindo ao sensor registrar apenas a radiação espalhada pela atmosfera (IQBAL, 1983).

Embora a função final seja a mesma, gerar um sinal elétrico proporcional à irradiância incidente (W/m^2), os piranômetros podem ser construídos com base em diferentes princípios físicos de transdução. As duas tecnologias predominantes são

os sensores baseados em termopilhas (térmicos) e os sensores baseados em fotodiodos (fotovoltaicos).

A distinção fundamental entre eles reside na resposta espectral e no tempo de resposta:

Sensores Térmicos (Termopilhas): Operam baseados no efeito Seebeck, onde a diferença de temperatura entre uma superfície negra (que absorve a radiação) e o corpo do instrumento gera uma tensão elétrica. Possuem a vantagem de uma resposta espectral plana e ampla, absorvendo igualmente quase todos os comprimentos de onda solar. Contudo, apresentam maior inércia térmica, resultando em um tempo de resposta mais lento (Vignola *et al.*, 2012).

Sensores Fotovoltaicos (Fotodiodos de Silício): Baseiam-se no efeito fotoelétrico, onde os fótons incidentes geram uma corrente elétrica. São caracterizados por uma resposta instantânea (microsegundos), mas possuem uma sensibilidade espectral seletiva (geralmente restrita à faixa de 400 a 1100 nm). Segundo Brooks (2008), apesar dessa limitação, eles são amplamente utilizados devido ao baixo custo. Neste contexto, Victoria et al. (2007) corroboram que o uso de piranômetros com sensores fotoelétricos se apresenta como uma alternativa viável aos tradicionais sensores termoelétricos, permitindo a expansão de redes de medição através da redução significativa dos custos de instrumentação, desde que aplicadas as devidas correções.

A Tabela 1 resume as principais diferenças operacionais entre estas duas classes de sensores.

Tabela 1 - Comparativo entre tecnologias de sensores de irradiância

Característica	Sensores Térmicos	Sensores Fotovoltaicos
Princípio de Medição	Diferença de temperatura (eletricidade gerada pelo calor absorvido).	Efeito fotoelétrico. Corrente de curto-circuito proporcional ao fluxo de fótons.
Resposta Espectral	Ampla e Plana (~285 a 3.000 nm). Atua virtualmente como um corpo negro.	Restrita e Seletiva (~400 a 1.100 nm). Sensível apenas a uma parte do espectro.
Tempo de Resposta	Lento (segundos a dezenas de segundos) devido à inércia térmica.	Quase instantâneo (microsegundos). Ideal para detectar variações rápidas de nuvens.
Precisão/Usos	Alta, ideal para medições meteorológicas de referência e pesquisa	Moderada. Adequada para aplicações de baixo custo e monitoramento de desempenho de painéis PV
Custo	Elevado (~R\$ 10.000,00)	Baixo. (~R\$ 100,00)
Principais Fontes de Erro	Compensagem Térmica	Erro Espectral (devido à cegueira para UV e IR).

Fonte: O Autor (2025)

2.3 MICROCONTROLADOR

OS Microcontroladores são circuitos integrados compactos que reúnem, os componentes essenciais de um computador: processador (CPU), memória e periféricos de entrada e saída (I/O). Diferentemente de microprocessadores de uso geral, eles são projetados para aplicações dedicadas e sistemas embarcados, priorizando baixo custo, consumo energético reduzido e autonomia para controlar dispositivos externos, como sensores e atuadores (GIMENEZ, 2002).

2.3.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* (código e hardware abertos), criada na Itália em 2005. Segundo Banzi (2011), o objetivo do projeto foi simplificar o desenvolvimento de aplicações interativas, integrando uma

placa com microcontrolador a um ambiente de desenvolvimento (IDE) amigável, dispensando o uso de ferramentas complexas de engenharia.

Devido à sua flexibilidade, a plataforma se ramificou em diversos modelos (Nano, Mega, Uno), cada um com especificações distintas de processamento e quantidade de portas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparativo técnico entre as principais placas Arduino

Especificação	Arduino Nano	Arduino Mega ADK	Arduino Uno
Microcontrolador	ATmega328 / 168	ATmega2560	ATmega328
Dimensões Aprox.	1,85 x 4,32 cm	10,1 x 5,3 cm	6,8 x 5,3 cm
Entradas Analógicas	8 pinos	16 pinos	6 pinos
E/S Digitais (Total)	14 pinos	54 pinos	14 pinos
Saídas PWM	6 pinos	15 pinos	6 pinos
Memória Flash	16 KB ou 32 KB	256 KB	32 KB
Velocidade de Clock	16 MHz	16 MHz	16 MHz
Tensão de Alimentação	7 a 12V (Rec.)	7 a 12V (Rec.)	7 a 12V (Rec.)

Fonte: Adaptado de Arduino.cc (2025)

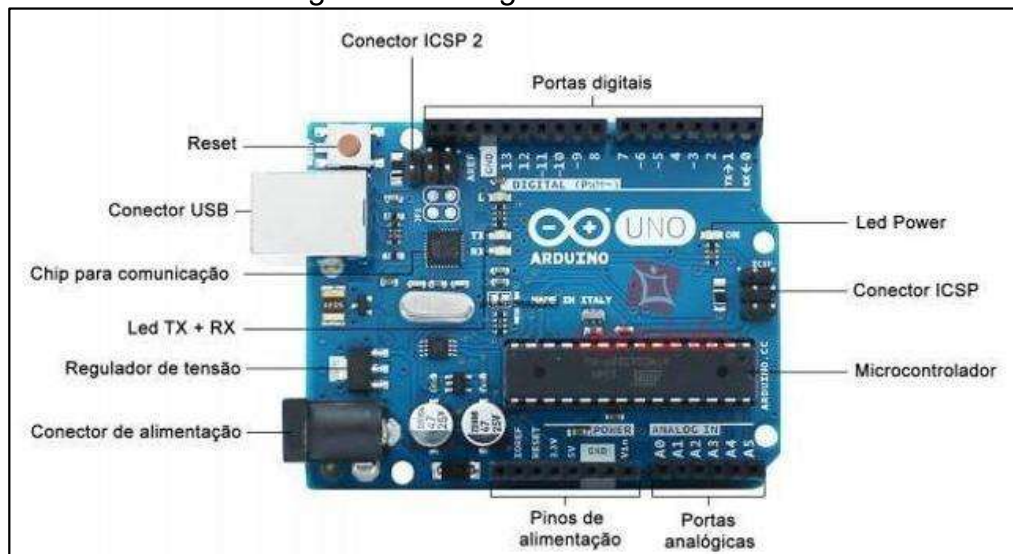
2.3.2 Arduino Uno

Para a implementação do sistema de aquisição de dados proposto, selecionou-se o modelo Arduino Uno, escolha fundamentada na sua ampla disponibilidade no mercado nacional, documentação robusta e relação custo-benefício favorável. Esta placa opera sob o comando do microcontrolador ATmega328P, funcionando a uma frequência de clock de 16 MHz. A alimentação do circuito pode ser realizada tanto pela conexão USB padrão (5V) quanto por uma fonte externa via conector jack P4, sendo recomendada uma tensão de entrada entre 7V e 12V para garantir a estabilidade do regulador de tensão interno.

Conforme ilustrado na Figura 3, a interface física da placa dispõe de 14 terminais digitais, utilizados neste projeto para o gerenciamento lógico dos módulos periféricos de armazenamento e visualização. No entanto, para a instrumentação do piranômetro, o foco recai sobre as seis entradas analógicas (A0 a A5).

O funcionamento destas portas baseia-se em um Conversor Analógico-Digital (ADC) interno de 10 bits, que traduz o sinal elétrico contínuo em uma escala numérica discreta de 0 a 1023. Essa especificação define o limite de sensibilidade do *datalogger*, operando com uma referência padrão de 5V, o sistema consegue distinguir apenas variações de tensão superiores a 4,88 mV, fator que impacta diretamente a resolução dos dados coletados.

Figura 3 – Pinagem Arduino Uno



Fonte: UsinaInfo (2025)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a infraestrutura técnica e o roteiro experimental adotados para a construção do sistema de aquisição de dados. A estrutura a seguir detalha, primeiramente, as especificações dos componentes físicos e lógicos (hardware e software) selecionados para o projeto. Na sequência, descreve-se a metodologia aplicada, segmentada nas etapas de dimensionamento, integração e validação dos resultados.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Subsistema de Alimentação

Como fonte de energia, foram utilizadas duas células de Íon-Lítio, modelo 18650. Cada célula possui tensão nominal de 3,7 V (4,2 V em carga plena) e capacidade nominal medida em laboratório de aproximadamente 2200 mAh.

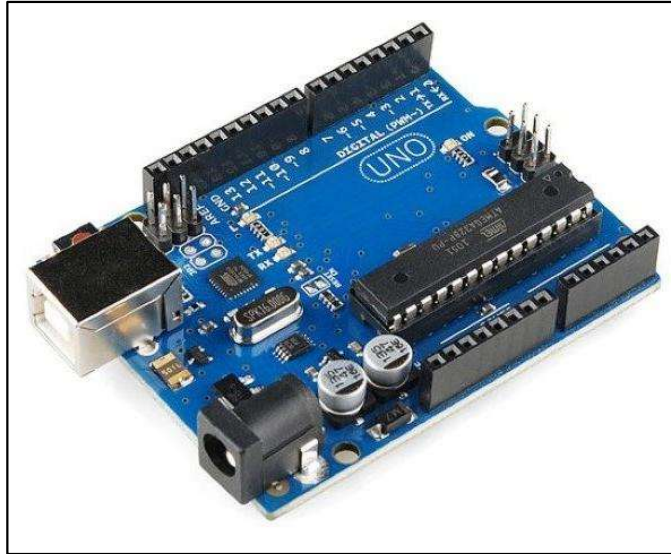
Para atender à tensão de operação do Arduino (que requer no mínimo 7 V na entrada V_{in} para garantir a estabilidade do regulador interno), as baterias foram conectadas em série. Esta configuração fornece uma tensão nominal de 7,4 V e uma tensão máxima de 8,4 V, suficiente para alimentar tanto o microcontrolador quanto os estágios de amplificação.

