



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Integração de instrumentação e capacidade de
comunicação com nuvem a uma placa
Raspberry Pi para monitoramento remoto de
plantas de geração fotovoltaicas off-grid**

Victor Gabriel R. de Almeida

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO 2
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Brasília
2022

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Integração de instrumentação e capacidade de
comunicação com nuvem a uma placa
Raspberry Pi para monitoramento remoto de
plantas de geração fotovoltaicas off-grid**

Victor Gabriel R. de Almeida

Trabalho de Graduação submetido como re-
quisito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo

Brasília

2022

G118i Gabriel R. de Almeida, Victor.
Integração de instrumentação e capacidade de comunicação com nuvem a uma placa Raspberry Pi para monitoramento remoto de plantas de geração fotovoltaicas off-grid / Victor Gabriel R. de Almeida; orientador Guilherme Caribé de Carvalho; coorientador Fernando Cardoso Melo. -- Brasília, 2022.
75 p.

Trabalho de Graduação 2 em Engenharia de Controle e Automação -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Comunicação serial. 2. Energia fotovoltaica. 3. Serial Peripheral Interface. 4. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. I. Caribé de Carvalho, Guilherme, orient. II. Cardoso Melo, Fernando, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Integração de instrumentação e capacidade de
comunicação com nuvem a uma placa Raspberry Pi
para monitoramento remoto de plantas de geração
fotovoltaicas off-grid**

Victor Gabriel R. de Almeida

Trabalho de Graduação submetido como re-
quisito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação.

Trabalho aprovado. Brasília, 22 de setembro de 2022:

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho,
UnB/FT/ENM
Orientador

Prof. Fernando Cardoso Melo,
UnB/FT/ENE
Coorientador

Prof. Lélío R. Soares Júnior, UnB/FT/ENE
Examinador interno

Prof. Mário Benjamim Baptista de
Siqueira, UnB/FT/ENM
Examinador interno

Brasília
2022

Resumo

Com o aumento da demanda por energia elétrica e diversificação da matriz de produção de energia elétrica, a eficiência da produção de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos tem ganhado uma importância cada vez maior. A análise de características elétricas de cada módulo fotovoltaico requer sensores e uma rede configurada que seja capaz de fazer a transmissão dessas informações para comparações que demonstrem a melhora ou piora na eficiência de painéis em diferentes condições ambientais. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de dois sistemas de instrumentação dedicados, controlados por uma placa Raspberry Pi por meio de diferentes padrões de interface serial, a saber, SPI (Serial Peripheral Interface), I2C e UART. No protocolo SPI são lidos os sensores de tensão e corrente elétrica conectados aos módulos fotovoltaicos, enquanto no protocolo I2C existe uma placa com um conjunto de sensores de umidade, temperatura, pressão barométrica e atitude. Os dados coletados pelo conjunto de sensores são transmitidos para nuvem por outro circuito conectado à *Raspberry Pi* utilizando o protocolo UART. Os sistemas para medição e envio de dados são desenvolvidos com diferentes placas e diferentes circuitos integrados para que possam ser conectados à planta de geração de energia fotovoltaica. Cada um dos sistemas é avaliado qualitativamente em relação à sua capacidade de atender as tarefas para as quais foram desenvolvidos, considerando-se a realização efetiva das tarefas para as quais foram projetados e precisão das medições.

Palavras-chave: Comunicação serial. Energia fotovoltaica. Serial Peripheral Interface. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.

Abstract

With the increasing demand for electrical power and more diversity on the way it is generated, the efficiency of photovoltaic panels has gained increasing importance. The analysis of electrical characteristics of each panel needs sensors and a configured network capable of transmitting this data for comparisons to demonstrate an improvement or worsening in efficiency of panels in different environmental conditions. These electric current, voltage, temperature, humidity and attitude sensors, communicating with different protocols, provide a set of useful measurements for the mentioned analysis. This work presents the development of two dedicated instrumentation systems, controlled by a Raspberry Pi board by means of different serial interface standards, namely SPI (Serial Peripheral Interface), I2C and UART. On the SPI protocol, voltage and electrical current sensors connected to the photovoltaic modules are read, while in the I2C protocol there is a board with a set of sensors for humidity, temperature, barometric pressure and attitude. The data collected by the set of sensors is transmitted to the cloud by another circuit connected to the *Raspberry Pi* using the UART protocol. The systems for measuring and data uploading are developed with different boards and different integrated circuits so that they can be connected to the photovoltaic power generation plant. Each system is qualitatively evaluated in relation to its ability to meet the tasks for which they were developed, considering the effective realization of the tasks for which they were designed and the accuracy of the measurements.

Keywords: Photovoltaic power. Serial communication. Serial Peripheral Interface. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquemático simplificado de conexões elétricas no projeto.	14
Figura 2 – Esquemático simplificado de conexões do sistema de medição desenvolvido.	15
Figura 3 – Modelo do barramento UART.	18
Figura 4 – Modelo do barramento SPI.	19
Figura 5 – Modelo do barramento I^2C	20
Figura 6 – Modelo simplificado do sistema.	22
Figura 7 – Módulo SIM800L utilizado.	24
Figura 8 – Diagrama de conexão para o SIM880L e <i>Raspberry Pi</i>	25
Figura 9 – Modelo de posicionamento do SIM800L na caixa.	26
Figura 10 – Conversor analógico/digital AD7705 utilizado.	27
Figura 11 – Modelo de conexão do circuito integrado na placa utilizado.	28
Figura 12 – Placa de sensor P25 utilizada.	29
Figura 13 – Sensor de corrente ACS712 utilizado.	30
Figura 14 – Amplificador diferencial AD620 utilizado.	31
Figura 15 – Esquemático de conexão entre módulos fotovoltaicos com sensores P25 e amplificadores AD620.	33
Figura 16 – Modelo 3D do nível inferior do conjunto SPI para sistema flutuante.	34
Figura 17 – Modelo 3D do nível superior do conjunto SPI para sistema flutuante.	34
Figura 18 – Modelo 3D do conjunto SPI para sistema flutuante.	35
Figura 19 – Modelo 3D do nível inferior do conjunto SPI para sistema fixo.	36
Figura 20 – Modelo 3D do nível superior do conjunto SPI para sistema fixo.	36
Figura 21 – Modelo 3D do conjunto SPI para sistema fixo.	37
Figura 22 – Modelo 3D do quadro de energia proposto.	38
Figura 23 – <i>Sense Hat</i>	39
Figura 24 – Modelo do escalonamento de tarefas de leitura dos sensores.	41
Figura 25 – Modelo do arquivo <i>rnet</i> usado.	43
Figura 26 – Modelo simplificado da dinâmica do algoritmo.	44
Figura 27 – Fluxogramas das rotinas de gerenciamento para os diferentes sistemas.	45
Figura 28 – Placa com XL4015 utilizada - com multímetro.	46
Figura 29 – Placa com XL4015 utilizada - sem multímetro.	46
Figura 30 – Montagem do sistema para testes.	49
Figura 31 – Fonte de tensão e corrente utilizada nos testes.	50
Figura 32 – Resistores em série utilizados nos testes.	50
Figura 33 – Placa montada com o SIM800.	52
Figura 34 – Placa do sistema de leitura SPI para planta flutuante - montada.	54
Figura 35 – Placa do sistema de leitura SPI para planta flutuante - níveis separados.	54

Figura 36 – Placa do sistema de leitura SPI para planta fixa.	55
Figura 37 – Distribuição das amostras de tensão em R_1	56
Figura 38 – Distribuição das amostras de tensão em R_2	57
Figura 39 – Distribuição das amostras de corrente.	58
Figura 40 – Eixos no <i>Sense Hat</i>	60
Figura 41 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>pitch</i> no acelerômetro.	60
Figura 42 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>roll</i> no acelerômetro.	61
Figura 43 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>yaw</i> no acelerômetro.	61
Figura 44 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>pitch</i> no giroscópio.	62
Figura 45 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>roll</i> no giroscópio.	62
Figura 46 – Distribuição das amostras do ângulo de <i>yaw</i> no giroscópio.	63
Figura 47 – Distribuição das amostras da bússola.	63
Figura 48 – Distribuição das amostras de temperatura pelo sensor de umidade.	64
Figura 49 – Distribuição das amostras de temperatura pelo sensor de pressão.	65
Figura 50 – Distribuição das amostras de pressão.	66
Figura 51 – Distribuição das amostras de umidade.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resistências utilizadas para cada P25	30
Tabela 2 – Ganho mínimo para os AD620	32
Tabela 3 – Placas e componentes no conjunto do sistema flutuante	35
Tabela 4 – Placas e componentes no conjunto do sistema fixo	37
Tabela 5 – Janelas utilizadas no algoritmo	44
Tabela 6 – Módulos e correntes consumidas no sistema flutuante	47
Tabela 7 – Módulos e correntes consumidas no sistema fixo	47
Tabela 8 – Valores de referência do sistema	51

Lista de abreviaturas e siglas

$P_{Fl} - 1_1$	<i>Primeiro módulo fotovoltaico da primeira associação de módulos fotovoltaicos no sistema flutuante</i>	29
$P_{Fl} - 1_2$	<i>Segundo módulo fotovoltaico da primeira associação de módulos fotovoltaicos no sistema flutuante</i>	29
$P_{Fl} - 2_1$	<i>Primeiro módulo fotovoltaico da segunda associação de módulos fotovoltaicos no sistema flutuante</i>	29
$P_{Fl} - 2_2$	<i>Segundo módulo fotovoltaico da segunda associação de módulos fotovoltaicos no sistema flutuante</i>	29
$P_{Fx} - 1$	<i>Primeiro módulo fotovoltaico da associação no sistema fixo</i>	29
$P_{Fx} - 2$	<i>Segundo módulo fotovoltaico da associação no sistema fixo</i>	29
CS	<i>Chip Select</i>	18
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>	18
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>	18
MISO	<i>Master In - Subordinate Out</i>	18
MOSI	<i>Master Out - Subordinate In</i>	18
SCL	<i>I²C Clock</i>	19
SCLK	<i>SPI Clock</i>	18
SDA	<i>I²C Data</i>	19
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>	18
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>	17

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização e Objetivo	13
1.2	Organização do Texto	16
2	INTRODUÇÃO TEÓRICA	17
2.1	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>	17
2.2	<i>Global System for Mobile Communication</i>	18
2.3	Barramento SPI	18
2.4	Barramento I2C	19
3	ESCOPO DO PROJETO	21
4	IMPLEMENTAÇÕES E METODOLOGIA	23
4.1	Sistema de conexão GPRS	23
4.1.1	Módulos utilizados	23
4.1.2	Integração	24
4.2	Sistema de medição com rede SPI	26
4.2.1	Módulos utilizados	26
4.2.1.1	Conversor analógico/digital AD7705	27
4.2.1.2	Módulo sensor de tensão P25	28
4.2.1.3	Módulo sensor de corrente ACS712	30
4.2.1.4	Amplificador operacional diferencial AD620	31
4.2.2	Integração	32
4.3	Sistema de medição por I2C	38
4.3.1	Módulos utilizados	38
4.3.2	Integração	39
4.4	Integração com <i>Raspberry Pi</i>	40
4.4.1	Leitura de sensores	40
4.4.2	Comunicação com a nuvem e manejo de arquivos	43
4.5	Energização dos sistemas	45
5	RESULTADOS E ANÁLISE	49
5.1	Comunicação com a nuvem	51
5.2	Sistema de leitura SPI	52
5.3	Leitura do <i>Sense Hat</i>	59
6	CONCLUSÕES	68

7	TRABALHO FUTURO E CONSIDERAÇÕES	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICES	72
	APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA FLUTUANTE	73
	APÊNDICE B – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA FIXO . . .	74
	APÊNDICE C – DIAGRAMA UNIFILAR DE ENERGIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS	75

1 Introdução

A luz solar é a fonte de energia mais abundante e renovável conhecida pelo homem. A potência interceptada pela Terra é cerca de $1,8 \times 10^{11} MW$ (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011). Tanta energia, em constante aumento de demanda elétrica, não poderia passar despercebida e os equipamentos utilizados para interceptar essa luz e transformá-la em energia elétrica necessitam cada vez mais de uma relação em que seus custos diminuam em comparação ao quanto conseguem gerar.

Não existe apenas uma forma de se aproveitar a luz solar como fonte para geração de energia elétrica. Neste trabalho será avaliada essa geração por meio de módulos fotovoltaicos mesmo que existam outros tipos, como termoelétricas que utilizam a luz solar como fonte de calor. A palavra fotovoltaico vem da junção do termo grego *photo*, que significa luz, e Volta, nome do físico italiano Alessandro Volta que desenvolveu a primeira pilha voltaica registrada. O fenômeno físico associado ao fenômeno fotovoltaico foi registrado pela primeira vez em 1839 pelo físico Edmond Becquerel, como a capacidade de alguns materiais de absorverem a energia presente em fótons e transformá-la em eletricidade (ZILLES et al., 2012). Já a primeira célula fotovoltaica foi produzida em 1883 por Charles Fritts, fazendo uma junção revestindo uma placa de selênio com uma camada fina de ouro (MEHROTRA et al., 2014).

A produção dos módulos fotovoltaicos é feita com semicondutores capazes de absorver a radiação solar e transferir parte dessa energia para os elétrons de sua constituição química, gerando pares de portadores de carga que causa a diferença de potencial. A capacidade de absorção desses materiais, impacto causado no meio ambiente pela sua extração, custos de produção e disponibilidade na natureza são alguns dos fatores que influenciam na escolha. Os semicondutores mais utilizados para produção de células fotovoltaicas na indústria são: silício monocristalino, policristalino e amorfo; arseneto de gálio; disseleneto de cobre e índio; disseleneto de cobre, gálio e índio; e telureto de cádmio (ZILLES et al., 2012). Desses elementos, destaca-se o silício pela ampla disponibilidade na natureza e utilização na indústria de semicondutores, fazendo com que seja um tipo de célula fotovoltaica comumente encontrada no mercado.

Apesar da escolha dos elementos químicos que compõem a célula fotovoltaica, é indispensável que os módulos ofereçam bons padrões de qualidade para utilização, também em relação à sua eficiência e aos seus custos de produção. Os primeiros painéis produzidos atingiam uma eficiência de cerca de 1% (MEHROTRA et al., 2014), ou seja, apenas 1% da potência fornecida pela luz solar era efetivamente convertido para potência elétrica. Com o aumento de pesquisas na área e melhorias feitas na fabricação, essa eficiência, considerando todos fatores favoráveis na conversão, chega a um valor máximo de aproximadamente 40%

(MEHROTRA et al., 2014).

A crescente demanda por energia elétrica e necessidade de diversificação da matriz de geração são fatores centrais que causam o interesse na melhora da eficiência dos painéis não apenas no que diz respeito à posição em que são colocados ou elementos químicos utilizados em sua fabricação, mas também no controle de variáveis ambientais a fim de tornar cada vez maior a taxa de conversão de energia luminosa captada pelo Sol em energia elétrica.

Quando controladas as variáveis ambientais para análise da eficiência dos painéis, é fundamental que informações sobre o ambiente e a geração de energia elétrica sejam coletadas. Isso inclui a irradiância solar no módulo fotovoltaico durante a conversão para determinar a potência fornecida para conversão. A temperatura do módulo fotovoltaico é outra informação de grande relevância para determinação da perda de eficiência por dissipação em energia térmica. Conhecer a corrente elétrica que o módulo fotovoltaico consegue fornecer e a diferença de potencial entre seus terminais são essenciais para que sejam feitas comparações e análises a respeito do quanto sua eficiência é afetada.