Sensoriamento e tratamento de sinal

O sensor utilizado para a coleta de dados é um piranômetro fotovoltaico de silício. Conforme aferição, o fator de sensibilidade deste instrumento é de $7,88\mu\text{V/W/m}^2$.

Como unidade central de processamento, optou-se pela utilização da placa de desenvolvimento Arduino Uno. A escolha desta plataforma justifica-se pela sua robustez comprovada em prototipagem e pela facilidade de programação em linguagem baseada em C/C++.

Figura 4 - Placa do Arduino Uno utilizada como controladora central

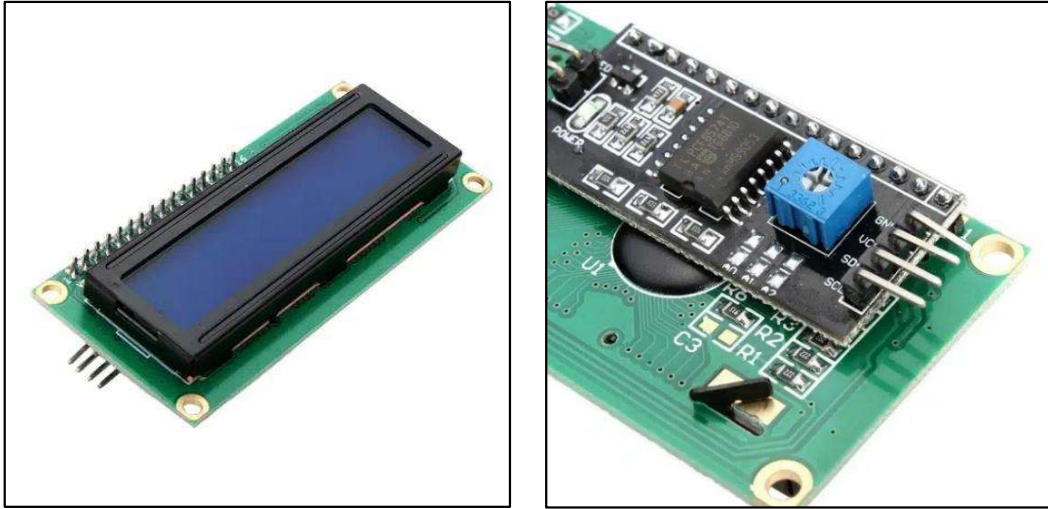


Fonte: MakerHero (2025)

Para permitir a verificação instantânea do funcionamento do sistema e a leitura dos valores de irradiação em tempo real, foi incorporado um display de cristal líquido (LCD).

A fim de otimizar a montagem e reduzir a quantidade de fios, o que minimiza riscos de mau contato e falhas mecânicas, o display foi equipado com um adaptador de comunicação serial (I2C). Esta tecnologia permite que o envio de informações da controladora para a tela seja feito utilizando apenas dois cabos de sinal, tornando a arquitetura interna do dispositivo mais limpa e organizada.

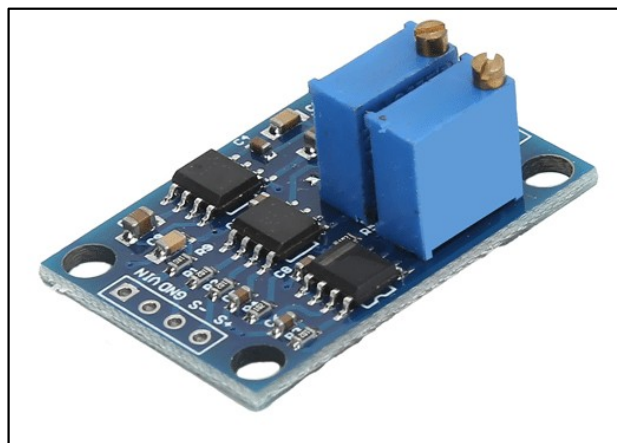
Figura 5 e 6 - Display LCD equipado com interface de comunicação I2C



Fonte: MakerHero (2025)

Para realizar o condicionamento do sinal analógico, foi integrado ao sistema um módulo baseado no amplificador de instrumentação AD620. A função principal deste componente é atuar como um multiplicador de sinal: ele pega a tensão milimétrica gerada pelo piranômetro e a amplia centenas de vezes para que o Arduino consiga lê-la com clareza.

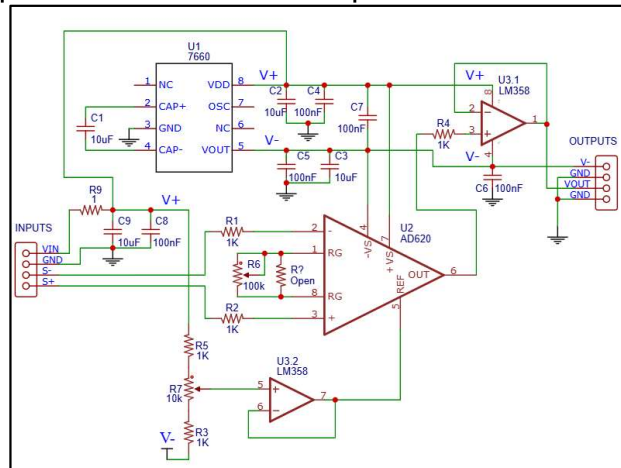
Figura 7 - Módulo amplificador AD620 utilizado no projeto



Fonte: MakerHero (2025)

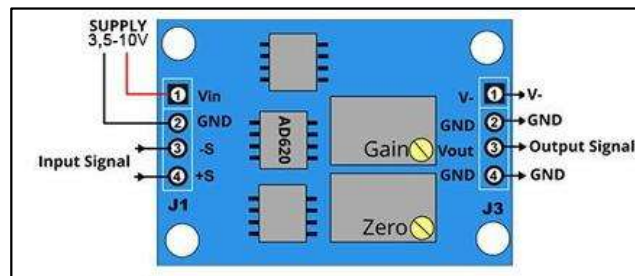
Outra característica deste módulo é a presença do circuito integrado 7660, que funciona como um conversor de tensão, capaz de gerar uma tensão negativa a partir de uma tensão positiva. Ele é comumente utilizado para criar fontes de alimentação simétricas.

Figura 8 – Circuito esquemático do Módulo Amplificador de Instrumentação AD620



Fonte: Protosupplies (2025)

Figura 9 - Esquema de ligação e diagrama do módulo amplificador AD620.



Fonte: UsinaInfo (2025)

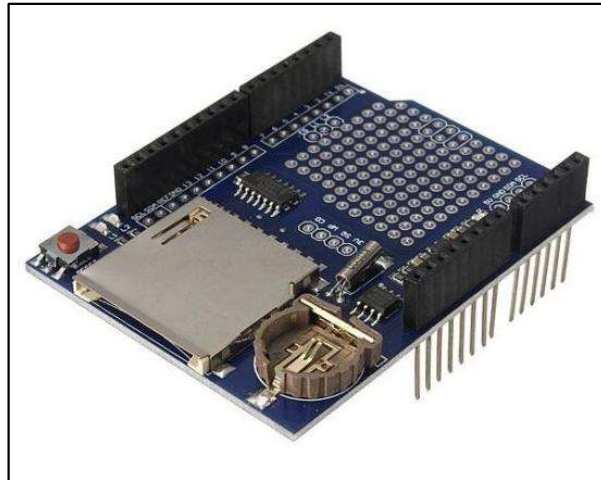
Datalogger

Para que o sistema pudesse operar de forma autônoma em campo, sem a necessidade de estar conectado a um computador, foi acoplado ao controlador um módulo de expansão conhecido como *Datalogger Shield*. Este componente agrega duas funções vitais para o monitoramento solar:

Registro Temporal (RTC): Possui um Relógio de Tempo Real com bateria independente, que mantém a contagem precisa da data e hora mesmo quando o equipamento é desligado. Isso é fundamental para estudos de radiação solar, pois permite saber exatamente em que momento do dia cada variação de luminosidade ocorreu.

Armazenamento: Dispõe de uma entrada para cartão de memória SD, onde os dados são salvos sequencialmente em formato de texto (.CSV). Isso garante a integridade dos dados acumulados ao longo de dias ou semanas de medição.

Figura 10 - Módulo de expansão para registro de dados e RTC.



Fonte: MakerHero (2025)

Instrumentação de Referência

Para a calibração e validação dos dados coletados pelo protótipo, estabeleceu-se um método comparativo com um instrumento de classe meteorológica. O equipamento adotado como padrão foi o piranômetro EKO MS-410, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Piranômetro de referência EKO MS-410



Fonte: Ammonit (2025)

Este instrumento baseia-se em um sensor de termopilha e é classificado como 'First Class' (Primeira Classe) segundo a norma ISO 9060. Diferentemente dos sensores de fotodiodo, o MS-410 possui uma cúpula de vidro de precisão e uma resposta espectral plana que abrange a faixa de 285 a 3000 nm, garantindo a medição

correta da radiação global independentemente da composição espectral da luz solar. Além disso, apresenta um tempo de resposta inferior a 18 segundos e estabilidade térmica otimizada, sendo amplamente utilizado em estações de monitoramento solarimétrico e pesquisa científica.

Para o registro e armazenamento dos dados de referência, bem como para a validação cruzada dos sinais analógicos, utilizou-se um *datalogger* de alto desempenho, modelo Graphtec LOGGER GL200. Este equipamento se destaca por garantir alta imunidade a ruídos, característica essencial para a leitura precisa de tensões na ordem de microvolts geradas pelo piranômetro de referência. Com 10 canais analógicos configuráveis para leitura de tensão, o dispositivo oferece uma resolução de 16 bits, o que permite capturar variações sutis no sinal. Além disso, sua capacidade de armazenamento em memória flash interna ou via USB externa, aliada a um intervalo de amostragem configurável a partir de 100 ms, torna-o uma ferramenta robusta para o registro contínuo e confiável dos dados experimentais (GRAPHTEC, 2025).

3.2 METODOLOGIA

A abordagem metodológica foi estruturada de forma sequencial para garantir a robustez do protótipo e a confiabilidade das medições. O desenvolvimento do trabalho foi dividido em três etapas fundamentais: o projeto e dimensionamento teórico dos subsistemas, a integração física e desenvolvimento do firmware, e, por fim, a calibração e validação experimental frente a um instrumento de referência.

3.2.1 Projeto e dimensionamento

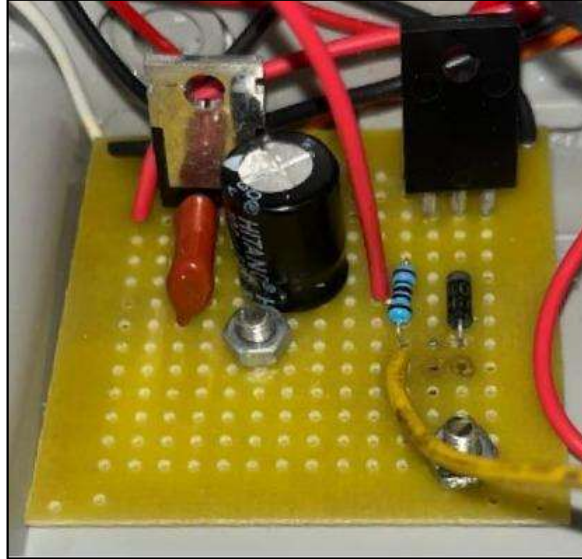
Para garantir a integridade dos componentes e a precisão das leituras analógicas, foi desenvolvida uma Placa de Circuito Impresso (PCI) dedicada à regulação de tensão, utilizando reguladores lineares da família 78XX:

Regulador LM7808: Responsável por reduzir a tensão das baterias para 8,0 V estáveis, alimentando a entrada Vin do Arduino. Isso evita o superaquecimento do regulador interno da placa Arduino;

Regulador LM7805: Responsável por fornecer uma tensão constante e precisa de 5,0 V para o amplificador operacional e periféricos sensíveis.

O circuito inclui capacitores de desacoplamento na entrada e na saída dos reguladores para filtrar ruídos de alta frequência e evitar oscilações na linha de alimentação. O circuito elétrico completo pode ser visto no apêndice B.

Figura 12 - Placa de circuito impresso para regulação de tensão (8V e 5V).



Fonte: O Autor (2025)

Tabela 3 – Estimativa de consumo de potência dos componentes.

Componente	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
Arduino Uno + Shield	8,0	50	400
Amplificador AD620	5,0	1	5
Display LCD (Backlight on)	5,0	145	725
TOTAL	-	196	1130

Fonte: O Autor (2025)

Considerando uma capacidade total de 2200 mAh e o consumo total estimado, a autonomia teórica do sistema T em um cenário conservador é calculada por:

$$T = \frac{\text{Capacidade}_{bateria} \times 0,85}{\text{Corrente}_{carga}} \quad (4)$$

Onde aplica-se um fator de 0,85 (85%) para considerar a eficiência de descarga e perdas nos reguladores, resultando em uma autonomia aproximada 9 horas e 32 minutos.

Em relação ao tratamento de sinal, a sensibilidade do sensor ($7,88 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$) impõe um desafio técnico de interfaceamento. Para uma irradiância máxima esperada de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, o sensor geraria uma tensão de apenas 7,88 mV.

O Arduino Uno possui um Conversor Analógico-Digital (ADC) de 10 bits operando em 5 V, o que resulta em uma resolução de:

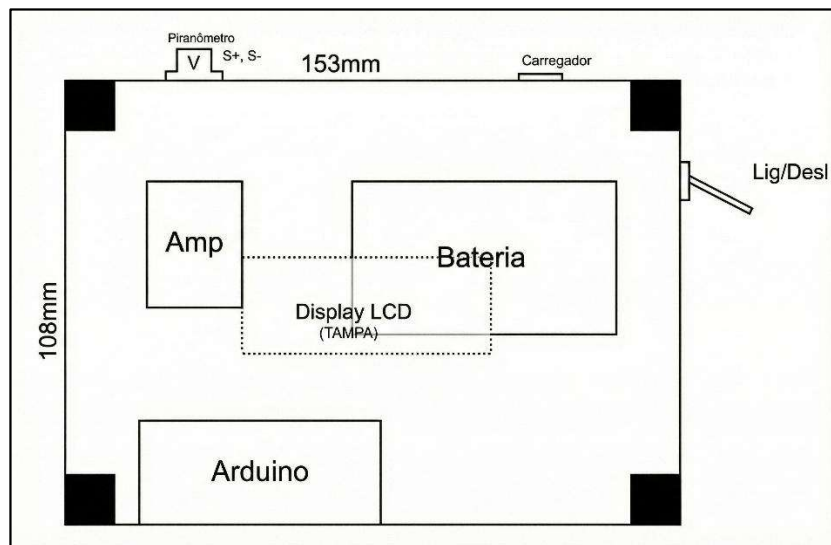
$$\text{Resolução} = \frac{5V}{1024} \approx 4,88mV \quad (5)$$

Sem amplificação, o sinal máximo do sensor (7,88 mV) seria lido como apenas 1 ou 2 degraus digitais, tornando a medição impossível. Portanto, a utilização de um estágio de amplificação é obrigatória para adequar o sinal à faixa dinâmica do ADC (0 a 5 V).

3.2.2 Desenvolvimento e integração

Antes de iniciar a montagem física, foi realizado um estudo de layout para definir uma disposição ergonômica dos componentes internos, visando otimizar o espaço e o cabeamento. A Figura 13 apresenta a concepção visual do projeto.

Figura 13 - Projeto da disposição dos componentes internos

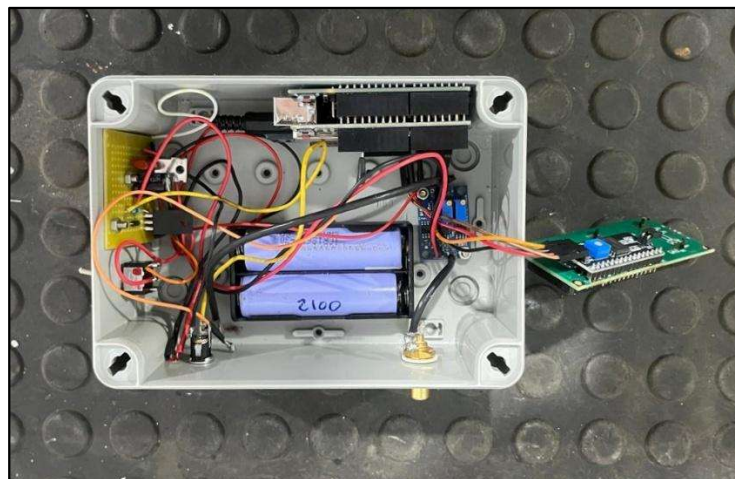


Fonte: O Autor (2025)

Para alojar o sistema, utilizou-se uma caixa em ABS de padrão industrial, adaptada com cortes na tampa frontal para o encaixe do display e furações laterais para a passagem dos cabos de alimentação e do sensor. Dessa forma, a caixa atua como suporte estrutural e proteção mecânica para o protótipo portátil.

A montagem interna seguiu a topologia projetada, com as baterias fixadas na base para garantir estabilidade. Em paralelo à entrada do sensor, foi adicionado um resistor de $1M\Omega$. Sua função consiste em referenciar o sinal ao terra, forçando a entrada para o nível zero quando não há tensão proveniente do sensor, o que elimina leituras residuais indesejadas durante a noite.

Figura 14 - Vista interna do dispositivo, exibindo a conexão entre baterias, placas e o microcontrolador



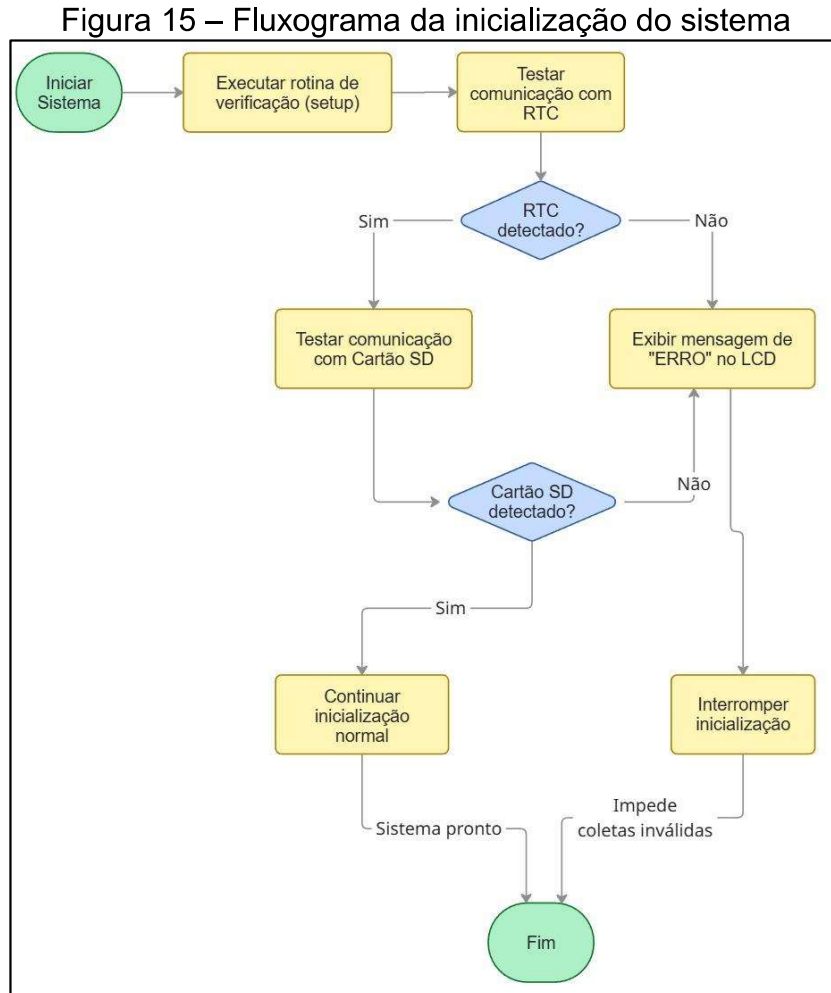
Fonte: O Autor (2025)

O software embarcado foi desenvolvido não apenas para registrar dados, mas também para fornecer feedback em tempo real ao usuário sobre a integridade do sistema através da interface visual.