Plantas fotovoltaicas instaladas em diferentes ambientes podem requerer diferentes tipos de medições específicas para diferentes variáveis ambientais que possam impactar a eficiência da conversão de energia. Em uma planta instalada em solo fixo, podem-se medir tanto grandezas elétricas, quanto ambientais. Entretanto, é interessante, em um caso como o de uma planta flutuante na superfície de um corpo de água, verificar a atitude do sistema para diagnosticar inclinações e movimentações em relação ao Sol, causadas por ventos e ondas, que podem ter impacto na eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos. As frequências das medições também variam para diferentes grandezas e, portanto, diferentes protocolos são analisados no processo de transmissão dessas informações.

A coleta dessas grandezas físicas associadas à análise da eficiência dos painéis resulta em um conjunto de considerações sobre os sensores utilizados, protocolos de comunicação e também tratamento dos dados. Os dados ambientais coletados, como temperatura ambiente, irradiância solar, poeira presente no ar entre outros, assim como informações elétricas nos painéis, utiliza diferentes sensores com diferentes tipos de sinais, alguns podendo fornecer informações analógicas e outras leituras já tratadas de forma digital.

1.1 Contextualização e Objetivo

O desenvolvimento aqui apresentado é uma pequena parte de um projeto de pesquisa mais amplo. O projeto de pesquisa para o qual este trabalho é desenvolvido prevê a avaliação da eficiência de conversão da energia luminosa em diferentes regimes de trocas térmicas vigentes nos módulos fotovoltaicos. Duas plantas de geração de energia fotovoltaica são previstas, uma em solo fixo e outra flutuante em um corpo de água. Para que a avaliação

da eficiência possa ser feita, é necessário o monitoramento do sistema por completo com um conjunto de sensores e amplificadores capazes condicionar os sinais que representem as variáveis ambientais medidas.

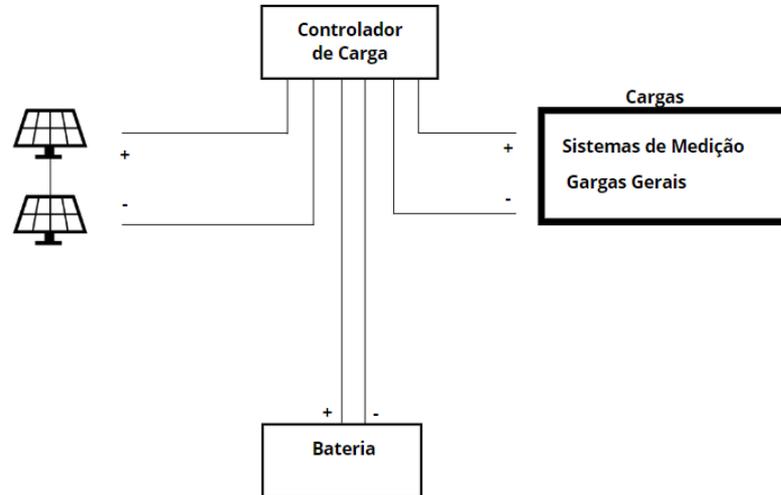


Figura 1 – Esquemático simplificado de conexões elétricas no projeto.

Fonte: Produzido pelo autor

Um esquemático simplificado de conexões do sistema é apresentado na [Figura 1](#). A instalação dos módulos fotovoltaicos é feita em série, contendo apenas dois módulos em cada conjunto, ligados a um controlador de carga responsável pelo controle da conversão de energia nos módulos, recarga de uma bateria e energização dos outros sistemas. Enquanto os módulos fazem a conversão de energia, os sistemas são energizados, na verdade, pela bateria enquanto o controlador de carga tenta a todo momento recarregá-la. Os sistemas energizados mostrados são dois: um para monitoramento e outro para geração de cargas.

As cargas mostradas são usadas para descarregar a bateria, de modo que os módulos sejam sempre usados em um regime de máxima geração possível, sem que sua corrente seja limitada pelo controlador de carga, caso a bateria esteja completamente recarregada e os módulos continuem a gerar energia elétrica. Essa carga está presente no projeto porque os sistemas de medição não são projetados com um consumo suficiente para manter a bateria sempre parcialmente descarregada, de modo que os módulos fotovoltaicos estejam sempre no regime de máxima geração.

O trabalho desenvolvido neste projeto de pesquisa e que, de fato, faz parte deste texto apresenta a construção de uma parte do sistema de medição dedicado para que as grandezas físicas, tanto do ambiente atmosférico quanto elétricas nos próprios módulos, possam ser medidas e armazenadas.

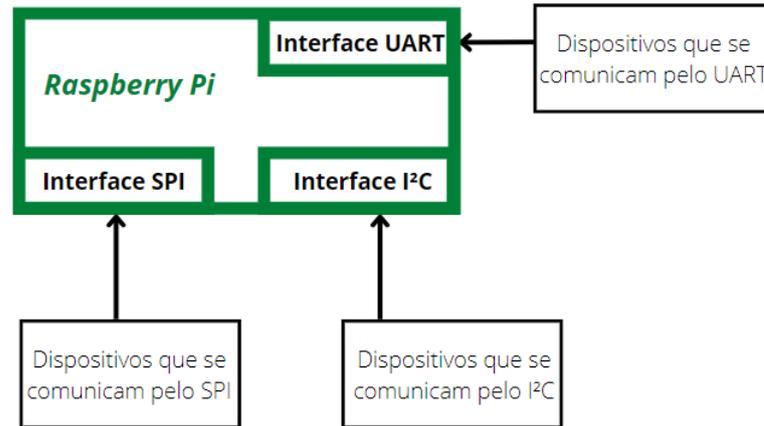


Figura 2 – Esquemático simplificado de conexões do sistema de medição desenvolvido.

Fonte: Produzido pelo autor

O sistema de medição desenvolvido é representado, considerando os diferentes barramentos e a placa usada, na [Figura 2](#). Cada barramento usado corresponde a um conjunto de diferentes sensores ou dispositivos com diferentes finalidades específicas, porém trabalhando em conjunto para atender aos objetivos deste trabalho.

O objetivo geral do trabalho é dotar um sistema *off-grid* de geração fotovoltaica com a capacidade de adquirir dados elétricos de geração (tensão em cada módulo fotovoltaico e corrente da associação em série), assim como os dados de orientação espacial e ambientais, por meio da integração de módulos de conversão AD (analógico/digital) e de sensoriamento de atitude, assim como capacidade de organizar e armazenar localmente os dados coletados e transmiti-los para armazenamento remoto. Mais especificamente, os objetivos específicos são:

1. Integrar módulos de conversão analógico/digital à uma *Raspberry Pi* por meio de barramento SPI;
2. Integrar módulo de medição de orientação espacial e de variáveis ambientais à *Raspberry Pi*, via barramento I^2C ;
3. Integrar módulo de comunicação GPRS à placa *Raspberry Pi*, via interface UART;
4. Desenvolver circuitos de condicionamento de sinais elétricos a serem coletados pelo sistema;
5. Desenvolver software de controle de aquisição, organização de dados, armazenamento local e envio para armazenamento remoto.

1.2 Organização do Texto

Neste texto é apresentada uma breve revisão teórica sobre diferentes barramentos, uma discussão para apresentar uma visão geral do projeto de pesquisa, no qual será utilizado o sistema proposto e desenvolvido neste trabalho.

Em um detalhamento maior, são especificados os diferentes sistemas e os diferentes barramentos utilizados em cada um deles, assim como modelagem e projeto físico dos sistemas. O primeiro deles é o sistema de comunicação com a nuvem, o segundo, o sistema de leitura para as grandezas elétricas de tensão e corrente elétrica nos módulos e o terceiro, o sistema para medição de umidade, temperatura, pressão e atitude. Em todos os três sistemas são descritos não apenas os sensores e circuitos utilizados, mas também o protocolo pelo qual cada um se comunica e sua implementação, considerando o funcionamento lógico e conexões elétricas.

Os sistemas de medição implementados são testados e seus resultados apresentados, avaliando-se a confiabilidade de cada um, assim como a aplicabilidade para a operação proposta: medição de grandezas elétricas e ambientais em duas pequenas plantas de geração de energia elétrica com módulos fotovoltaicos. Essas análises levam em consideração tanto a capacidade dos sistemas implementados de fornecer as medições desejadas quanto a precisão das medições feitas.

2 Introdução Teórica

No monitoramento dos módulos fotovoltaicos, é fundamental que haja um ferramental adequado para medição de parâmetros durante sua geração de energia elétrica e que esses dados sejam corretamente transmitidos para validação e análise posterior, se desejada a inferência sobre sua eficiência.

As medições feitas devem contar com um grau de qualidade que dê confiança às análises e há ainda a necessidade de se definirem quais tecnologias de comunicação atendem aos requisitos para cada grupo de medidas, considerando velocidade de *bits* na transmissão e também a conexão lógica do circuito a ser implementado para a operação.

2.1 *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

Grande parte dos circuitos de comunicação serial possuem um transceptor chamado de UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). O termo *universal* em seu nome refere-se à capacidade do padrão de ter diferentes configurações no formato dos dados e velocidade de comunicação, ao passo que os níveis lógicos na comunicação são determinados por circuitos específicos e não previstos no UART.

Alguns padrões elétricos que utilizam o UART são o RS-232 e RS-422, por exemplo. De modo geral, quando um dos padrões que o utiliza realizam comunicação, a informação é passada para a interface serial do dispositivo que transforma a palavra binária em uma sequência de *bits* e os transmite. O dispositivo que recebe a informação transmitida recebe *bit a bit* da palavra e a reagrupa em uma palavra novamente.

Como a comunicação feita pelo UART é assíncrona, é necessário que *bits* sejam passados durante a transmissão para sincronizar a comunicação, já que não existe um canal exclusivo para isso. Essa sincronização pode ser feita com o envio de um *bit* que indica o início da transmissão e um último *bit* para sinalizar o término da transmissão, além disso é comum que haja também um *bit* de paridade adicionado à informação para detecção de eventuais erros de transmissão. Tais características demonstram a importância de configuração entre transmissor e receptor, pois ambos devem estar preparados para trabalhar com tamanhos iguais de palavras binárias e em uma velocidade de transmissão igual. (DAWOUD, D. S.; DAWOUD, P., 2020)

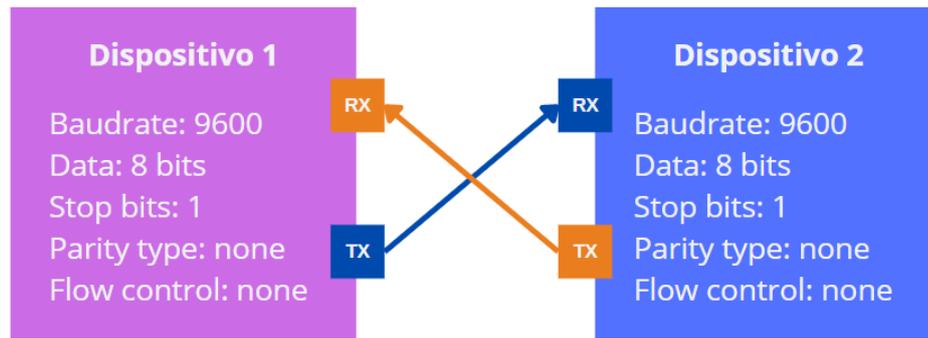


Figura 3 – Modelo do barramento UART.

Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 3 mostra uma versão simplificada do padrão. É possível notar que a transmissão ocorre apenas em pares, um canal de envio de dados (TX) de um sempre enviando ao canal de recebimento de dados (RX) de outro. Ambos os dispositivos também apresentam uma configuração padrão de como é feita essa transmissão para que ela possa ocorrer.

2.2 Global System for Mobile Communication

O serviço de rádio de pacote geral (GPRS) é uma tecnologia que pode ser utilizada em diversos tipos de sistemas, desenvolvido para aplicações móveis, fornece uma conectividade por meio da infraestrutura de operadoras, acessando a *internet* e outros serviços. Foi lançado em 2002 pela GSM (*Global System for Mobile Communication*).

O GPRS é conhecido como a tecnologia 2G de conectividade, foi a primeira a permitir a navegação de alta velocidade na *internet* por dispositivos móveis com conexões de aproximadamente 40kbps em situações usuais. Essa conexão na versão anterior GSM chegava apenas a 12kbps por ser uma tecnologia que fazia comunicação por comutação por circuitos eletrônicos. Outra principal vantagem deste tipo de comunicação é a tarifação por quantidade de dados trafegados, diferente da tecnologia anterior que fazia esse tipo de cobrança por tempo de conexão.

2.3 Barramento SPI

O *Serial Peripheral Interface* (SPI) é um padrão que permite a comunicação de um controlador com diversos outros dispositivos, tornando possível que, em um mesmo canal, haja diferentes sensores, atuadores, conversores conectados e transmitindo informação contanto que tenham suporte ao padrão.

O padrão SPI necessita apenas de quatro conexões distintas que garantam seu funcionamento, são elas: SCLK (*clock* de sincronização entre mestre e subordinado), MISO

(canal de envio de dado do subordinado para o mestre), MOSI (canal de envio de dados do mestre para o subordinado) e CS (canal de seleção de subordinado ativo) (CHOUDHURY; SINGH; MEHRA, 2014). Com o uso dessas conexões é possível que o controlador escreva em um canal comum a todos e leia a partir de outro canal comum, mas limitando a troca de informação a um único subordinado por vez. Essa característica torna o SPI um padrão especialmente interessante para ligação de diversos dispositivos em um mesmo canal de comunicação, mas garantindo que apenas um transmita por vez.

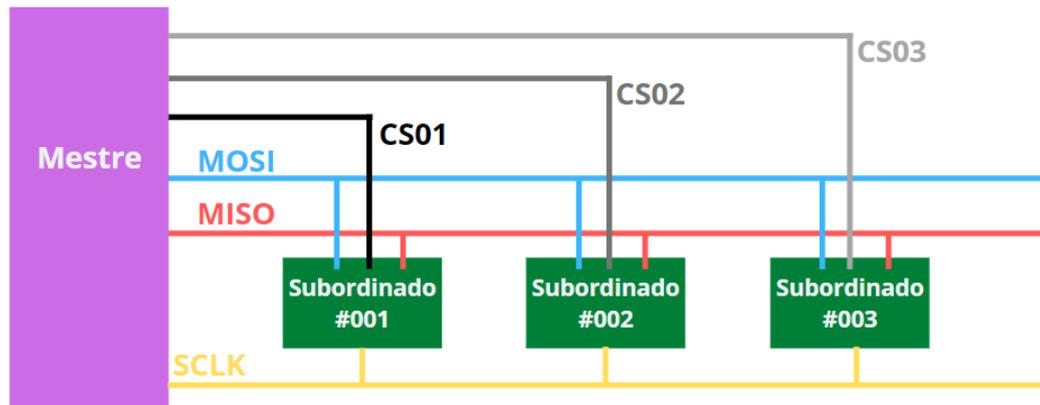


Figura 4 – Modelo do barramento SPI.