Autodiagnóstico e Inicialização

Ao ser ligado, o sistema executa uma rotina de verificação (setup). O firmware testa a comunicação com o módulo RTC e com o Cartão SD. Caso algum desses periféricos falhe ou não seja detectado, o sistema exibe uma mensagem de "ERRO" no display LCD e interrompe a inicialização, impedindo que o usuário realize coletas

inválidas sem perceber. O Fluxograma ilustrado na Figura 15, representa o processo de autodiagnóstico e Inicialização do sistema.



Fonte: O Autor (2025)

Estratégia de Aquisição e Interface

Superada a inicialização, o sistema entra em um ciclo contínuo com frequência de amostragem definida em 5 segundos. A cada ciclo, são realizadas as seguintes operações:

Processamento: Leitura do sensor, conversão para (W/m^2) e integração da energia acumulada (Wh/m^2).

Datalogging: Gravação de uma linha no arquivo .CSV contendo Data, Hora, Irradiância Instantânea, Mínimos/Máximos e Total Acumulado.

Feedback Visual: O display LCD atua como a interface primária de confirmação de funcionamento. A tela alterna automaticamente as informações exibidas,

mostrando ora os valores instantâneos, ora os valores acumulados e de pico. A atualização constante dos valores na tela serve como feedback visual para o operador, confirmando que o processador está ativo e que o ciclo de leitura e gravação está ocorrendo conforme o programado.

Figura 16 e 17 - Interface de visualização em tempo real no display LCD



Fonte: O Autor (2025)

3.2.3 Calibração e validação

Como o sensor utilizado é um componente adaptado, a calibração foi fundamental para garantir a veracidade dos dados. O processo ocorreu em duas etapas.

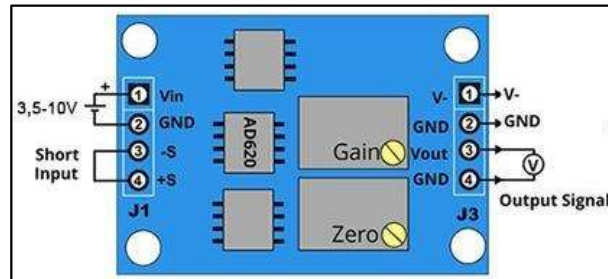
Ajuste do Zero (Offset Elétrico)

A primeira etapa visou eliminar tensões residuais que poderiam distorcer as leituras de baixa irradiância. Com a entrada do sensor em curto-circuito (simulando ausência total de luz), atuou-se no trimpot de ajuste de *offset* do módulo amplificador.

O objetivo foi buscar a tensão de saída mais próxima possível de 0,0 V. Conforme demonstrado na Figura 19, foi possível alcançar uma tensão residual de

apenas 0,1 mV. Este ajuste fino assegura que o sistema interprete corretamente a escuridão noturna como "zero", evitando o registro de radiação inexistente.

Figura 18 - Esquema de ligação do ajuste de offset



Fonte: UsinalInfo (2025)

Ajuste de Ganho e Validação

A calibração da sensibilidade (ganho) foi realizada empiricamente através do método de comparação, utilizando um piranômetro de referência sob luz solar real.

Durante os primeiros testes em dia de céu limpo, identificou-se um fenômeno de saturação no horário de meio-dia solar: o ganho estava excessivamente alto, fazendo com que a tensão de saída ultrapassasse o limite de 5V do Arduino, "ceifando" os picos de irradiação. O problema foi corrigido reduzindo-se o ganho via hardware (trimpot) e recalculando o fator de conversão no software. Após este ajuste fino, o sistema demonstrou linearidade em todo o espectro diário, validando sua capacidade de monitoramento contínuo.

Após a primeira calibração, o sistema foi submetido a algumas horas de teste, em um dia de céu limpo para validar a linearidade do ganho comparando com um piranômetro de referência de termopilha. O sistema se mostrou eficiente e linear fora dos horários de pico de irradiação, nesses horários, o amplificador saturou o sinal, devido a utilização de um ganho maior do que o sistema suportaria. Então o ganho foi ajustado novamente para um valor onde o sistema identificasse o sinal corretamente em todos os horários de um dia.

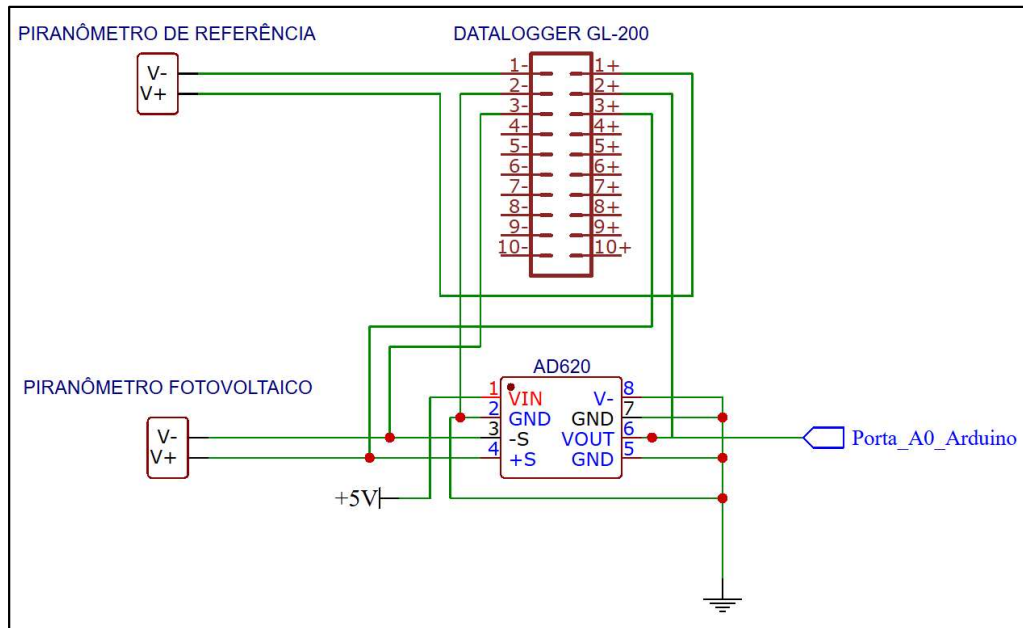
Figura 19 – Piranômetros de referência e fotovoltaico instalados em campo



Fonte: O Autor (2025)

Para a execução da validação cruzada, montou-se um setup experimental específico. A utilização deste registrador externo independente foi fundamental para a metodologia de diagnóstico de erros, funcionando como uma ferramenta de validação cruzada. O equipamento foi configurado para monitorar três sinais distintos simultaneamente, permitindo comparar o desempenho de cada etapa do projeto. Em uma das entradas, conectou-se diretamente o sinal do piranômetro de referência, obtendo-se a leitura da radiação real com máxima fidelidade. Nas outras duas entradas, monitorou-se a tensão de entrada do amplificador (sinal gerado pelo piranômetro fotovoltaico) e a tensão de saída do amplificador (sinal enviado ao Arduino), conforme detalhado no diagrama esquemático da Figura 20.

Figura 20 – Diagrama esquemático das conexões para coleta de dados



Fonte: O Autor (2025)

Essa estratégia de ligação, ilustrada acima, permitiu segregar o desempenho do circuito de condicionamento de sinal, monitorado com alta precisão pelo *datalogger* externo, da performance do sistema de aquisição digital processado pelo Arduino. Essa análise cruzada foi fundamental para comprovar que o amplificador entregava o sinal de tensão corretamente e identificar que a degradação da qualidade dos dados ocorria na etapa posterior, especificamente durante a conversão analógico-digital.

Para garantir a clareza na discussão dos resultados, definem-se os termos adotados com base nos pontos de medição do diagrama. O Piranômetro de Referência corresponde aos dados do padrão EKO MS-410 registrados no Canal 1. O Piranômetro Fotovoltaico refere-se ao sinal de tensão bruto monitorado no Canal 3, capturando a entrada do amplificador. Já o Amplificador (Hardware) representa a tensão na saída do circuito AD620 (Canal 2), avaliando o funcionamento da eletrônica analógica isoladamente. Por fim, o Protótipo (Arduino) designa o valor digital final gravado no cartão SD, dado que engloba a resposta sistêmica, incluindo sensor, amplificação, conversão A/D e o processamento de software.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO FINAL

O sistema desenvolvido resultou em um equipamento compacto e portátil. A integração dos módulos no interior do gabinete garantiu a robustez mecânica necessária para operações em campo, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Protótipo finalizado e pronto para operação em campo



Fonte: O Autor (2025)

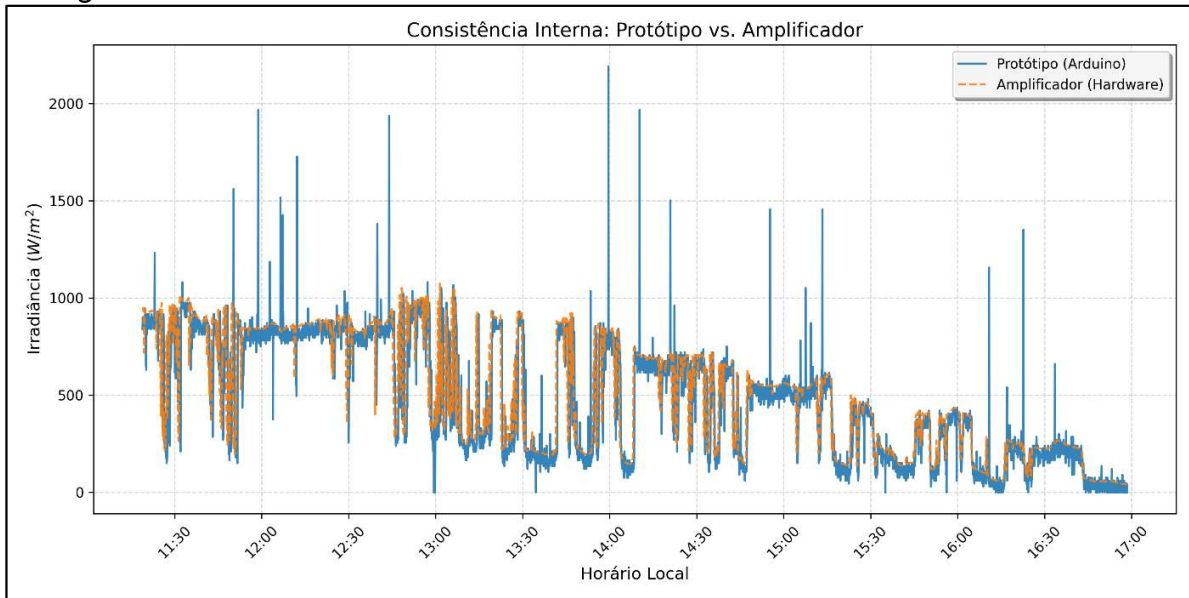
A disposição interna dos componentes priorizou a estabilidade das conexões elétricas e a facilidade de manutenção. O banco de baterias posicionado na base conferiu estabilidade física ao conjunto, enquanto o posicionamento do shield de datalogger permitiu fácil acesso ao cartão de memória SD para a extração dos dados.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Para a validação do sistema, analisaram-se os dados coletados durante o dia 03 de dezembro de 2025. A apresentação dos resultados segue uma lógica de diagnóstico, partindo da validação interna do sistema para a comparação externa.

Primeiramente, a Figura 22 sobrepõe à leitura digital do protótipo com a saída de tensão do amplificador (convertida para W/m^2).

Figura 22 - Consistência Interna: Rastreamento do Software sobre o Hardware

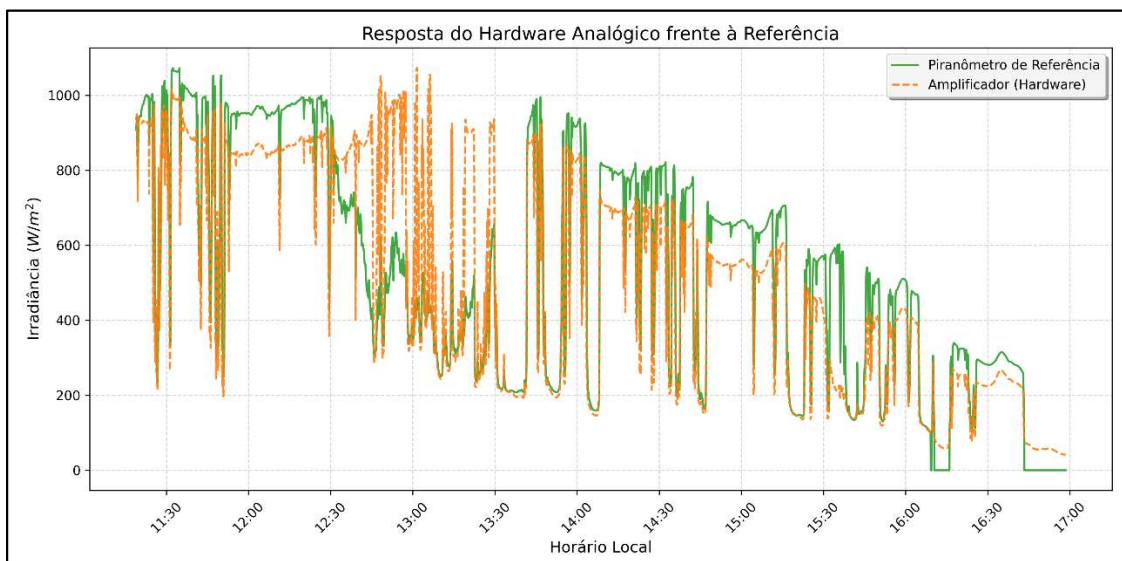


Fonte: O Autor (2025)

Diferentemente do esperado, a sobreposição não foi perfeita. Observam-se diversas anomalias e picos de ruído na leitura do protótipo que não correspondem a variações suaves de tensão, com registros ultrapassando $2.000 W/m^2$. Isso indica a presença de ruído elétrico, induzido diretamente na porta analógica do microcontrolador ou instabilidade na conversão A/D.

Na sequência, a Figura 23 compara a resposta do hardware analógico (Amplificador) diretamente com a referência (EKO MS-410).

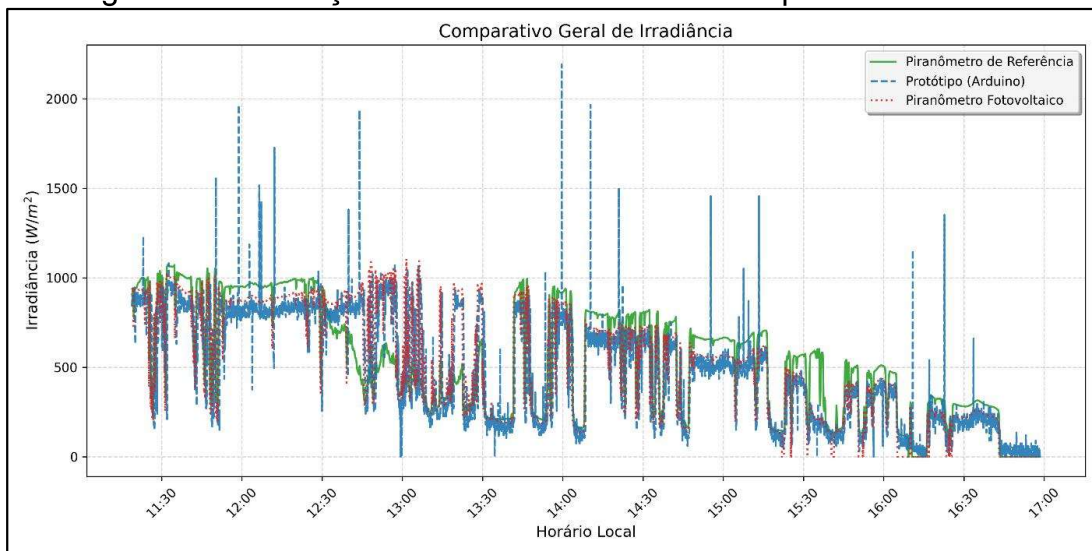
Figura 23 - Resposta do Hardware Analógico frente à Referência.



Fonte: O Autor (2025)

Observa-se uma concordância muito positiva entre a saída do hardware e o instrumento padrão. O amplificador reproduziu corretamente o comportamento da irradiância solar ao longo do dia. O fato de a curva de referência estar levemente acima é compreensível neste ensaio de campo específico. Como operamos em condições não ideais de medida, sujeitas a obstáculos que causam interferência e sombreamento nos sensores, essa diferença de magnitude reflete apenas o ambiente de instalação, e não um erro do circuito, validando esta etapa do projeto. Por fim, a Figura 24 apresenta a validação final do sistema completo.

Figura 24 - Validação Final: Perfil diário do Protótipo vs. Referência



Fonte: O Autor (2025)

Ao observar os dados, percebe-se uma instabilidade que não existe no equipamento de referência. A curva do protótipo apresenta picos de interferência que distorcem a medição instantânea, indicando que o circuito digital não conseguiu filtrar os ruídos elétricos do ambiente.