Fonte: Produzido pelo autor

Uma característica interessante desse padrão é o suporte à transmissão de dados em alta frequência, chegando aos megahertz. É um padrão bastante popular em conversores analógicos/digitais, em que ocorre a conversão de grandezas analógicas em palavras digitais que são armazenadas em registradores, cuja leitura é feita por *shifting* desse mesmo registrador e os bits transmitidos no canal de dados. Também há impossibilidade de conflitos quanto ao endereço dos dispositivos, evitando que dois dispositivos tenham, por acidente, o mesmo endereço, porque não é necessário que periféricos (ou subordinados) possuam um endereço, apenas o mestre deve saber qual *chip select* ativar para comunicar-se com o subordinado desejado e a comunicação ocorre apenas entre os dois dispositivos, enquanto todos os outros encontram-se logicamente desativados.

2.4 Barramento I2C

O padrão I^2C foi desenvolvido na década de 1980 pela *Philips Semiconductors* como uma alternativa para reduzir custos na fabricação de dispositivos eletrônicos. Trata-se de um barramento de apenas dois fios, que opera em baixa a média frequência, proporcionando uma comunicação eficiente, mas de baixo custo, entre dispositivos.

As aplicações iniciais do padrão foram no controle de volume e contraste em rádios e televisões. Desde sua criação, o barramento I^2C popularizou-se e passou a estar presente

em uma quantidade muito maior de dispositivos eletrônicos nas mais diversas aplicações.

Antes do desenvolvimento do padrão I^2C , a comunicação *chip-to-chip* utilizava uma quantidade muito grande de fios, necessitando que circuitos integrados precisassem de várias conexões (pinos) expostos para uma comunicação de dados paralela, onde os dados são enviados entre dispositivos com uma única operação.

No barramento I^2C são utilizados apenas 2 fios (SDA e SCL), necessitando de uma quantidade menor de conexões (pinos) nos circuitos integrados para a comunicação com outros circuitos. Nesses dois fios são passadas informações de endereçamento, dados e controle de seleção bit a bit. O canal SDA (*data*) é onde ocorre a transmissão de dados, enquanto o canal SCL (*clock*) é responsável pela sincronização da comunicação entre transmissor e receptor. Dispositivos capazes de se comunicarem por I^2C mostraram-se muito menos custosos em sua fabricação em relação aos que utilizam comunicação paralela.

Após sua criação, o barramento I^2C mostrou-se também muito eficiente na comunicação tipo mestre-subordinado, sendo capaz de suportar uma grande quantidade de dispositivos no barramento, bastando que cada um possua um endereço único. (PHILIPS..., 2004)

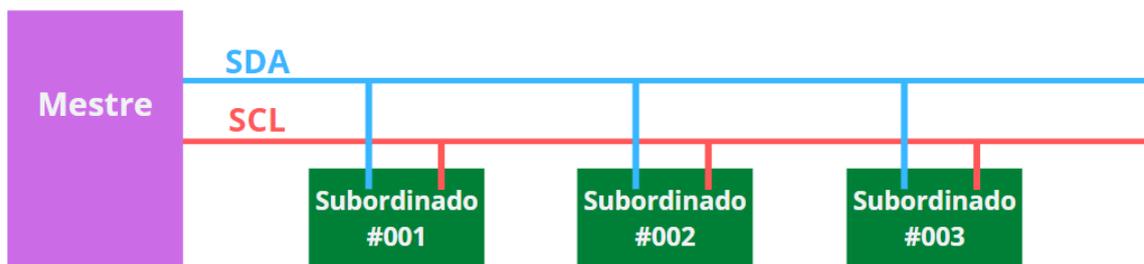


Figura 5 – Modelo do barramento I^2C .

Fonte: Produzido pelo autor

É importante mencionar que o padrão I^2C , em versões recentes, também pode apresentar suporte à comunicação com *chip select*, sem haver necessidade de que cada dispositivo subordinado na rede possua um endereço único, exclusivo, apenas o mapeamento no mestre é suficiente para que ele ative o subordinado correto na hora da leitura, mas esse tipo de configuração requer um número maior de conexões elétricas - uma para cada periférico.

3 Escopo do Projeto

Neste trabalho é proposto um sistema de medição de variáveis para duas usinas de geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos. O principal objetivo é a análise de eficiência entre cada um dos módulos fotovoltaicos comparando diferentes variações em condições ambientais, principalmente por utilização de água para resfriamento de sua superfície. Para que o objetivo principal do projeto seja atendido, é necessário que seja implementada uma rede de medição das grandezas físicas necessárias para a análise e comparação.

O sistema a ser implementado no projeto principal é dividido em duas partes distintas. Uma planta flutuante sobre a superfície de um corpo de água e outro fixo na Universidade de Brasília. Ambos possuem o propósito comum de fazer coleta de informações dos módulos fotovoltaicos: grandezas elétricas e ambientais.

No sistema flutuante haverá quatro módulos fotovoltaicos separados em duplas e cada dupla ligada em série, portanto, são necessários dois quadros de energia para os dois controladores de carga que serão ligados em cada dupla de painéis conectados em série. O sistema de medição de parâmetros contará com uma rede modbus, uma SPI e outra I^2C . Nelas estarão conectados sensores para medição da irradiância solar, poeira do ar, umidade, temperatura, além de grandezas analisadas nos próprios painéis, como a tensão de cada um e a corrente fornecida por cada dupla de módulos fotovoltaicos associadas em série, também a temperatura na superfície do vidro e atitude determinada por um *Sense Hat* para verificar variações como rotação e inclinação da plataforma em relação ao referencial estabelecido. Esse sistema também contará com conectividade de rede móvel GPRS mencionada na [seção 2.2](#) para transmissão dos dados coletados. É importante mencionar que o desenvolvimento aqui mostrado não conta com a implementação da rede modbus, tendo em vista que ela foi implementada em período anterior ao desenvolvimento deste trabalho.

Para o sistema fixo existirão apenas dois módulos fotovoltaicos conectados em série com um único controlador de carga, ou seja, apenas um quadro de energia é utilizado, porém nele estarão conectados dois módulos adicionais em relação aos existentes em cada quadro elétrico do sistema flutuante. Um sistema cabeado ou *Wi-Fi* será usado para a transmissão dos dados coletados no sistema fixo para armazenamento remoto.

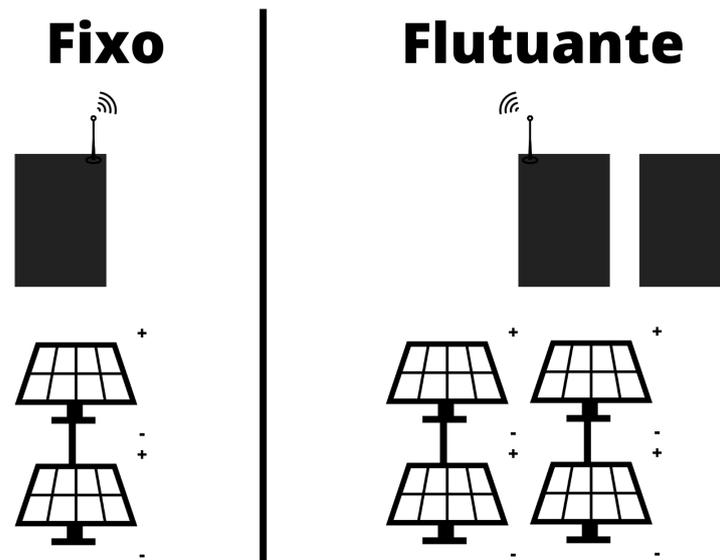


Figura 6 – Modelo simplificado do sistema.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 6](#) mostra de forma simplificada como será o sistema do projeto principal para o qual é desenvolvido o sistema de medição proposto neste trabalho. Ambos geograficamente separados e com quantidades diferentes de painéis e quadros, mas mantendo a relação de um quadro de energia para cada associação em série de painéis. Na imagem é omitida a distribuição no interior dos quadros e sensores que estarão conectados ao conjunto coletando informações ambientais e elétricas. Neste trabalho, a descrição desses elementos será limitada aos sensores de medição ligados à rede SPI, I2C e a implementação de conectividade por rede móvel GPRS.

4 Implementações e Metodologia

4.1 Sistema de conexão GPRS

O serviço de rádio de pacotes geral (GPRS), também denominada rede 2G é uma rede muito mais limitada em suas taxas de transmissão de dados quando comparada às outras gerações, como 4G e 5G, porém se destaca na aplicação em locais remotos por sua disponibilidade, principalmente para envio de quantidades pequenas de dados.

A taxa de transmissão da conexão GPRS é de até 160kbps , diferente de gerações posteriores que chegam a valores de transmissão na faixa de Mbps ou até Gbps . Para comunicações mais sofisticadas, como *download* e *upload* de vídeos, deixa muito a desejar, mas sua implementação com uma infraestrutura mais simples e acessível dá ao módulo uma característica muito prática e confortável em comunicação máquina para máquina (*M2M*), ou informações de geolocalização, onde o objeto a ser conectado está em movimento.

Aqui foi escolhido não somente por ser uma conexão ainda amplamente disponível, mas também pelo custo benefício que apresenta em relação a outras de gerações posteriores. A quantidade de dados que serão transmitidos e a latência entre envio e recebimento dessa informação também foram critérios na escolha da rede, uma vez que não haverá grande fluxo de dados - limitado a alguns *megabytes* por dia - e a verificação das informações não será validada a todo momento, mas entre intervalos de tempo.

4.1.1 Módulos utilizados

O módulo utilizado para estabelecer a conexão com a internet é o SIM800L e será conectado a uma *Raspberry Pi 4 Model B* pela interface serial receptor/transmissor assíncrono universal (UART).



Figura 7 – Módulo SIM800L utilizado.

Fonte: Produzido pelo autor

Este módulo é, na verdade, um conjunto complexo com diversos componentes, diferente do que normalmente é um circuito integrado de baixa potência. Quando conectado pode realizar envio de mensagem de texto (SMS) e conexão com a internet, entre outras coisas, por meio de comandos AT. Cada comando enviado, se realizada a correta conexão, é enviado por uma interface serial e resulta em uma resposta do módulo.

O SIM800L pode ser alimentado em uma faixa de $3,4V$ a $4,4V$ e consome uma corrente mínima de $0,7mA$ em *sleep mode*, podendo aumentar esse consumo até $2A$ em picos de utilização, quando a conexão é estabelecida e sustentada para transmissão e recebimento de dados. Essa característica, diferente de muitos outros módulos em sistemas embarcados, faz dele um grande consumidor de potência que necessita de uma atenção especial no que diz respeito à sua alimentação.

A comunicação do módulo pode e deve ser considerada em duas etapas distintas: a comunicação com a internet utilizando a infraestrutura de alguma operadora e a comunicação com o computador que receberá essas informações. A taxa máxima de transmissão e recebimento de dados do SIM800L é de $85,6kbps$, enquanto em sua porta serial para comunicação com o computador, a taxa de bits pode ir de $1200bps$ a $115200bps$.

4.1.2 Integração

A integração do SIM800L é feita junto a um *Raspberry Pi 4 Model B* pela interface de receptor/transmissor assíncrono universal (UART) a uma taxa de $115200bps$ na comunicação

entre ambos. Já a comunicação com a infraestrutura da operadora para conexão com a internet é configurada para que fique na capacidade máxima de 85,6kbps.

Como a comunicação com o módulo é feita para realizar uma comunicação com protocolo ponto a ponto (PPP), para evitar o uso excessivo de comandos AT para iniciar a conexão e sustentá-la, será utilizado um *software* próprio para comunicações PPP, o *Point-to-Point Protocol Daemon* e sua documentação disponível na *internet*. Com isso, evita-se a utilização de comandos AT em todos momentos em que a conexão for estabelecida para envio de dados. Esse processo é abstraído para um arquivo de configuração onde é definida a porta de comunicação, o nome do ponto de acesso (APN), *bit rate* de comunicação na porta serial, endereço de IP, endereço de DNS entre outras configurações da rede.

Assim que configurada a rede, a conexão pode ser inicializada pelo próprio PPPD e passa a funcionar como uma conexão do próprio *Raspberry* com a internet e pode ser usada normalmente. Essa rede pode ser desativada e reativada com simples comandos para que não fique ativada e ociosa em momentos que não é necessária.

A ligação é feita utilizando os pinos *TX* e *RX* que correspondem aos GPIO 14 e GPIO 15 respectivamente, nenhuma outra conexão será feita com a *Raspberry* porque as outras conexões do módulo são apenas para a alimentação e ela não será feita a partir de conexões com a *Raspberry*, considerando-se o consumo do SIM800L. Isso retira da *Raspberry* uma carga que pode afetar o funcionamento de outros sistemas por consumir uma corrente relativamente elevada em comparação à alimentação do próprio *Raspberry* e de outros módulos ligados a ele.

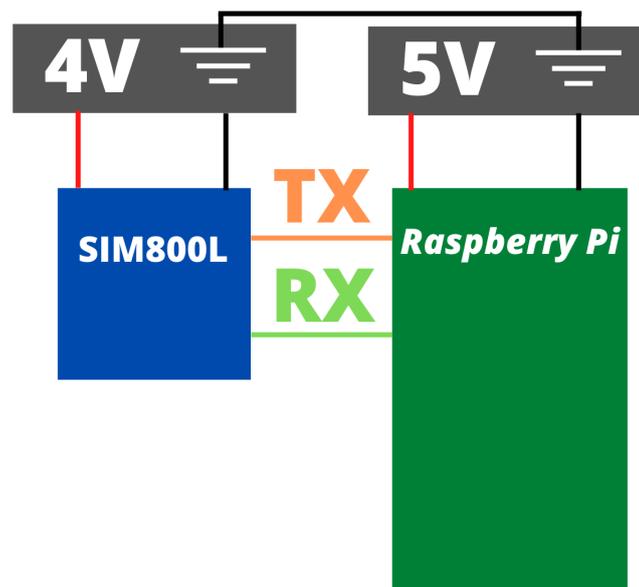


Figura 8 – Diagrama de conexão para o SIM800L e *Raspberry Pi*.

Fonte: Produzido pelo autor

Nos quadros de energia, o SIM800L deve ficar próximo de uma das extremidades

- preferencialmente uma superior - com a antena para fora, isso porque as caixas serão aterradas e reduzirão muito a potência do sinal utilizado na comunicação do chip. Há um problema nessa distribuição porque o *Raspberry* não poderá ficar tão próximo quanto o desejado do módulo, os fios de comunicação da interface serial deverão ser um pouco mais longos, por isso, o *Raspberry* terá uma preferência de posicionamento na parte superior do trilho DIN na caixa.

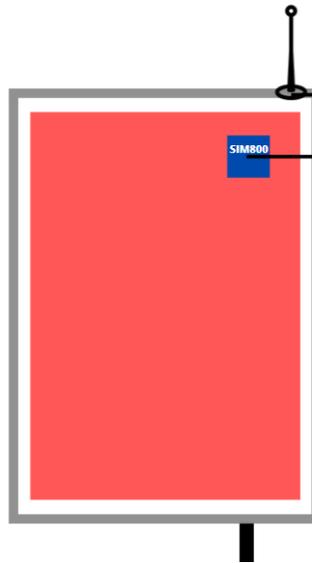


Figura 9 – Modelo de posicionamento do SIM800L na caixa.

Fonte: Produzido pelo autor

Outra questão analisada é temperatura de operação do SIM800L que varia entre $-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$. Como a caixa é fechada e existem outros dispositivos geradores de calor, para evitar superaquecimento do módulo deverá ser utilizada alguma forma de dissipação de calor. Isso poderá ser feito com a abertura de furos nas laterais superiores da caixa com uma ventilação forçada por baixo por ventoinhas.

4.2 Sistema de medição com rede SPI

A interface serial periférica (SPI) é utilizada neste trabalho pela disponibilidade das portas no *Raspberry* e adequação ao modelo de coleta de dados projetado. É uma comunicação de baixa potência com módulos que têm suporte ao padrão.

4.2.1 Módulos utilizados

Neste trabalho, é proposto um conjunto de placas com diferentes circuitos integrados, incluindo sensores, amplificadores e conversores analógicos/digitais, interconectados e agrupados em uma placa de acrílico de modo a formarem um conjunto único que realiza as medições das grandezas necessárias e transmissão para a *Raspberry Pi*. A este conjunto

é dado o nome de "conjuntos SPI". Quando mencionado o conjunto SPI, portanto, não é tratado apenas o módulo capaz de comunicar-se pelo padrão SPI, mas todo o conjunto ao qual está conectado, formando um sistema de medição.

Os módulos utilizados na comunicação SPI têm a principal função de medir e transmitir grandezas elétricas das plantas fotovoltaicas, como diferença de potencial em cada módulo fotovoltaico e corrente elétrica que circula em cada associação de dois módulos fotovoltaicos em série. Os sensores fazem coleta dessas grandezas diretamente do sistema enquanto os conversores analógicos/digitais fazem a aquisição, digitalização e transmissão da informação utilizando o barramento SPI. Portanto, os sensores e amplificadores, apesar de incluídos no conjunto, não comunicam-se usando o padrão SPI, fazem apenas o condicionamento dos sinais e a comunicação SPI ocorre de fato apenas no conversor analógico/digital.

4.2.1.1 Conversor analógico/digital AD7705

O circuito mais importante na comunicação SPI, por ser ele quem de fato faz a comunicação pelo barramento, é o AD7705. Este é um conversor analógico/digital com resolução de 16 bits e trata-se de um circuito integrado, mas que também foi utilizado em uma placa de circuito impresso com diferentes componentes associados e conexões elétricas já estabelecidas.

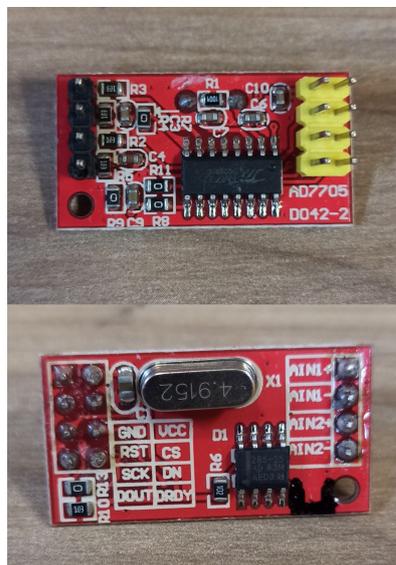


Figura 10 – Conversor analógico/digital AD7705 utilizado.

Fonte: Produzido pelo autor

O AD7705 possui dois canais diferenciais para leitura e conversão de sinais analógicos, além de pinos MISO (*master in subordinate out*), MOSI (*master out subordinate in*) e um SS (*subordinate select*) que tornam possível sua utilização em uma rede SPI. No circuito integrado esses pinos são respectivamente DOUT, DIN e CS. Há ainda conexões para o *clock* de sincronização na comunicação e a alimentação do circuito.



Figura 12 – Placa de sensor P25 utilizada.

Fonte: Produzido pelo autor

Na placa, os resistores de $6,8k\Omega$ e $33k\Omega$, ambos com uma tolerância de 5%, são associados em série e a tensão no resistor de $6,8k\Omega$ é ligada diretamente na saída para que a referência negativa tanto da entrada quanto da saída sejam a mesma.

Essa relação de resistências, de forma exata, oferece na saída uma relação entre tensões de entrada e saída tal que $\frac{V_{in}}{V_{out}} = 0,17$ para uma placa testada. A placa mostrada na [Figura 12](#), entretanto, é fornecida com um ganho teórico prometido de 0,20. Essa divergência faz com que cada placa necessite de testes mais precisos para verificar qual é o ganho real dada a tolerância dos resistores utilizados. Neste cenário, algumas placas também precisam de uma modificação nos resistores da associação.

A placa utilizada com o conjunto de resistores já soldados foi projetada para suportar uma tensão máxima de 25V sem que a corrente elétrica comprometa as trilhas, o valor máximo da corrente suportada não é informada pelo fornecedor, porém pode ser dimensionada utilizando a lei de *Ohm* e seu valor médio máximo seria, aproximadamente, $I_{max} = 628,14mA$. Outra característica útil do sensor é sua simplicidade na implementação, por ser um circuito bastante conhecido, e a possibilidade de adaptação, além de ser compacto e ideal para ser utilizado em um ambiente onde o espaço disponível é reduzido.

Neste projeto, entretanto, é desejável que os sensores possuam ganho de 0,1 para que a tensão máxima prevista de 25V em cada painel seja reduzida e não ultrapasse a tensão máxima que pode ser lida nos conversores AD7705, tornando necessária a troca dos resistores para que correspondam ao valor desejado na relação entre saída e entrada do sensor. O ganho dimensionado é um valor base, pois o ganho limita-se à disponibilidade comercial de resistores com valores de resistência desejados.

Tabela 1 – Resistências utilizadas para cada P25.

Módulo fotovoltaico	Resistores no P25($k\Omega/k\Omega$)	Ganho do sensor
$P_{Fx} - 1$	3,24/67,70	0,048
$P_{Fx} - 2$	3,25/68,00	0,048
$P_{Fl} - 1_1$	4,60/47,50	0,097
$P_{Fl} - 1_2$	4,62/47,10	0,098
$P_{Fl} - 2_1$	4,62/47,50	0,097
$P_{Fl} - 2_2$	3,28/69,40	0,047

A [Tabela 1](#) mostra a relação de resistores adicionados, com uma associação direta para cada módulo fotovoltaico. As resistências foram medidas para obtenção dos valores.

4.2.1.3 Módulo sensor de corrente ACS712

Para medir a corrente elétrica das associações em série de dois módulos fotovoltaicos foram utilizados sensores de corrente ACS712 capazes de medirem correntes de $-25A$ a $25A$. Este é um sensor de efeito Hall capaz de mensurar corrente elétrica por variação em campo magnético, dado que a intensidade do campo induzido é proporcional à corrente que o produz.

O sensor verifica a corrente por diferença de potencial causada por campo induzido, então precisa de uma alimentação para o circuito eletrônico que realiza essa análise com base no campo induzido pelo condutor. Sua saída é proporcional à corrente contínua ou alternada.

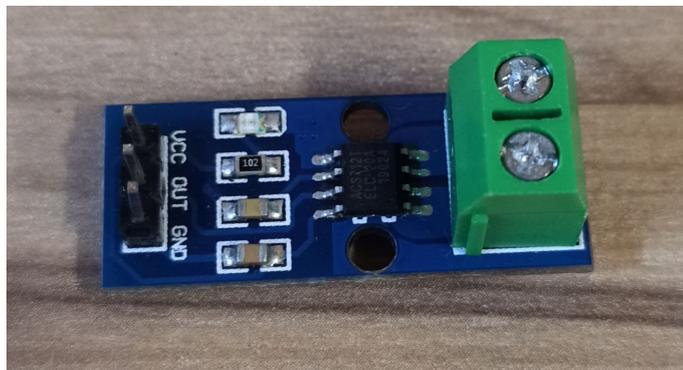


Figura 13 – Sensor de corrente ACS712 utilizado.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 13](#) apresenta a placa utilizada no projeto. É importante destacar que o ACS712 é apenas o circuito integrado. A placa como um todo faz conexões nos pinos do ACS712 e possui alguns componentes recomendados para ligação e operação do circuito integrado, como resistores e capacitores na sua conexão de alimentação. A placa opera com tensão nominal de $5V_{CC}$, valor de referência TTL , e sua saída varia de $0V_{CC}$ a $5V_{CC}$.

Como este sensor é capaz de medir correntes em ambos sentidos, positivo ou negativo dada a referência, para uma corrente nula e alimentação de $5V_{CC}$, apresenta uma saída de

$2,5V_{CC}$ e, a partir desse valor de referência de zero dado por $0,5 \times V_{CC}$, mede correntes negativas para saídas abaixo de $2,5V_{CC}$ e correntes positivas quando apresenta saída acima de $2,5V_{CC}$. Sua sensibilidade típica é $100mV/A$, variando de $96mV/A$ a $104mV/A$ em seu fundo de escala para correntes negativas e positivas, respectivamente. Outra informação útil é seu erro de $\pm 1,5\%$ para operação nominal (alimentação de $5V_{CC}$, temperatura ambiente de $25^{\circ}C$ e sensibilidade de $100mV/A$, ou seja, fora dos limites do fundo de escala).

A temperatura de operação do sensor é outro fator que contribui para sua utilização no projeto, podendo operar em temperaturas de $-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$. O sensor é capaz de operar em caixas expostas ao Sol com outros dispositivos que também liberam calor. Seu consumo também é muito baixo comparado a outros dispositivos com processamento, como a *Raspberry Pi*, consumindo em operação nominal $10mA$.

4.2.1.4 Amplificador operacional diferencial AD620

Assim como os sensores supracitados, o AD620 não passa de um circuito integrado, um amplificador operacional, mas foi utilizado em uma placa de circuito impresso com conexões que facilitam seu uso.

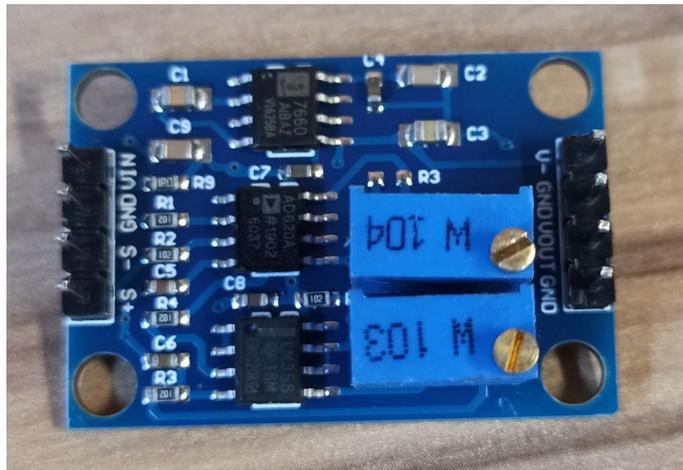


Figura 14 – Amplificador diferencial AD620 utilizado.

Fonte: Produzido pelo autor

O AD620 nada mais é do que um amplificador diferencial com alimentação simétrica de $\pm 2,3V_{CC}$ a $\pm 18V_{CC}$ e com um baixo consumo, chegando a $1,3mA$ em operação nominal, além de oferecer um ganho na saída que varia de 1 a 10000.

A placa utilizada limita e retira algumas características do circuito integrado puro. A alimentação passa a ser de $3V_{CC}$ a $12V_{CC}$, tensões não simétricas, e o ganho limita-se de 1,5 a 1000 pelo potenciômetro na placa que controla o ganho. Há outro potenciômetro também para ajustar o zero do amplificador. Essas características são especialmente úteis por retirar a necessidade de uma fonte simétrica. O AD620 na placa pode ser alimentado com $5V_{CC}$

disponível amplamente por ser utilizado em diversos dispositivos e a simetria da fonte é feita na própria placa. Apesar dessas características, é recomendável que o amplificador seja utilizado com ganhos mais baixos possíveis para evitar a amplificação de ruídos, mesmo que seu erro nominal para ganho de 1000 seja até 0,40%, enquanto esse mesmo erro para ganho unitário é de até 0,03%, e seu sinal de saída dê a diferença entre duas entradas, reduzindo ou até mesmo anulando ruídos iguais presentes nas duas entradas.

Tabela 2 – Ganho mínimo para os AD620.

Amplificador	Ganho mínimo
<i>AD620</i> ₁	1,471
<i>AD620</i> ₂	1,479
<i>AD620</i> ₃	1,488
<i>AD620</i> ₄	1,471
<i>AD620</i> ₅	1,472
<i>AD620</i> ₆	1,495

A [Tabela 2](#) acima apresenta o ganho mínimo medido para cada amplificador diferencial. O teste foi realizado aplicando-se uma tensão controlada em 1V na entrada e medindo-se a menor tensão de saída com um multímetro, com precisão de milivolts, enquanto o potenciômetro na placa era ajustado. Nota-se que, nos *AD620* não há qualquer indicação de posicionamento dos amplificadores em módulos fotovoltaicos específicos, isso porque foram todos identificados com o ganho mínimo que apresentaram para, posteriormente, seus ganhos serem ajustados durante a montagem do sistema no próprio código preparado para a leitura. A possibilidade de alteração do ganho medido antes da montagem faz com que seja preferível uma verificação ainda após montagem.

Apesar dos componentes na placa, o fornecedor ainda garante um consumo médio de 1,3mA. A temperatura de operação do circuito é -40°C a 85°C , sendo interessante para a aplicação no projeto por suportar uma temperatura superior à temperatura esperada na caixa. As características dinâmicas do *AD620*, apesar de consideradas, não são tão relevantes para a aplicação por não ser esperada uma alta frequência na variação dos sinais.

4.2.2 Integração

O denominado conjunto SPI inclui um conjunto de sensores, amplificadores e conversores analógico/digital que funcionam de forma integrada na leitura das grandezas físicas de interesse, tratamento e transmissão desses dados para a *Raspberry Pi*.

A primeira camada é onde se encontram os sensores fixados, incluindo os P25 descritos na [subseção 4.2.1.2](#) e os ACS712 descritos na [subseção 4.2.1.3](#). As grandezas lidas por esses sensores, em primeiro momento, teriam suas leituras passadas diretamente para os conversores AD7705 descritos na [subseção 4.2.1.1](#), porém isso não é possível para o caso onde a saída do sensor P25 é do primeiro módulo fotovoltaico em qualquer associação em

série descritas no [Capítulo 3](#), isso ocorre por causa da conexão feita na placa utilizada com o AD7705, onde os terminais negativos de cada canal estão conectados diretamente com o terminal negativo da alimentação do circuito e também com a referência, isso torna o AD7705 incapaz de realizar uma leitura diferencial entre seus canais e, por esse motivo, é adicionado o AD620 descrito na [subseção 4.2.1.4](#) para realizar a leitura diferencial da tensão dada no P25 dos primeiros módulos fotovoltaicos e recondicionar essa tensão para um mesmo referencial comum entre a dupla dos módulos fotovoltaicos e a alimentação do AD7705.