4.3 ANÁLISE DE VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO

Para quantificar a precisão do protótipo, foram calculadas duas métricas estatísticas fundamentais para instrumentação:

- RMSE (*Root Mean Square Error*): A Raiz do Erro Quadrático Médio representa o desvio padrão das diferenças entre a medição e a

referência. Grosso modo, indica a magnitude média do "erro" em W/m². Quanto maior o valor, menor a precisão.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (P_i - R_i)^2}{n}} \quad (6)$$

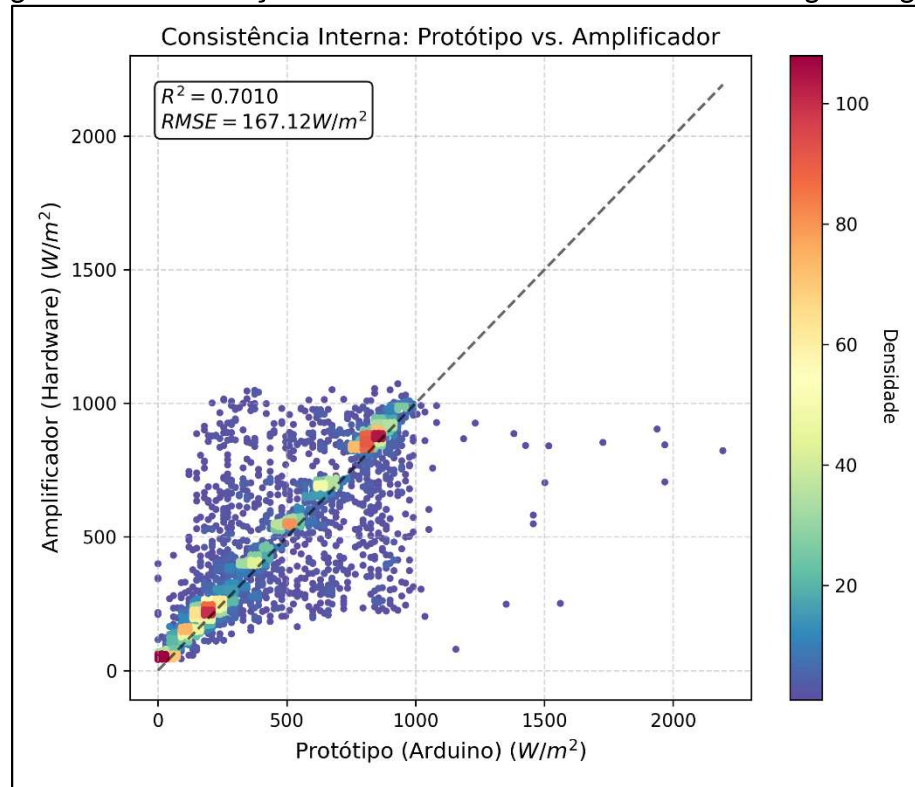
b) Coeficiente de Determinação (R^2): Indica o quão bem os dados do protótipo se ajustam aos dados da referência em uma regressão linear. Varia de 0 a 1, onde 1 indicaria uma cópia perfeita do comportamento do padrão.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (7)$$

A análise de regressão linear seguiu a mesma sequência lógica visando isolar as fontes de incerteza, partindo da consistência interna, para a validação dos dados externos.

A análise de regressão linear iniciou-se pela verificação interna do sistema, apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Verificação da linearidade da conversão analógico-digital

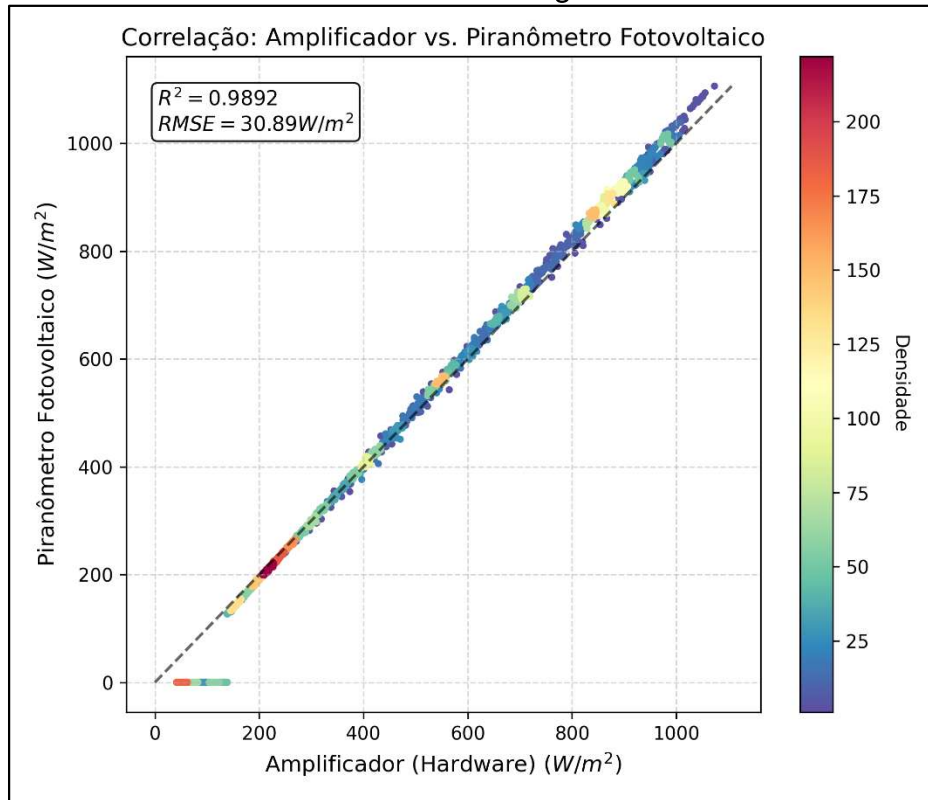


Fonte: O Autor (2025)

O coeficiente obtido foi de $R^2 \approx 0,70$. Este resultado não comprova a robustez interna esperada (que seria próxima de 1,0). A dispersão indica que, mesmo antes de comparar com o sol real, o próprio sistema introduz erros entre o sinal que sai do amplificador e o que é gravado pelo Arduino, confirmando a hipótese de ruídos eletromagnéticos afetando a conversão A/D.

A Figura 26 exibe a correlação entre o Hardware (Amplificador) e o piranômetro fotovoltaico.

Figura 26 - Variabilidade do Hardware Analógico vs. Piranômetro Fotovoltaico

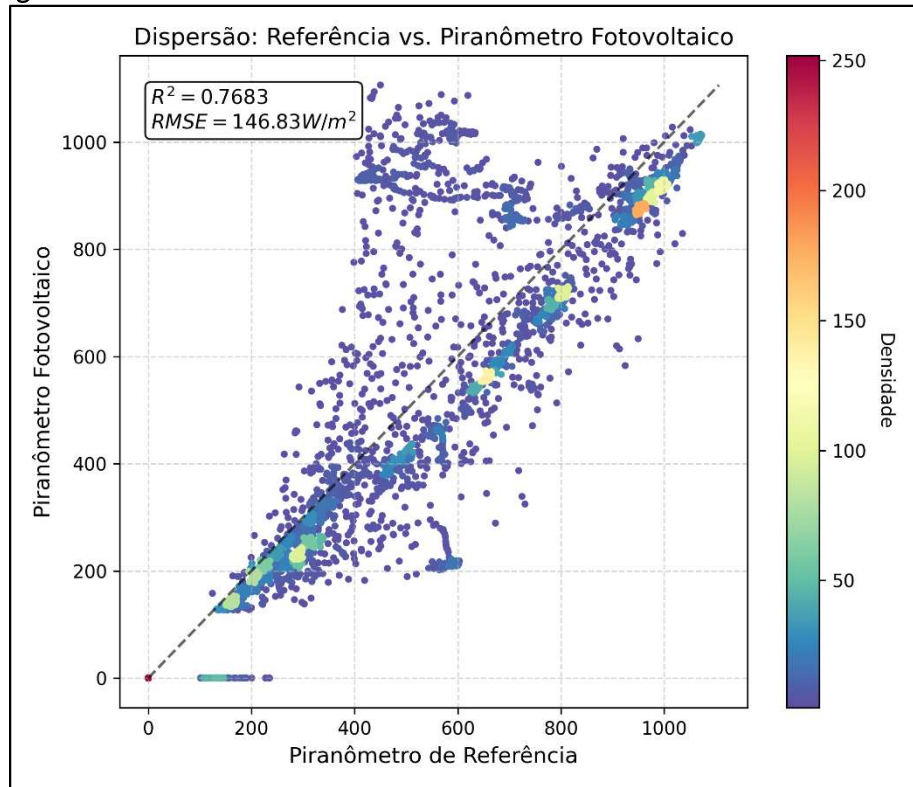


Fonte: O Autor (2025)

Conforme o observado no gráfico, o coeficiente R^2 próximo de 1,0 valida a linearidade do estágio de amplificação frente ao sensor fotovoltaico. fica evidente que o circuito analógico possui alta fidelidade em relação ao padrão. O hardware reproduziu fielmente o sinal de entrada, apresentando poucos desvios. Essas pequenas variações são atribuídas ao ruído elétrico do amplificador, consideradas desprezíveis para o objetivo deste estudo.

Os dados indicam, portanto, que a principal fonte de erro está na etapa de digitalização do microcontrolador. Embora a degradação do sinal seja clara, não foi possível determinar nesta fase se a causa é a resolução limitada do conversor A/D (10 bits) ou a indução de ruídos na entrada analógica, restando esta investigação para um diagnóstico futuro. A fim de verificar a qualidade do sensor isoladamente, desconsiderando as perdas do sistema digital, a Figura 27 apresenta a correlação direta entre o Piranômetro Fotovoltaico e o Piranômetro de Referência.