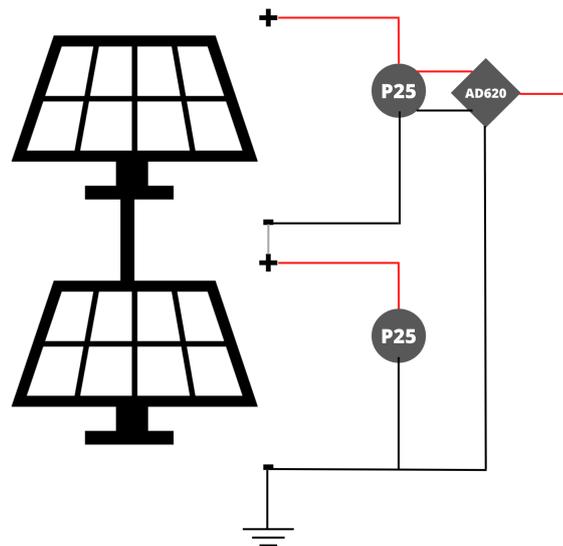


Figura 15 – Esquemático de conexão entre módulos fotovoltaicos com sensores P25 e amplificadores AD620.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 15](#) mostra como é feita a correção do referencial nas leituras para que esses valores possam ser utilizados nos conversores AD7705, assim é possível que sejam utilizados os dois canais e também a referência negativa do conversor analógico/digital não seja um problema na leitura da primeira placa porque a referência da alimentação da placa e da leitura devem ser as mesmas.

É importante destacar que existem dois conjuntos SPI, uma para um sistema que ficará gerando energia elétrica em uma plataforma flutuante e outro que fará geração de energia elétrica em um telhado. Esses dois sistemas possuem diferenças entre si, tanto no número de amplificadores diferenciais e conversores analógicos/digitais quanto em alguns sensores que estão presentes ou não em determinados conjuntos. Os sistemas foram montadas em acrílico com espessura de 3mm e divididas em dois níveis para comportar mais componentes em uma área de base reduzida, sem causar superlotação ou comprometer a distribuição do espaço nas caixas de energia.

O conjunto do sistema flutuante possui mais componentes e é um pouco maior do

que o do sistema fixo, possuindo $15 \times 11 \text{cm}^2$ e $12 \times 11 \text{cm}^2$ de área de base respectivamente. Ambos os sistemas têm um espaçamento de 5cm entre os níveis para conexão dos cabos de comunicação e alimentação. Outro motivo que leva os conjuntos a terem dois níveis é a necessidade de colocação do *Raspberry Pi* próximo aos módulos de comunicação SPI e também a alimentação que será feita por conversores DC-DC do tipo *stepdown*.

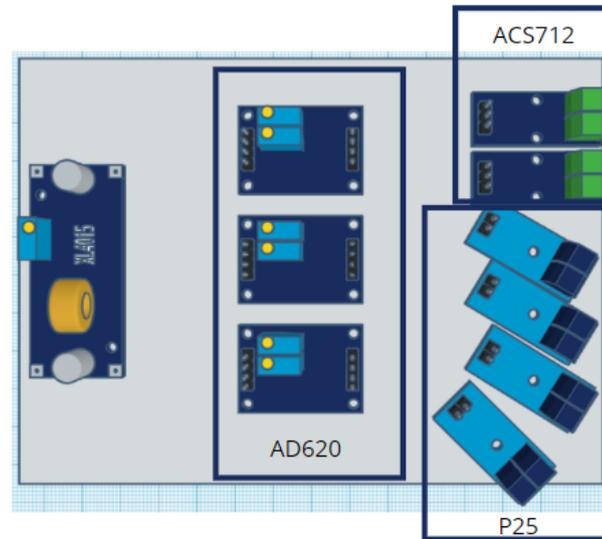


Figura 16 – Modelo 3D do nível inferior do conjunto SPI para sistema flutuante.

Fonte: Produzido pelo autor

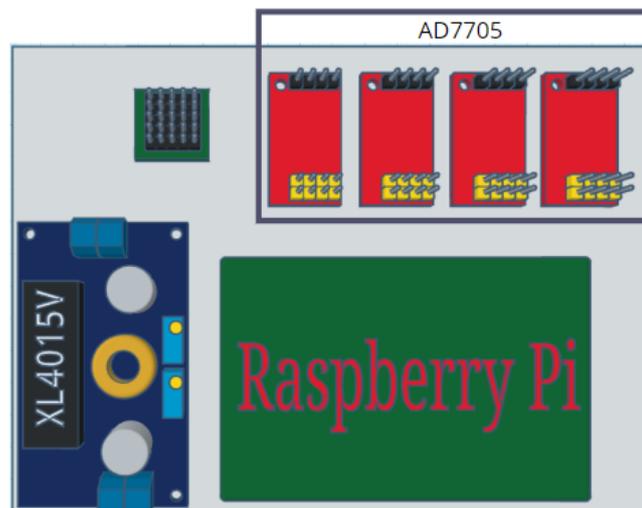


Figura 17 – Modelo 3D do nível superior do conjunto SPI para sistema flutuante.

Fonte: Produzido pelo autor

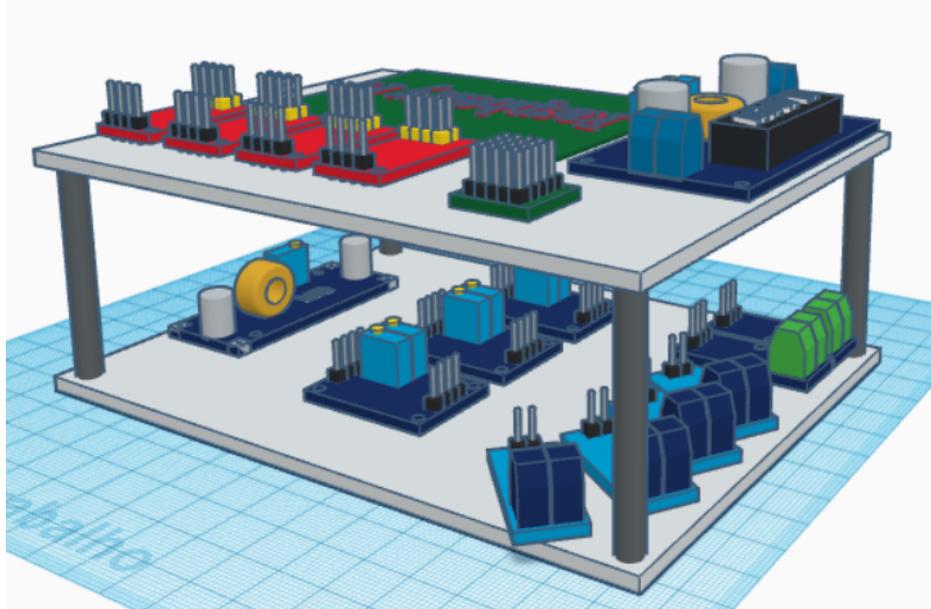


Figura 18 – Modelo 3D do conjunto SPI para sistema flutuante.

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 3 – Placas e componentes no conjunto do sistema flutuante.

Módulo	Quantidade
P25	4
ACS712	2
AD620	3
AD7705	4
<i>Raspberry Pi</i>	1
XL4015	2
Placa perfurada	1

O nível inferior no conjunto SPI para o sistema flutuante apresentado na [Figura 16](#) mostra os sensores a direita (P25 e ACS712), os amplificadores no centro da placa de acrílico e a esquerda o regulador de tensão para alimentar o circuito. É possível observar que, na fileira de sensores a direita, alguns aparecem inclinados, essa correção foi feita pela dificuldade de organização dos módulos no conjunto durante a montagem de forma que os furos e parafusos que prendem os módulos não interferissem com a fixador do trilho DIN. Já a [Figura 17](#) mostra o nível superior do conjunto para o sistema flutuante. Nesse nível estão colocados os conversores analógicos/digitais AD7705 na parte superior direita com uma placa perfurada de fenolite a esquerda para distribuição dos sinais MISO, MOSI, SCLK, 3,3V e GND. A *Raspberry Pi* localizada abaixo com o conversor DC-DC XL4015 a esquerda para conversão dos 12V da bateria para 5V que alimentará a placa. O sistema completo para a planta de geração de energia fotovoltaica flutuante no Lago Paranoá é mostrado na [Figura 18](#).

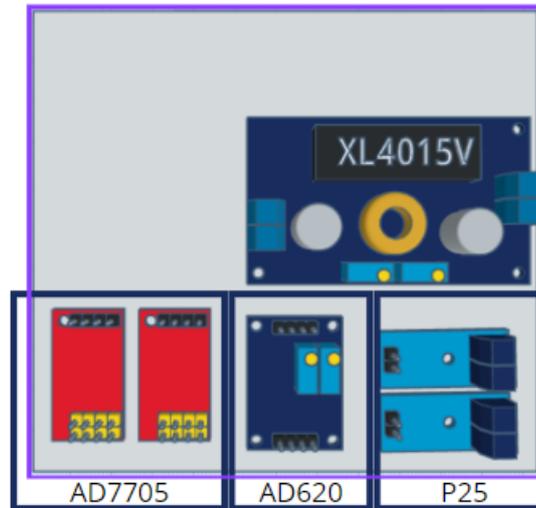


Figura 19 – Modelo 3D do nível inferior do conjunto SPI para sistema fixo.

Fonte: Produzido pelo autor

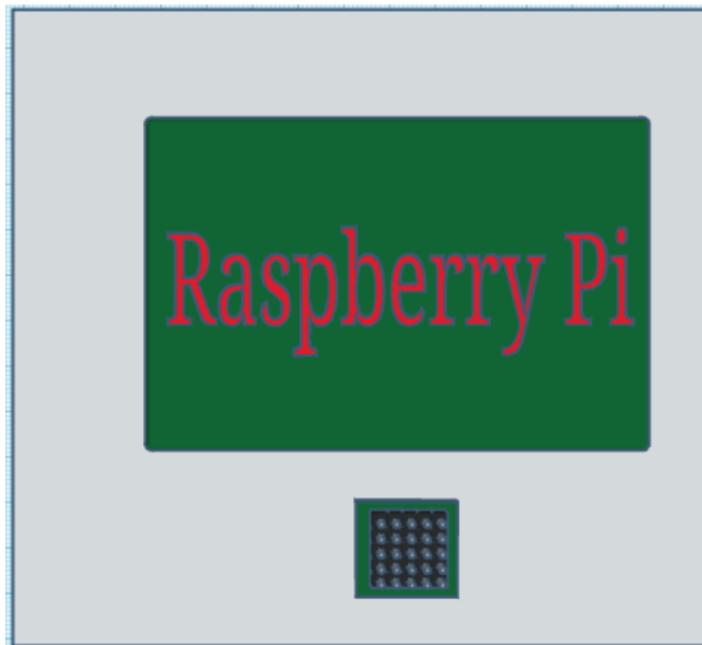


Figura 20 – Modelo 3D do nível superior do conjunto SPI para sistema fixo.

Fonte: Produzido pelo autor

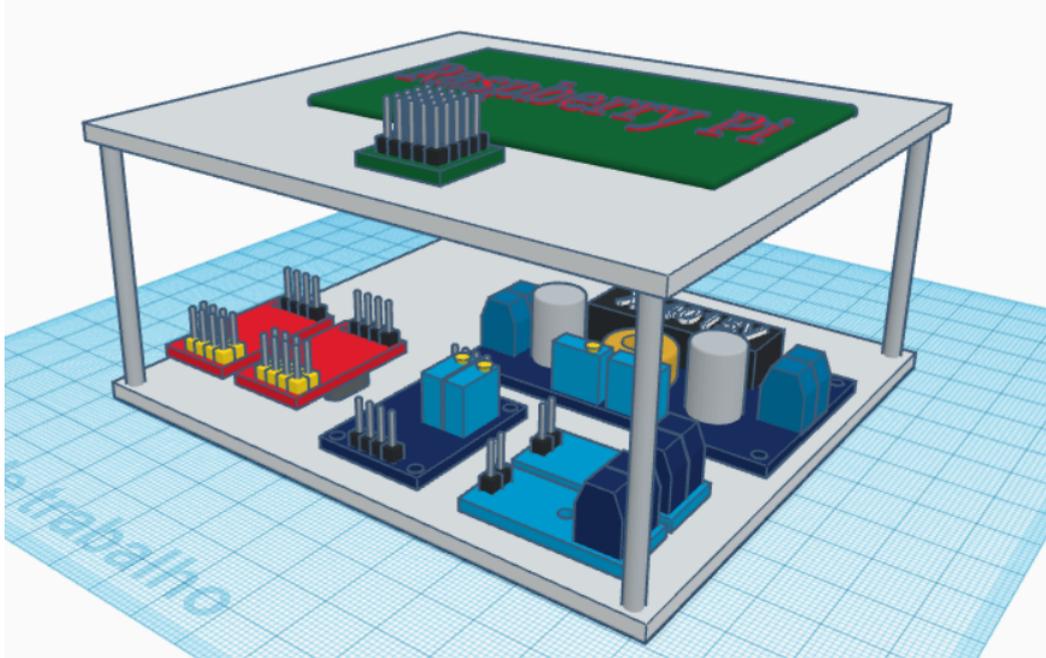


Figura 21 – Modelo 3D do conjunto SPI para sistema fixo.

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 4 – Placas e componentes no conjunto do sistema fixo.

Módulo	Quantidade
P25	2
ACS712	0
AD620	1
AD7705	2
Raspberry Pi	1
XL4015	1
Placa perfurada	1

No sistema fixo, há no nível inferior do conjunto, mostrado na [Figura 19](#), os sensores P25 e ACS712, além do amplificador diferencial AD620. Diferente do sistema flutuante, aqui os conversores analógicos/digitais encontram-se no nível inferior do conjunto. Outra diferença, perceptível na parte superior, apresentada na [Figura 20](#) é a presença de apenas um regulador de tensão que alimentará a *Raspberry Pi*. Isso é feito pelo baixo consumo dos módulos utilizados e a pouca quantidade, permitindo que seja considerada a alimentação deles pelo mesmo regulador que a *Raspberry Pi* utiliza. Além disso, há também a mesma placa perfurada de fenolite para distribuição dos sinais necessários na comunicação entre a os conversores AD7705 e *Raspberry Pi*. O conjunto completo que será utilizado na planta de geração de energia fotovoltaica fixa na UnB é apresentado na [Figura 21](#).

Os quadros de energia para implementação das plantas fotovoltaicas são projetados para possuírem uma distribuição igual em ambos os sistemas, com os conjuntos SPI localizadas na mesma área.

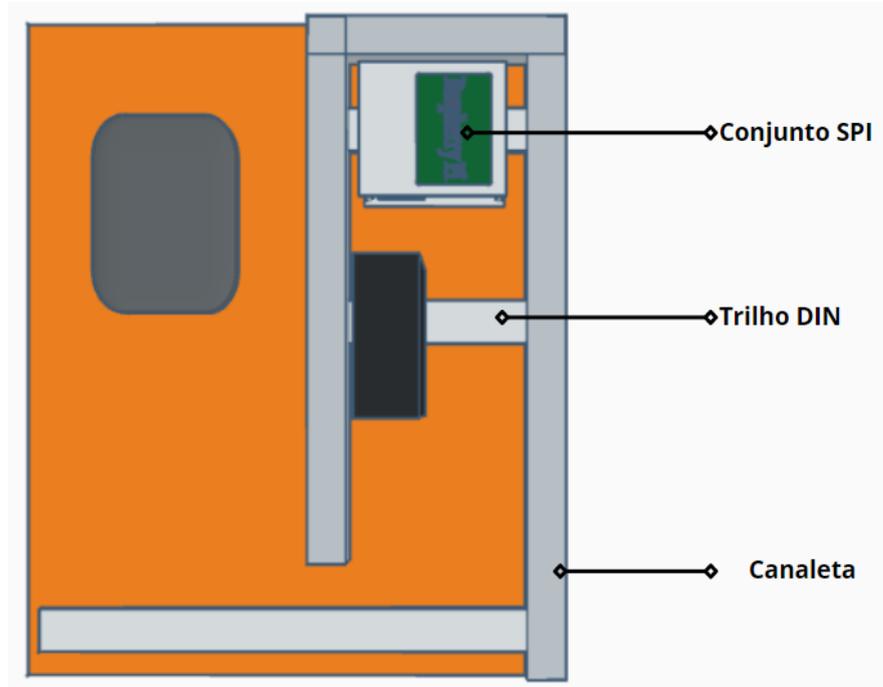


Figura 22 – Modelo 3D do quadro de energia proposto.

Fonte: Produzido pelo autor

Na [Figura 22](#) é possível observar que o conjunto SPI está localizado entre um conjunto de canaletas. O projeto foi feito para ser justo e ter outros dispositivos e conectores distribuídos em vários níveis de trilho DIN porque há uma grande área necessária para o espaçamento do controlador de carga (representado à esquerda).

4.3 Sistema de medição por I2C

Neste trabalho, o barramento I2C é utilizado para coleta de dados ambientais e de atitude do sistema, como temperatura, umidade, inclinação e movimentação no espaço. É utilizado apenas para o sistema flutuante, considerando que ele será o único a ter uma movimentação a ser medida para acompanhamento, diferente do sistema fixo onde se espera não haver movimento dos módulos.

4.3.1 Módulos utilizados

Um único módulo é utilizado para medição de todas essas grandezas, o *Sense Hat*. É um módulo muito bem documentado e de fácil utilização por ser uma placa projetada para uso direto na própria *Raspberry Pi*, na missão *Astro Pi*, posteriormente disponibilizada comercialmente. Há uma biblioteca exclusivamente preparada para o *Sense Hat*, desenvolvida pela própria *Raspberry Pi Foundation*, que facilita o uso.

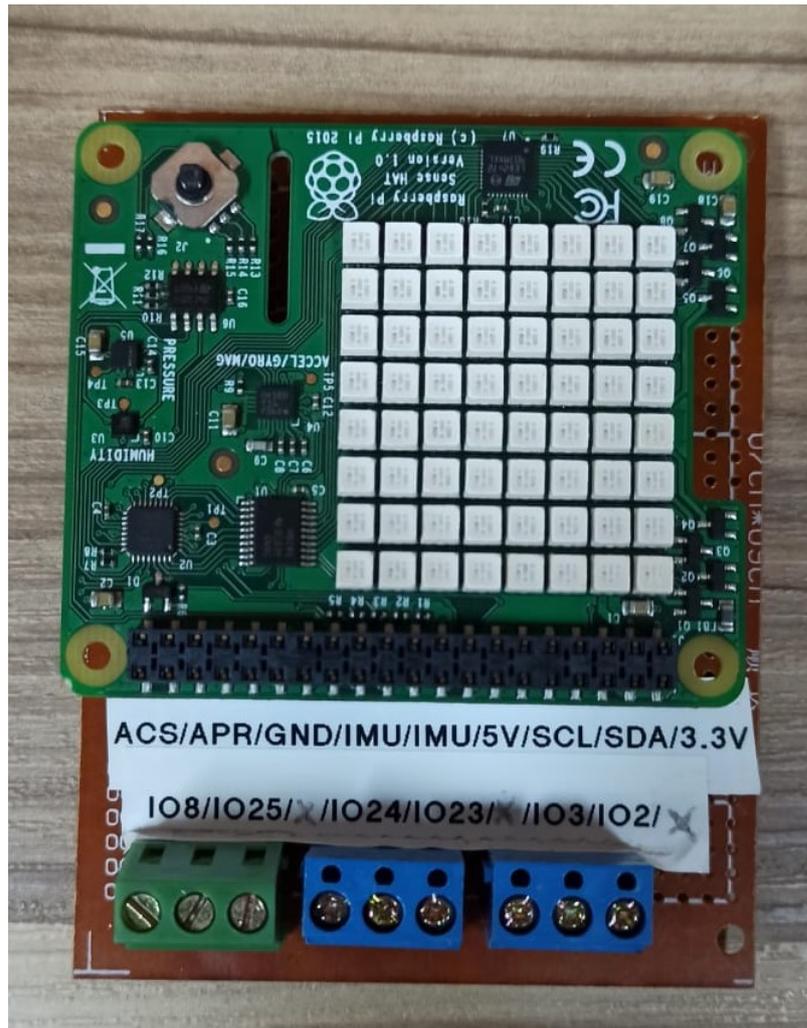


Figura 23 – *Sense Hat*.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 23](#) mostra o módulo, que conta com sensores de grandezas ambientais, como temperatura, umidade e pressão barométrica. Além de sensores de atitude, como giroscópio, acelerômetro e magnetômetro. O *Sense Hat* também conta com uma matriz de LED 8x8 e um *joystick*, porém essas duas características do módulo não serão utilizadas para o projeto.

4.3.2 Integração

A implementação do *Sense Hat* é extremamente simples, pois o módulo foi feito para ser encaixado na *Raspberry Pi*, porém não é a forma que poderá ser feita no projeto. O sensor estará distante da *Raspberry Pi*, acoplado nos módulos fotovoltaicos e outros pinos que são utilizados para outras funções que não são do *Sense Hat* e, por isso, ficariam bloqueados se assim fosse instalado.

São conectados apenas seis GPIOs necessários, além da alimentação e GND. Os

GPIOs 2 e 3 são da interface I2C pela qual a *Raspberry Pi* se comunica com o *Sense Hat*. Os GPIOs 23 e 24 são utilizados para interrupção da IMU (unidade de medida inercial), usados no sensor para fazer a leitura dos sensores de atitude (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro). Os pinos 8 e 25 correspondem ao *chip select* e *program reset* respectivamente e são também conectados, porém são usados para fins mais específicos e não necessariamente relacionados à leitura dos sensores, como validações de algoritmo e ativação da placa.

4.4 Integração com *Raspberry Pi*

O sistema foi projetado para ter diferentes conjuntos de sensores fornecendo dados em diferentes frequências. Além da integração entre as leituras, manejo de arquivos e envio para nuvem.

4.4.1 Leitura de sensores

Os sensores utilizados, tanto para medição de atitude e grandezas ambientais com o *Sense Hat* (seção 4.3) quanto grandezas elétricas com os conjuntos SPI (seção 4.2) são lidos de forma escalonada por *software*. O intervalo de amostragem é facilmente ajustável para que possa ser alterado e se adequar em diferentes cenários.

A programação padrão inicial prevê uma leitura dos sensores no *Sense Hat* a cada $150ms$, isso porque o principal objetivo dessa medição é detectar oscilações na orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos flutuantes no Lago Paranoá. Entretanto, faz-se necessária a possibilidade de ajuste do intervalo da leitura pela não determinação exata da frequência de oscilação das ondas na superfície da água em piores casos. Para a coleta dos dados nos registradores dos conversores analógicos/digitais AD7705, é inicialmente determinada uma taxa com um período de $75ms$ entre amostras.

Em uma única rotina, utilizando a biblioteca de escalonamento *schedule*, em *Python*, é possível escalonar as leituras como tarefas periódicas, determinando também sua periodicidade. Porém, como ambas são chamadas em um único processo, a execução de um *script* em *Python*, tornam-se um escalonamento de tarefas que competem entre si por recurso porque, na verdade, ambas são uma tarefa única para o *kernel* do sistema operacional.

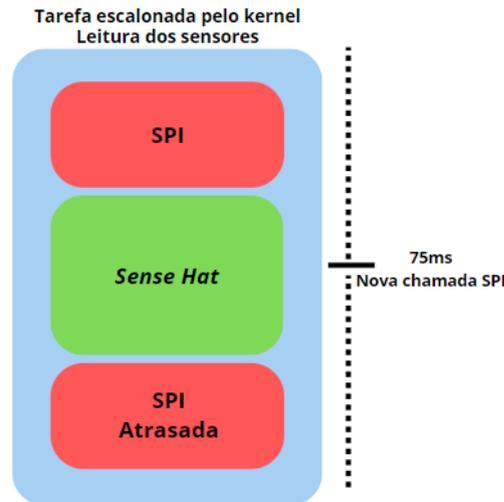


Figura 24 – Modelo do escalonamento de tarefas de leitura dos sensores.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 24](#) mostra como é feito esse escalonamento, estando os dois processos de leitura dentro de outro processo. Esse modelo não garante o atendimento dos *deadlines* das tarefas, atrasando sua próxima execução e, conseqüentemente, fazendo com que o intervalo entre as leituras seja instável. Apesar disso, a biblioteca de escalonamento utilizada mostra-se prática e com um nível de confiabilidade suficiente para que a variação entre os intervalos de leitura, mesmo que não sejam constantes e até instáveis, comporte-se bem com o sistema funcionando em regime permanente, ainda que mantenha intervalos maiores do que o desejado. É importante observar também que o modelo apresentado na [Figura 24](#) é demasiadamente simplificado, pois as próprias tarefas no *kernel* do sistema operacional podem sofrer interrupções ou atrasos em sua execução porque elas também concorrem por recursos na execução.

Na leitura dos módulos do conjunto SPI é necessário que seja feita uma correção. Na [Tabela 2](#), como é possível observar, existem diferentes amplificadores diferenciais com diferentes ganhos mínimos configurados em bancada de teste. Esse comportamento estende-se também para os sensores P25 ([subseção 4.2.1.2](#)), mas que não são capazes de fornecer exatamente o ganho desejado, como mostrado na [Tabela 1](#). Esses diferentes ganhos, se não considerados e bem descritos em código, podem acumular erro na transmissão entre circuitos e, por fim, gerar um resultado equivocado para a medição desejada. Ao se considerarem as resistências colocadas nos divisores de tensão dos P25, a tabela fornece um valor confiável após medido, cuja variação ocorre, principalmente, pela variação de temperatura. Diferentemente, os amplificadores AD620 não fornecem essa segurança após a calibração, seu *offset* e ganho são configurados por potenciômetros que, além da variação com temperatura, podem ser modificados pelo manuseio durante a montagem do sistema.

Para corrigir o problema de variação de ganhos e *offsets* nas associações do sistema, o

algoritmo adotado tem uma forma capaz de corrigir alguma divergência com testes rápidos antes da implementação. Se for feito um curto-circuito na entrada do amplificador diferencial AD620 e medida a tensão de saída, tem-se um *offset* atual, da mesma forma podemos ter uma tensão conhecida colocada em seus terminais diferenciais para que seja medida a saída. Desse modo, é possível elaborar uma fórmula no algoritmo com variáveis que podem ser alteradas. Para as tensões:

$$V_{real} = (V_{measured} - AD620_{Offset}) * \frac{1}{G_{AD620}} * \frac{1}{G_{P25}} \quad (4.1)$$

onde V_{real} é a tensão real do módulo fotovoltaico, $V_{measured}$ a tensão medida no conversor analógico/digital AD7705, G_{AD620} é o ganho do amplificador diferencial AD620 medido pela razão entre a tensão de saída e tensão de entrada no teste realizado, G_{P25} é o ganho do sensor de tensão P25 dado pela razão entre as resistências colocadas no circuito e $AD620_{Offset}$ é a tensão de *offset* medida no amplificador diferencial AD620 quando curto-circuitada sua entrada (tensão diferencial zero). Para módulos fotovoltaicos que se encontram no mesmo referencial (segundo módulo fotovoltaico de cada associação) considera-se $G_{AD620} = 1$, pois esses módulos dispensam a presença de um amplificador diferencial para serem lidos, portanto, são afetados apenas pelo ganho do sensor de tensão.

Ainda na leitura, é necessário mencionar que a tensão $V_{measured}$ também possui uma fórmula para ser obtida no processo que não é dada diretamente. Considerando a resolução do conversor analógico/digital de 16 *bits* com uma escala que varia de 0V a 5V, portanto

$$V_{measured} = \frac{(5V - 0V)}{2^{16} - 1} * ReadWord \quad (4.2)$$

onde *ReadWord* é a palavra binária de 16 *bits* lida no registrador do conversor analógico/digital, enquanto a razão apresentada pode ser interpretada também como a sensibilidade do conversor AD7705, ou seja, representa a menor variação que deve haver na tensão lida para que ele mude sua palavra binária. Este valor para o AD7705 é de, aproximadamente 76,29 μ V.

A tensão obtida pelos sensores de corrente ACS712 também precisa ser tratada e convertida para o valores de corrente correspondentes às leituras feitas. Isso pode ser feito pela seguinte expressão:

$$I_{real} = (V_{measured} - Offset_{ACS712}) * \frac{1}{S_{ACS712}} \quad (4.3)$$

onde $Offset_{ACS712}$ é o *offset* do sensor, fixo em 2,5V, e S_{ACS712} é a sensibilidade do sensor, mencionada na [subseção 4.2.1.3](#) e igual a 10⁻¹VA⁻¹.

O *Sense Hat*, mostrado na [Figura 23](#), tem uma integração bastante simplificada por bibliotecas já presentes no sistema operacional da *Raspberry Pi*, bastando adicioná-la ao

projeto e usar comando de leitura para cada sensor. O período inicial das medições para este sensor é de $100ms$ e, como demonstrado na [Figura 24](#), ocorre competição entre as medições do *Sense Hat* e do sistema SPI. Para otimizar as leituras e reduzir o problema na competição, tanto o período de amostragem para a rede SPI quanto para o *Sense Hat* são ajustáveis.

4.4.2 Comunicação com a nuvem e manejo de arquivos

Como mencionado na [subseção 4.1.2](#), foi utilizado um *software* para facilitar a utilização do módulo SIM800. Os pinos RX (GPIO 15) e TX (GPIO 14) são os únicos utilizados para a comunicação na interface UART e a configuração é feita por um arquivo denominado *rnet*, permitindo que a conexão seja ativada ou desativada com uma única linha de comando.

```
#APN (claro.com.br)
connect "/usr/sbin/chat -v -f /etc/chatscripts/gprs -T claro.com.br"

# Porta
/dev/ttyS0

# Baudrate
115200

# IP com alocação dinâmica
noipdefault

# DNS do provedor
usepeerdns

# Conexao padrao com a internet
defaultroute

# Conexao persistente
persist

# Sem autenticacao
noauth

# Sem controle de fluxo
nocrtscts

# Sem linha de controle do modem
local
```

Figura 25 – Modelo do arquivo *rnet* usado.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 25](#) mostra um modelo do arquivo *rnet* usado para a configuração, o primeiro campo (APN) deve ser o único ajustado de acordo com o provedor utilizado, os outros campos, portanto, devem permanecer com as configurações padrão. Com este formato de uso do módulo SIM800, é possível determinar facilmente quando ligar ou desligar a conexão GPRS para uso de dados móveis, sem necessidade de grande disparidade entre os algoritmos que serão usados no sistema fixo e flutuante.