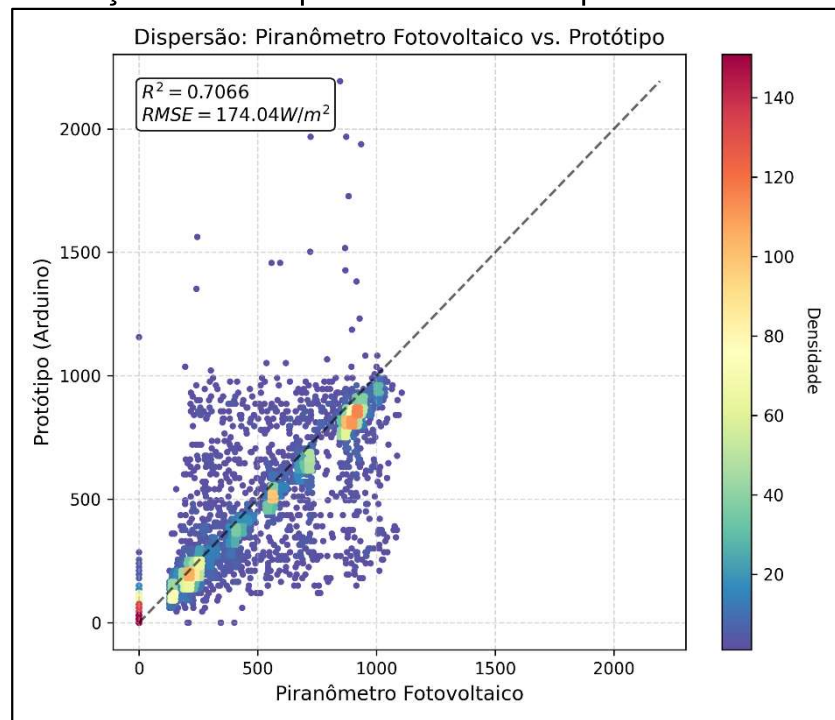
Figura 27 – Piranômetro de Referência vs Piranômetro Fotovoltaico



Fonte: O Autor (2025)

O comportamento observado na curva, com um R^2 de 0,76, era esperado dadas as condições de instalação em campo aberto não controlado. A principal divergência deve-se à incidência de sombras em momentos diferentes sobre cada sensor. Para evitar que fatores externos comprometam a avaliação técnica, definiu-se que o gráfico de dispersão final comparará o protótipo diretamente com o piranômetro fotovoltaico, garantindo uma análise justa e livre de erros de sombreamento. Seguindo essa premissa, a Figura 28 apresenta a correlação final de dispersão entre o protótipo desenvolvido e o sensor fotovoltaico.

Figura 28 - Validação Final: Dispersão entre Protótipo e Piranômetro Fotovoltaico



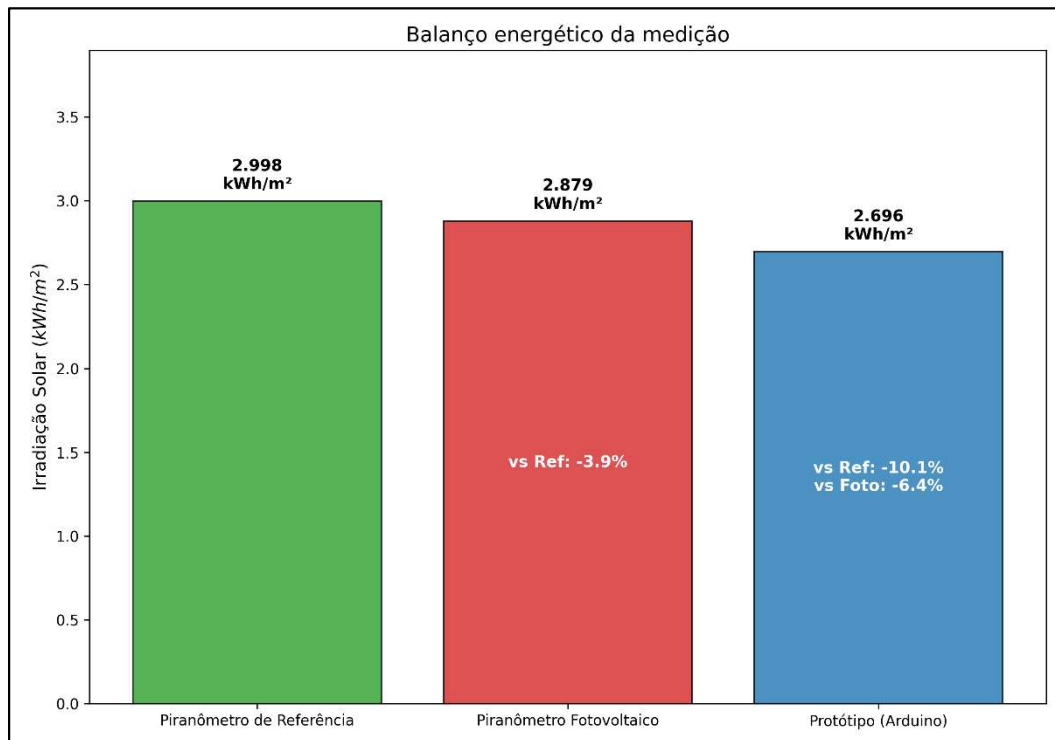
Fonte: O Autor (2025)

Os resultados demonstram uma correlação moderada, com $R^2 \approx 0,71$ e um RMSE de $174 W/m^2$. Considerando a alta linearidade observada anteriormente na etapa analógica, estes valores confirmam que a distorção dos dados é introduzida especificamente na interface com o microcontrolador, apontando para limitações críticas na estabilidade da conversão A/D ou falhas de isolamento do circuito digital. Estatisticamente, o protótipo em sua versão atual não atende aos requisitos para medição de irradiância instantânea.

4.4 DESEMPENHO ENERGÉTICO

Apesar das limitações na medição instantânea, a integração da irradiância ao longo da medição realizada (Irradiação Solar em kWh/m²) foi calculada para verificar a utilidade do sistema em balanços energéticos.

Figura 29 - Comparativo da Irradiação Solar acumulada na medição do dia 04/12



Fonte: O Autor (2025)

Para o período analisado, o protótipo registrou um erro acumulado de -10,1% em relação à referência principal. Para contextualizar este resultado, observa-se que o piranômetro fotovoltaico também apresentou um desvio negativo de -3,9%. Ao comparar o protótipo diretamente com o sensor fotovoltaico, a diferença diminuiu para -6,4%. Embora a soma da Irradiação ao longo do tempo tenha compensado as anomalias da medição, a diferença restante ainda compromete a confiabilidade do equipamento. Na prática, o sistema se mostrou útil para estimativas gerais de disponibilidade de energia solar, mas não tem a estabilidade necessária para ser usado como referência técnica.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, seguindo seu objetivo principal, desenvolveu-se a arquitetura de hardware e software de um *datalogger* destinado ao monitoramento de parâmetros solares. Os subsistemas digitais periféricos, incluindo o armazenamento em cartão SD, o relógio de tempo real (RTC) e a interface de display, operaram conforme o projeto, garantindo a autonomia e a funcionalidade do sistema em campo. A validação experimental permitiu caracterizar o comportamento do equipamento frente a um padrão de referência, trazendo diagnósticos importantes sobre a arquitetura eletrônica desenvolvida.

Apesar disso, identificaram-se algumas limitações: a ocorrência de anomalias nos registros superiores a 2.000 W/m^2 , cuja origem exata permanece desconhecida e demandará uma análise mais aprofundada em trabalhos futuros, e a perda de qualidade durante a digitalização, onde a diferença entre a tensão estável do amplificador e o valor gravado confirmou que a entrada do Arduino atua como o fator limitante da precisão atual.

A análise cruzada dos dados demonstrou que o circuito do amplificador apresentou alta fidelidade, com um $R^2 \approx 1,0$ em relação ao sensor fotovoltaico. Portanto, as divergências observadas foram atribuídas na etapa de digitalização e interface com o microcontrolador.

A análise estatística final, apresentando um erro de energia acumulada de $-6,4\%$, demonstra que o protótipo é viável para um sistema de monitoramento acessível. Embora este valor represente uma melhoria significativa em relação à dispersão instantânea, a margem de erro situa o equipamento fora da classe de instrumentos meteorológicos de precisão. Conclui-se, assim, que o dispositivo desenvolvido é uma ferramenta funcional para estimativas de disponibilidade de recurso solar e aplicações didáticas, mas que ainda necessita de refinamento nos estágios de conversão digital para aplicações de maior rigor.

Visando a evolução do projeto e a correção das limitações diagnosticadas, recomenda-se para trabalhos futuros a ampliação da campanha de validação, com coletas contínuas ao longo de vários dias de céu claro e sob diferentes condições meteorológicas, de modo a verificar a repetibilidade das medições e identificar com maior precisão a origem das anomalias observadas. Além disso, sugere-se a realização de testes de longa duração com a entrada do sistema em curto-circuito,

permitindo distinguir se o ruído registrado é próprio de componentes eletrônicos ou se é induzido externamente por interferências ambientais. Por fim, após a mitigação dos ruídos elétricos, propõe-se a substituição do conversor analógico-digital nativo do Arduino (10 bits) por um módulo ADC externo de 16 bits, elevando a resolução de amostragem de 1024 para 65.536 níveis e possibilitando a detecção de variações mais sutis de irradiância, especialmente em períodos de baixa insolação.

REFERÊNCIAS

- AMMONIT. **EKO MS-410 First Class Pyranometer**. Disponível em: <https://www.ammonit.com/>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- ARDUINO. **Arduino Hardware**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/hardware>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- BANZI, Massimo. **Getting Started with Arduino**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2011.
- BROOKS, David R. **Bringing the Sun Down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere**. Dordrecht: Springer, 2008.
- DE OLIVEIRA, A. M.; MARIO, M. C.; PACHECO, M. T. T. Fontes renováveis de energia elétrica: evolução da oferta de energia fotovoltaica no Brasil até 2050 / Renewable electric energy sources: evolution of the supply of photovoltaic energy in Brazil until 2050. **Brazilian Applied Science Review**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 257–272, 2021. DOI: 10.34115/basrv5n1-016. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/23315>. Acesso em: 4 nov. 2025.
- DORNELLES, Kelen Almeida. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4498.0967>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- EKO INSTRUMENTS. **MS-410 First Class Pyranometer: Instruction Manual**. Tokyo, Japan. Disponível em: <https://www.eko-instruments.com>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- GIMENEZ, Salvador P. **Microcontroladores 8051: Teoria e Prática**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- GRAPHTEC CORPORATION. **midi LOGGER GL200 User's Manual**. Yokohama, Japan. Disponível em: <http://www.graphteccorp.com>. Acesso em: 01 dez. 2025.
- GÓMEZ, J.M. Rodríguez; CARLESSO, F.; VIEIRA, L.E.; DA SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 26 mar. 2018. DOI: 10.1590/1806-9126-rbef-2017-0342. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0342>.