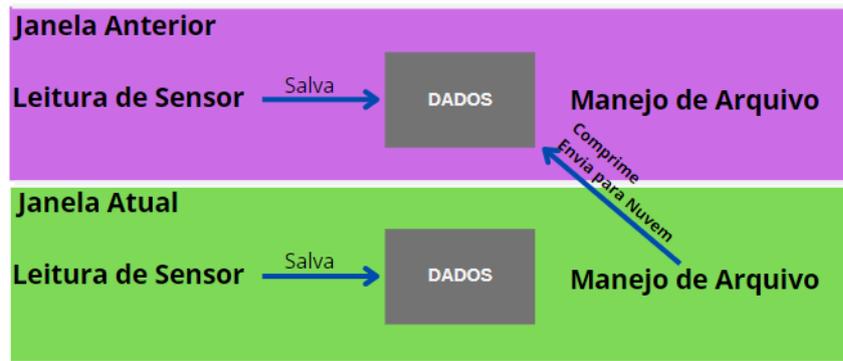


Figura 26 – Modelo simplificado da dinâmica do algoritmo.

Fonte: Produzido pelo autor

Para que não haja conflitos entre as rotinas, ou que um processo de *upload* lento atrapalhe a leitura feita pelos sensores, as rotinas de leitura dos sensores e de manejo de arquivos são executadas em processos diferentes e escalonadas pelo próprio *kernel* do sistema operacional da *Raspberry Pi*, como mostrado na Figura 26. Os sensores, de forma contínua, atualizam arquivos com suas medições, mas fazem isso em arquivos que mudam em determinados períodos do dia.

Tabela 5 – Janelas utilizadas no algoritmo.

Janelas	Horário
Janela 1	00:00 - 05:59
Janela 2	06:00 - 11:59
Janela 3	12:00 - 17:59
Janela 4	18:00 - 23:59

O algoritmo, como um todo, trabalha com quatro janelas ao longo do dia (descritas na Tabela 5). Para cada janela, durante seu horário ativo, os sensores salvam os arquivos identificando a data da leitura e a janela à qual ela corresponde. Uma vez passada a janela, os sensores abrirão um novo arquivo com o mesmo formato de título, contendo a data da leitura e janela em que ela é feita. Periodicamente a rotina de gerenciamento de arquivos é rodada e ela sempre verifica a janela anterior, mostrado na Figura 26, para comprimir os arquivos e fazer *upload* dos dados para um repositório remoto no *Google Drive*, aberto com uma conta criada para o projeto. Por sequência lógica de execução, é feita primeiro uma verificação de conexão, se bem sucedido o teste, é chamada a rotina de compressão dos arquivos e *upload* dos dados. Uma vez que os dados tenham sido salvos no repositório remoto, o arquivo comprimido é apagado para liberação de espaço na memória não volátil da *Raspberry Pi*. Esse algoritmo, caso seja o sistema flutuante utilizando comunicação GPRS, antes de realizar o teste de conexão, liga a conexão pelo arquivo *rnet* e espera por 5 minutos, até que o SIM800 consiga estabelecer a comunicação, só então faz o teste de conexão, *upload* e finaliza a rotina desligando novamente a *internet* para economizar o pacote de dados.

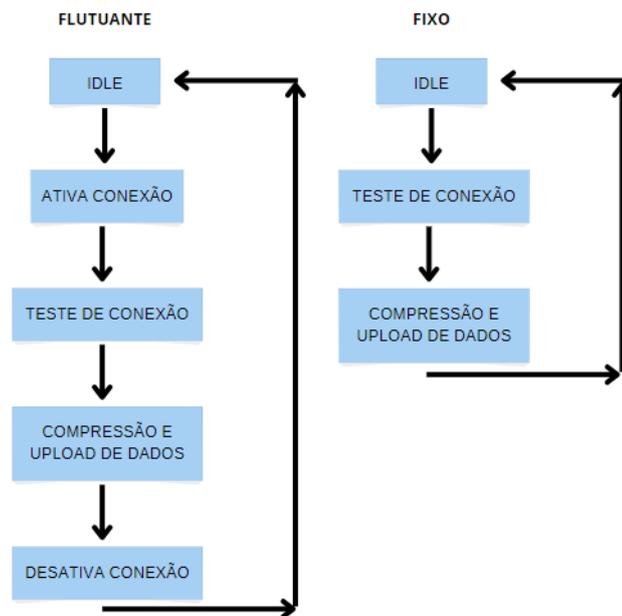


Figura 27 – Fluxogramas das rotinas de gerenciamento para os diferentes sistemas.

Fonte: Produzido pelo autor

4.5 Energização dos sistemas

O sistema fotovoltaico alimenta uma bateria, intermediado por um controlador de carga, a energização dos circuitos ocorre pela própria bateria, mas também de forma intermediada pelo mesmo controlador. A tensão original disponível para uso é de 12V, excessivamente alta para alimentação de circuitos de baixa potência, cuja diferença de potencial recomendada na alimentação é, em sua maioria, de 5V.

Na [Figura 1](#) é mostrada a conexão elétrica de forma geral do sistema. Os módulos fotovoltaicos geram até 25V para o controlador de cargas, essa potência é utilizada para recarregar a bateria continuamente. O fornecimento de potência para alimentação dos sistemas é feito a partir do controlador de cargas, que fornece uma tensão de 12V. As cargas gerais apresentadas na imagem supracitada são, na verdade, cargas utilizadas para que a bateria seja continuamente descarregada, de modo que o controlador de carga permaneça sempre utilizando totalmente a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos na recarga da bateria. Um diagrama mais detalhado é apresentado no [Apêndice C](#).

O módulo utilizado no processo de energização dos conjuntos SPI, SIM800, *Sense Hat* e *Raspberry* é o XL4015. Este é um conversor de tensão para corrente contínua do tipo *step-down*, ou *Buck*, podendo ser alimentado com tensões entre 8V a 36V. Já sua saída varia de 1,25V a 32V, mas limitada a V_{in} caso uma tensão intermediária seja usada na alimentação do circuito, onde V_{in} é a tensão de alimentação do circuito.

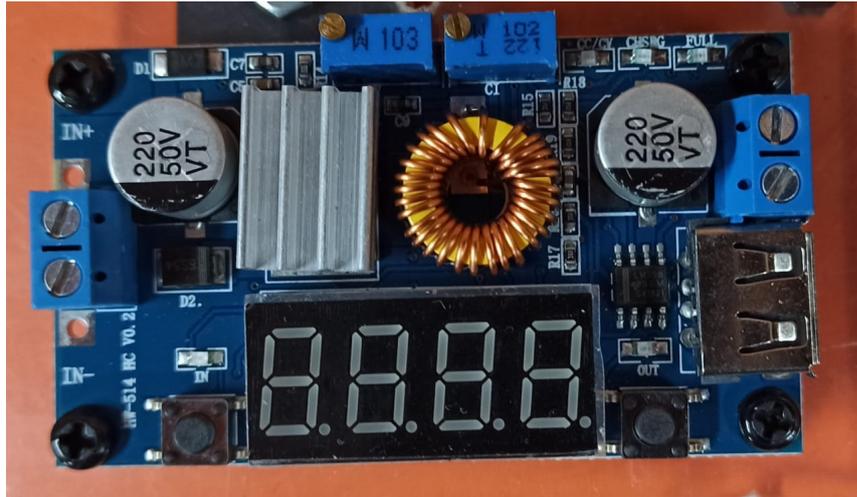


Figura 28 – Placa com XL4015 utilizada - com multímetro.

Fonte: Produzido pelo autor

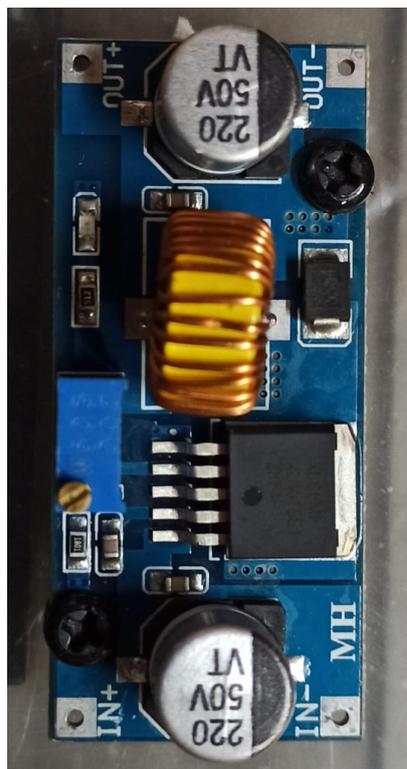


Figura 29 – Placa com XL4015 utilizada - sem multímetro.

Fonte: Produzido pelo autor

Apesar de ser um único módulo, são utilizadas duas placas diferentes. A [Figura 29](#) apresenta o XL4015 em um circuito mais simples e menor se comparado com o circuito apresentado na [Figura 28](#). Essa segunda placa, além do módulo, apresenta também um multímetro com um *display* para mostrar tensão, corrente e potência no módulo, tanto na entrada quanto na saída.

Visto que os módulos estão em uma faixa de tensão da bateria na entrada e são capazes de fornecer os 5V desejados na saída, é importante analisar outras características elétricas para a aplicação no projeto. A corrente elétrica máxima de operação dos módulos informada pelo fornecedor é de 5A.

Tabela 6 – Módulos e correntes consumidas no sistema flutuante.

Módulo	Corrente(mA)	Quantidade
<i>Raspberry Pi</i>	1280	1
<i>Sense Hat</i>	50	1
AD620	1,3	3
ACS712	10	2
AD7705	0,7	4
SIM800	2000	1

Tabela 7 – Módulos e correntes consumidas no sistema fixo.

Módulo	Corrente(mA)	Quantidade
<i>Raspberry Pi</i>	1280	1
AD620	1,3	1
AC712	10	0
AD7705	0,7	2

A [Tabela 6](#) e a [Tabela 7](#) apresentam a relação de consumo esperado para cada módulo e quantidade que será utilizada de cada um para os diferentes sistemas (flutuante e fixo). Os consumos apresentados são considerados os piores casos possíveis, para a *Raspberry Pi* é considerado o consumo para processamento máximo com teste de estresse na CPU, já o *Sense Hat* considera-se a corrente máxima fornecida na porta de 3,3V da *Raspberry Pi*, que alimenta os sensores. Nos módulos AD7705, ACS712 e AD620 são usados dados fornecidos pelos fabricantes.

Para o sistema flutuante, é esperado um consumo máximo de até 3356,7mA, enquanto no fixo é esperado um consumo de até 1282,7mA. Em nenhum dos dois sistemas há uma aproximação da corrente máxima de operação dos módulos XL4015. Para prevenção e evitar quedas de tensão, são utilizados ainda vários conversores do tipo *step-down*, não apenas um para cada sistema. A planta flutuante conta com um XL4015 alimentando apenas o *Raspberry Pi*, outro exclusivo para o SIM800 e ainda um terceiro que alimenta os módulos AD620 e ACS712 por haver uma quantidade maior de módulos para energizar, além da necessidade de energização do *Sense Hat*. Já no sistema fixo, o mesmo XL4015 alimenta a *Raspberry Pi* e os módulos AD620 e ACS712. Note que em nenhum dos casos o XL4015 é utilizado na alimentação dos conversores AD7705, pois esses serão alimentados pela própria *Raspberry Pi*.

O tipo de conversor DC-DC utilizado é chaveado em alta frequência para conversão do nível de tensão. Esse chaveamento pode gerar ruídos na rede elétrica do circuito como um todo. A frequência de chaveamento é de 180kHz, por se tratar de uma frequência elevada

não é esperada interferência nas medições, mas um filtro passa-baixa pode ser implementado na saída do *step-down* para reduzir o problema.

5 Resultados e Análise

Os sistemas de medição realizados possuem uma diversidade de considerações a serem feitas. Os testes realizados em cada um evidenciou algumas limitações e dificuldades não previstas, assim como características específicas em placas que precisaram ser reajustadas. A lógica de funcionamento em algumas dessas placas precisou ser revisada por completo em alguns testes para que a realização fosse possível.

Neste capítulo são descritos os resultados e análises a respeito de cada sistema implementado, mencionados no [Capítulo 4](#), assim como dificuldades encontradas no processo de desenvolvimento e testes realizados.

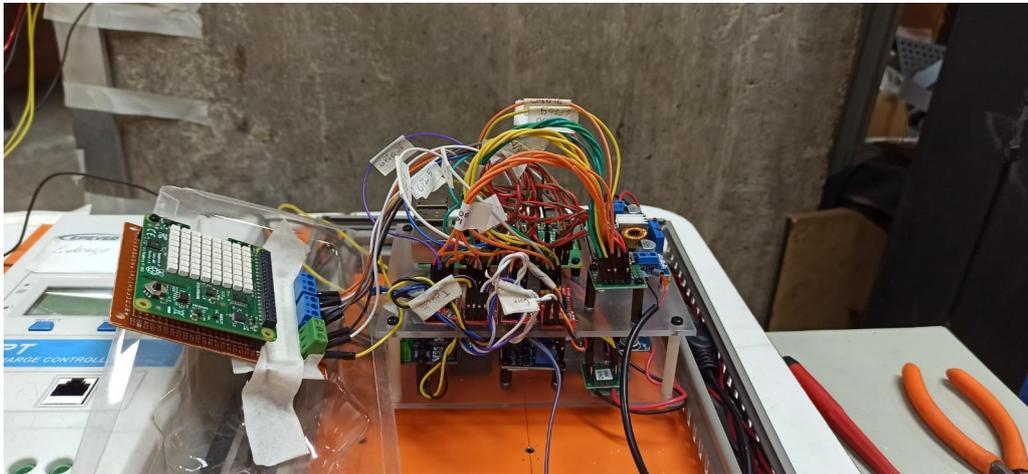


Figura 30 – Montagem do sistema para testes.

Fonte: Produzido pelo autor

A [Figura 30](#) mostra a configuração do sistema montado para testes, uma vez que a complexidade inviabilizou a montagem do sistema conectado em módulos fotovoltaicos, ele foi testado em ambiente controlado para coleta de dados e análise acerca da confiabilidade da aquisição de dados como um todo.

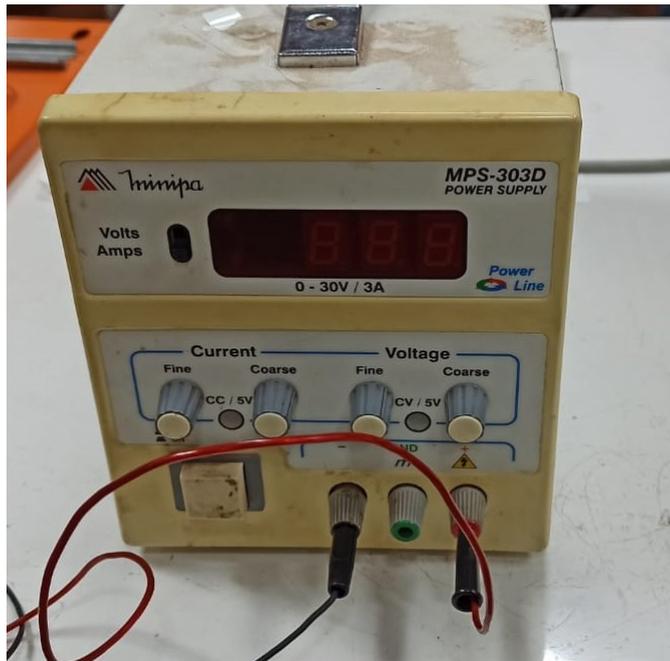


Figura 31 – Fonte de tensão e corrente utilizada nos testes.