HAAG, Rafael. **Desenvolvimento de um radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

IQBAL, Muhammad. **An Introduction to Solar Radiation**. Toronto: Academic Press, 1983.

MAKERHERO. **Data Logger Shield para Arduino**. Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/data-logger-shield-para-arduino/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MAKERHERO. **Display LCD 16x2 I2C Backlight Azul**. Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/display-lcd-16x2-i2c-backlight-azul/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MAKERHERO. **Módulo Amplificador de Instrumentação AD620**. Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/modulo-amplificador-de-instrumentacao-ad620/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MAKERHERO. **Placa Uno R3 + Cabo USB para Arduino**. Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MORAIS, Fabrício Higo Monturil de; SILVA, Osvaldo Augusto Vasconcelos de Oliveira Lopes da; MORAES, Albemerc Moura de; BARBOSA, Fábio Rocha. Influência da Irradiação Solar na Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 723-734, dez. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786360049>.

MUNEER, Tariq. **Solar Radiation and Daylight Models**. 2. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

PROTOSUPPLIES. **AD620 Instrumentation Amplifier Module**. Disponível em: <https://protosupplies.com/product/ad620-instrumentation-amplifier-module/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 6 nov. 2025.

USINAINFO. **Amplificador de Instrumentação AD620**. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/amplificadores-de-sinal/amplificador-de-instrumentacao-ad620-3v-12v-5983.html>. Acesso em: 30 nov. 2025.

VICTORIA, Idilio M. B. et al. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetros com sensores fotoelétricos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1., 2007, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: ABENS, 2007.

VIGNOLA, Frank; MICHALSKY, Joseph; STOFFEL, Thomas. **Solar and Infrared Radiation Measurements**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO

```
//
=====
// SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS SOLARIMÉTRICOS
// Plataforma: Arduino Uno + Datalogger Shield + LCD I2C
// Autor: Daniel Trein
//
=====

// --- Inclusão de Bibliotecas ---
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"           // Biblioteca para o Relógio de Tempo Real
                              (RTC)
#include "SD.h"               // Biblioteca para manipulação do Cartão SD
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Biblioteca para o Display LCD via
                              barramento I2C

// --- Definição de Objetos ---
RTC_DS1307 rtc;              // Instância do objeto Relógio
File dataFile;              // Instância do objeto Arquivo
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // LCD no endereço 0x27, 16 colunas, 2
                              linhas

// --- Definição de Hardware e Constantes ---
const int pinoSensor = A0;   // Entrada analógica conectada ao
                              amplificador/piranômetro
const int pinoLed = 7;       // LED indicador de gravação
const int pinoCS = 10;       // Pino Chip Select (CS) para o módulo SD
                              Card

// --- Configuração de Temporização ---
const long intervalo = 5000; // Intervalo entre amostragens (5000 ms = 5
                              segundos)
unsigned long tempoAnterior = 0; // Variável de controle do timer (millis)

// --- Variáveis de Processamento Solarimétrico ---
float irradianciaMin = 9999.0; // Inicializado com valor alto para lógica
                              de mínimo
float irradianciaMax = 0.0;     // Inicializado com zero
float totalDiarioWh = 0.0;      // Acumulador de energia (Integração)
int diaAnterior = 0;           // Controle para reset diário das variáveis

// --- Variáveis de Interface (LCD) ---
bool exibirTelaMinMax = true;  // Flag para alternância de telas no
                              display

//
=====
// FUNÇÃO: CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL E CALIBRAÇÃO
// Transforma o valor bruto (0-1023) em Irradiância (W/m²)
//
=====
float converteParaIrradiancia(int valorLido) {
    // Passo 1: Converter bits para Tensão (0 a 5V)
    float tensao = valorLido * (5.0 / 1023.0);
```

```

// Passo 2: Aplicar Fator de Calibração (W/m² por Volt)
// Fator obtido experimentalmente via comparação com piranômetro padrão
float fatorDeConversao = 3073.00;

float irradiancia = tensao * fatorDeConversao;
return irradiancia;
}

//
=====
// SETUP: CONFIGURAÇÕES INICIAIS DO HARDWARE
//
=====
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicializa comunicação serial para debug
  while (!Serial) { ; }

  // Inicialização do Display LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Medidor Solar");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Iniciando...");
  delay(2000);
  lcd.clear();

  pinMode(pinoLed, OUTPUT);

  // Inicialização do Relógio (RTC)
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println(F("ERRO CRITICO: Modulo RTC nao encontrado.));
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Erro no RTC!");
    while (1); // Trava o sistema se falhar
  }

  if (!rtc.now().isValid()) {
    Serial.println(F("ATENCAO: RTC perdeu a hora. Ajuste necessario.));
  }

  // Define o dia atual para controle de reset
  diaAnterior = rtc.now().day();

  // Inicialização do Cartão SD
  Serial.print(F("Inicializando cartao SD... "));
  if (!SD.begin(pinoCS)) {
    Serial.println(F("Falha na inicializacao do SD!));
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Erro no SD Card!");
    while(1); // Trava o sistema se falhar
  }
  Serial.println(F("Cartao SD pronto.));

  // Verificação/Criação do arquivo de dados
  dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    // Se o arquivo estiver vazio (novo), escreve o cabeçalho
    if (dataFile.size() == 0) {
      Serial.println(F("Arquivo novo. Gravando cabeçalho CSV...));
    }
  }
}

```

```

dataFile.println("Data;Hora;Irradiancia_Wm2;Min_Dia;Max_Dia;Energia_Wh_m2")
;
}
dataFile.close();
Serial.println(F("Sistema pronto. Iniciando coleta..."));
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Coletando dados");
} else {
Serial.println(F("Erro ao abrir arquivo datalog.csv"));
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Erro Arquivo!");
}
}

//
=====
// LOOP: ROTINA PRINCIPAL DE AQUISIÇÃO E REGISTRO
//
=====
void loop() {
  unsigned long tempoAtual = millis();

  // Verifica se passou o intervalo de amostragem (5 segundos)
  if (tempoAtual - tempoAnterior >= intervalo) {
    tempoAnterior = tempoAtual;

    DateTime agora = rtc.now();

    // --- Lógica de Reset Diário ---
    // Se mudou o dia, zera os acumuladores e extremos
    if (agora.day() != diaAnterior) {
      irradianciaMin = 9999.0;
      irradianciaMax = 0.0;
      totalDiarioWh = 0.0;
      diaAnterior = agora.day();
      Serial.println(F("Novo dia detectado. Variaveis reiniciadas.));
    }

    // --- Leitura e Conversão ---
    int valorSensor = analogRead(pinoSensor);
    float irradianciaAtual = converteParaIrradiancia(valorSensor);

    // --- Atualização de Mínimos e Máximos ---
    if (irradianciaAtual < irradianciaMin) {
      irradianciaMin = irradianciaAtual;
    }
    if (irradianciaAtual > irradianciaMax) {
      irradianciaMax = irradianciaAtual;
    }

    // --- Integração Numérica (Cálculo da Energia Acumulada) ---
    // Energia = Potência * Tempo (convertendo ms para horas)
    float intervaloEmHoras = (float)intervalo / 3600000.0;
    totalDiarioWh += irradianciaAtual * intervaloEmHoras;

    // --- Atualização do Display LCD (Alternância de Telas) ---
    lcd.clear();

    // Linha 1 (Fixa): Hora e Irradiância Instantânea

```

```

lcd.setCursor(0, 0);
if (agora.hour() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.hour());
lcd.print(":");
if (agora.minute() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.minute());
lcd.print(" ");
lcd.print((int)irradianciaAtual);
lcd.print(" W/m2");

// Linha 2 (Alternada): Min/Max OU Energia Total
if (exibirTelaMinMax) {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Min:");
  lcd.print((int)irradianciaMin);
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print("Max:");
  lcd.print((int)irradianciaMax);
} else {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Total: ");
  lcd.print((int)totalDiarioWh);
  lcd.print(" Wh/m2");
}

// Inverte o estado da tela para o próximo ciclo
exibirTelaMinMax = !exibirTelaMinMax;

// --- Gravação no Cartão SD (Datalogging) ---
dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
  String linhaDeDados = "";

  // Formatação da Data (DD/MM/AAAA)
  if (agora.day() < 10) linhaDeDados += "0";
  linhaDeDados += String(agora.day()) + "/";
  if (agora.month() < 10) linhaDeDados += "0";
  linhaDeDados += String(agora.month()) + "/" + String(agora.year());
  linhaDeDados += ";";

  // Formatação da Hora (HH:MM:SS)
  if (agora.hour() < 10) linhaDeDados += "0";
  linhaDeDados += String(agora.hour()) + ":";
  if (agora.minute() < 10) linhaDeDados += "0";
  linhaDeDados += String(agora.minute()) + ":";
  if (agora.second() < 10) linhaDeDados += "0";
  linhaDeDados += String(agora.second());

  // Gravação das variáveis (com casas decimais para precisão)
  linhaDeDados += ";" + String(irradianciaAtual, 2);
  linhaDeDados += ";" + String(irradianciaMin, 2);
  linhaDeDados += ";" + String(irradianciaMax, 2);
  linhaDeDados += ";" + String(totalDiarioWh, 4);

  // Efetiva a gravação
  dataFile.println(linhaDeDados);
  dataFile.close();

  // Feedback visual (Pisca LED)
  digitalWrite(pinoLed, HIGH);
  delay(100); // Breve delay apenas para visualização do LED
}

```

```
digitalWrite(pinoLed, LOW);

// Feedback serial
Serial.print("Registro Gravado: ");
Serial.println(linhaDeDados);

} else {
  Serial.println(F("ERRO DE GRAVACAO: Falha ao abrir arquivo CSV.));
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Erro Gravacao!");
}
}
```

APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO COMPLETO