Fonte: Produzido pelo autor



Figura 32 – Resistores em série utilizados nos testes.

Fonte: Produzido pelo autor

A tensão e a corrente dadas nos painéis fotovoltaicos foi emulada pela fonte apresentada na [Figura 31](#). Dada a impossibilidade de se manter uma faixa de tensão acima de 20V com uma corrente superior a 2A na fonte usada, foi decidido manter a corrente da fonte em 2A com a tensão que ela pudesse fornecer para manter a corrente desejada. Essa decisão foi tomada pela sensibilidade dos sensores ACS712, que não conseguem detectar satisfatoriamente variações de corrente da ordem de mA.

Os resistores de fio mostrados na [Figura 32](#) foram conectados em série e ligados na saída da fonte para que funcionassem como divisor de tensão, a tensão em cada um foi lida, assim como a corrente. Ambos resistores utilizados possuem resistência teórica de 4,7k Ω .

O conjunto com a *Raspberry Pi*, sensores, amplificadores e conversores analógicos/digitais foi alimentado por uma bateria de 12V, independente da fonte de tensão e corrente ligada nos resistores para testes de leitura nos sensores.

Tabela 8 – Valores de referência do sistema.

Medida	Valor
Tensão em R_1	1,82V
Tensão em R_2	1,26V
Corrente	2,01A

Os valores de apresentados na [Tabela 8](#) mostram as medidas realizadas com um multímetro e são usados como referência para comparação das leituras feitas pela placa SPI.

O sistema manteve-se coletando dados por, aproximadamente, 5 horas. Infelizmente, nesse período, a falta de conexão com a *internet* e não aquisição de um *chip* exclusivo para o projeto não permitiu que fosse incluso, neste teste, o envio de dados. Porém o envio de dados para a nuvem foi testado anteriormente em outras ocasiões, em conjunto com o teste de manejo de arquivos.

5.1 Comunicação com a nuvem

No sistema de comunicação GPRS, a implementação por comandos AT se mostrou complexa pela necessidade de chamada de funções para rodar os comandos em momentos de envio de informação. A abstração feita com o uso do *point-to-point protocol daemon* (PPPD) cria uma conexão do tipo *point-to-point* na própria *Raspberry Pi* que pode ser sustentada.

Da mesma forma, essa conexão criada pode ser desativada e reativada em momentos específicos visando a economia de dados no pacote adquirido com o provedor. Quando ativada é sustentada e funciona como uma conexão móvel à internet, tal qual é em um celular, sem a necessidade de, em todo momento, configurar-se o nome do ponto de acesso, código PIN do *chip* e parâmetros da conexão em si.

Há, entretanto, um atraso entre a ativação da rede e a conexão de fato. É recomendado, pelo padrão de funcionamento da *Raspberry Pi*, que seja desativada a conexão *Wi-Fi* para que a placa não tente priorizá-la antes de utilizar o acesso ponto a ponto com o *chip* SIM. Também, durante envio de arquivos, deve ser validada se a conexão está estabelecida e se informação foi enviada por completo.

Quanto ao barramento UART utilizado, apenas o *baudrate* precisou ser definido no arquivo *rnet* para comunicação do *Raspberry* com o SIM800, essa taxa foi estabelecida para 115200*baud/s*.

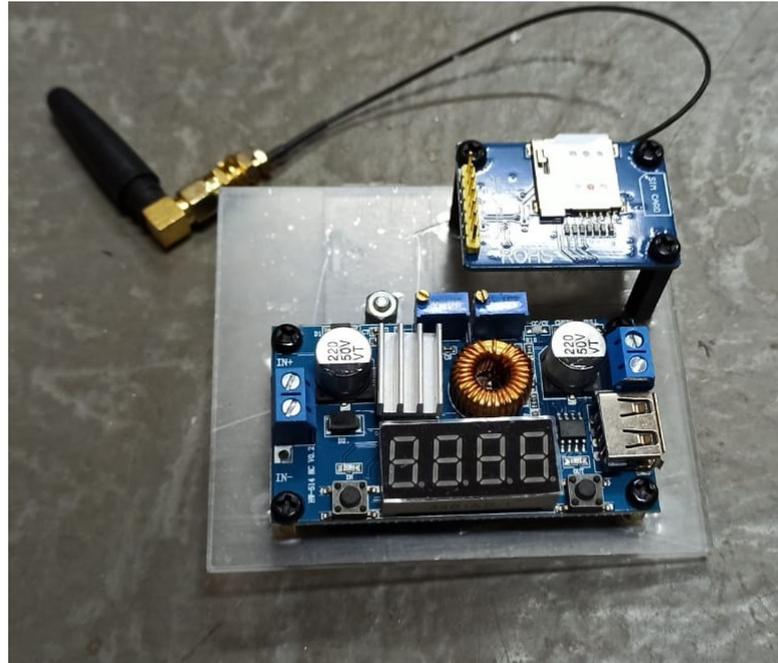


Figura 33 – Placa montada com o SIM800.

Fonte: Produzido pelo autor

O sistema foi deixado rodando em vazio por 24 horas para que fosse testada a comunicação. Durante o período, leituras vazias foram enviadas para um repositório remoto e nenhuma perda foi detectada. Testes menos extensivos foram feitos com um *chip* funcional para confirmar o comportamento, mas uma taxa de *upload* muito menor foi percebida. Portanto, é recomendável o teste de conexão e latência em locais de instalação para decidir o melhor provedor, mesmo que o código faça sempre antes do envio para a nuvem teste para garantir conexão.

5.2 Sistema de leitura SPI

As placas para coleta das grandezas desejadas e comunicação SPI necessitam de uma atenção especial. As placas utilizadas, em muitos casos, não possuem informações detalhadas pelo fornecedor, sendo possível trabalhar apenas com o *datasheet* do circuito integrado. Essa situação, em vários momentos, causou problemas na integração, como o caso das conexões indesejáveis presentes na placa com o AD7705, mostradas na [Figura 11](#). Consequência disso foi a adição dos amplificadores operacionais AD620 para corrigir o referencial negativo do circuito, sem a utilização dessa etapa as placas do AD7705 seriam incapazes de fazer a conversão corretamente.

A adição de uma etapa com o amplificador diferencial AD620 resulta também em uma redefinição da relação de redução nos sensores de tensão P25. Os painéis fotovoltaicos operam para uma tensão máxima esperada de 25V, a redução nominal de 5 : 1 nos sensores de

tensão seria eficaz se não houvesse um ganho mínimo nominal no amplificador operacional de 1,5, essa relação coloca em risco a medição porque, em operação no limite superior, o sinal que chegaria ao conversor analógico/digital poderia chegar a 7,5V, passando do limite superior estabelecido no *datasheet*. Os resistores mostrados na [Tabela 1](#) já apresentam valores atualizados para essa correção, substituindo o valor padrão de resistências de quando foram adquiridos.

Os conversores analógicos/digitais AD7705 operam com nível lógico TTL de 5V para comunicação quando alimentados também com 5V, entretanto, a comunicação no *Raspberry Pi*, de forma geral, opera com nível de tensão de 3,3V, isso resulta em falha nas leituras em algum momento. O problema foi contornado alimentando-se o AD7705 também com 3,3V para que sua comunicação opere no mesmo nível de tensão da *Raspberry Pi*, porém isso resultaria novamente em adequações. A primeira delas seria a correção da escala, uma vez que a escala não seria mais entre leituras de 0V a 5V, mas sim entre 0V e 3,3V e a correção necessitaria ser feita em código. A outra adequação a ser feita seria nas leituras dos sensores, pois as entradas para conversão deveriam operar na mesma faixa de tensão de alimentação, ou seja, não seria mais possível ler saídas dos sensores operando com saídas de até 5V, esses valores deveriam ser ajustados para saídas máximas de 3,3V. Entretanto, todas essas adequações no AD7705 mostraram-se desnecessárias, divergindo de informações dadas no próprio *datasheet* do circuito integrado, o conversor mostrou-se capaz de fazer leituras em até 5V, mesmo quando alimentado por tensão de 3,3V. Por questões de segurança, os sensores P25 permaneceram ajustados a uma redução de tensão adequada para não ultrapassar a tensão de alimentação da placa.

Na programação, foram necessárias adaptações para leitura dos conversores analógicos/digitais na *Raspberry Pi*. As placas AD7705 possuem uma taxa máxima de atualização na saída e nem sempre a frequência mínima corresponde ao *clock* presente na placa. Cada comando enviado para a placa necessita de um tempo para que seja efetivado, porém o *clock* presente na placa não é informado pelo fornecedor e em alguns momentos a requisição das informações ou envio de novas configurações pela *Raspberry Pi* é mais rápido do que o tempo necessário para a placa realizar todo o processamento, resultando em sobreposição de comando ou leitura de valores errados. Esse comportamento deve ser contornado adicionando-se um tempo de espera no próprio código da *Raspberry Pi* após envio de cada comando, esse tempo foi definido para 100 μ s, suficiente para não atrasar a execução da tarefa significativamente em relação ao seu período de 75ms inicialmente proposto.

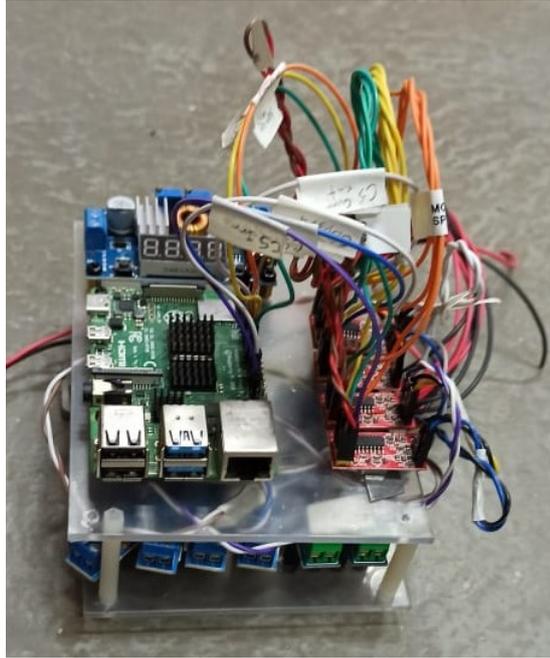


Figura 34 – Placa do sistema de leitura SPI para planta flutuante - montada.

Fonte: Produzido pelo autor

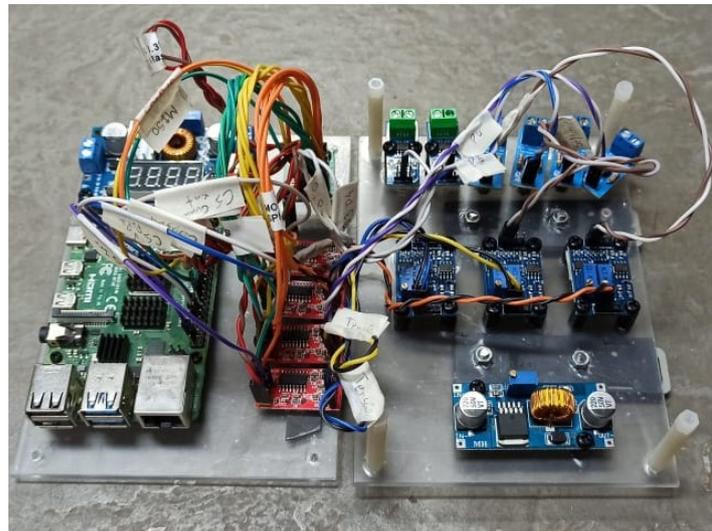


Figura 35 – Placa do sistema de leitura SPI para planta flutuante - níveis separados.

Fonte: Produzido pelo autor



Figura 36 – Placa do sistema de leitura SPI para planta fixa.

Fonte: Produzido pelo autor

No sistema flutuante, o conjunto de leitura SPI foi montado por completo e utilizado em um sistema provisório para aquisição de dados. Já o conjunto do sistema fixo (Figura 36) não pôde ser montado por completo por falta de componentes que encontravam-se em uso para desenvolvimento de outras partes do projeto.

Nos testes realizados com fonte de tensão e corrente, no comportamento do circuito em geral, deve-se mencionar alguns pontos de interesse. Foi observada uma limitação do conversor do tipo *step-down* em fornecer corrente para a *Raspberry Pi*, limitando-a ao funcionamento com, aproximadamente, $400mA$. A essa limitação, é dada a responsabilidade aos cabos utilizados na entrada do tipo USB-C que alimentava a placa, não havendo disponibilidade de outros cabos mais apropriados, foi adaptado um cabo de uso próprio apenas para transmissão de dados e não carga de dispositivos, com conexões intermediárias para diferentes adaptadores USB. Essa explicação se dá porque, sem que a *Raspberry Pi* fosse conectada ao conversor *step-down*, a corrente fornecida e medida pelo multímetro chegou a quase $5A$ - esse valor poderia ser ainda maior, mas o ajuste foi interrompido para evitar danos à placa.

A limitação dada à corrente que alimentava a *Raspberry Pi*, por consequência, refletiu na frequência das leituras do conjunto SPI. Mesmo sendo reconfigurado para um período de $100ms$, variando-se esse valor até $1s$ o período real sempre estava maior e próximo a $1s$. Em testes feitos com a *Raspberry Pi* alimentada por uma fonte dedicada e capaz de fornecer até $3A$, o mesmo período de $100ms$ fazia com que o sistema conseguisse coletar até 8 leituras por segundos.

As tensões lidas nos resistores foi feita por uma sequência de sensor de tensão P25 e AD620, isso para ambos, pois a tensão dada na fonte não tem garantidamente o mesmo referencial que a alimentação do circuito, que foi feita por uma bateria de 12V. Já a corrente, por características do sensor, pôde ser lida somente pelo ACS712. No [Apêndice A](#) é mostrado o diagrama de conexão. Neste circuito as tensões dos resistores R_1 e R_2 são ligadas como as tensões dos módulos $P1$ e $P3$, respectivamente, e a corrente é independente do sensor por não necessitar do AD620.

Antes de realizados os testes, foram calibrados os amplificadores diferenciais AD620 e calculado novo ganho na relação entre sua entrada e saída. Para os resistores R_1 e R_2 o novo ganho mínimo encontrado foi de 1,481, para ambos. Esse novo valor foi corrigido em código e reforça a necessidade de calibração prévia do sistema antes de ser posto em funcionamento. Mesmo que alguns valores sejam corrigidos em código, é importante garantir que nenhuma descalibração faça que com algum sinal ultrapasse o limite de tensão de 3,3V nos AD7705 e 5V nos outros módulos.

O conversor analógico/digital AD7705 responsável pela leitura da tensão em R_2 apresentou falha, assim como o AD7705 responsável pela leitura de corrente. Essa ocorrência merece uma citação, pois o problema não identificado foi solucionado apenas removendo e conectando novamente alguns cabos nos mesmos lugares, demonstrando uma fragilidade do sistema quanto ao modo em que as conexões foram feitas.

Durante o teste foram coletadas 15836 amostras de tensão em cada um dos resistores e da corrente na associação. As amostras possuem um intervalo aproximado de 1 segundo entre si.

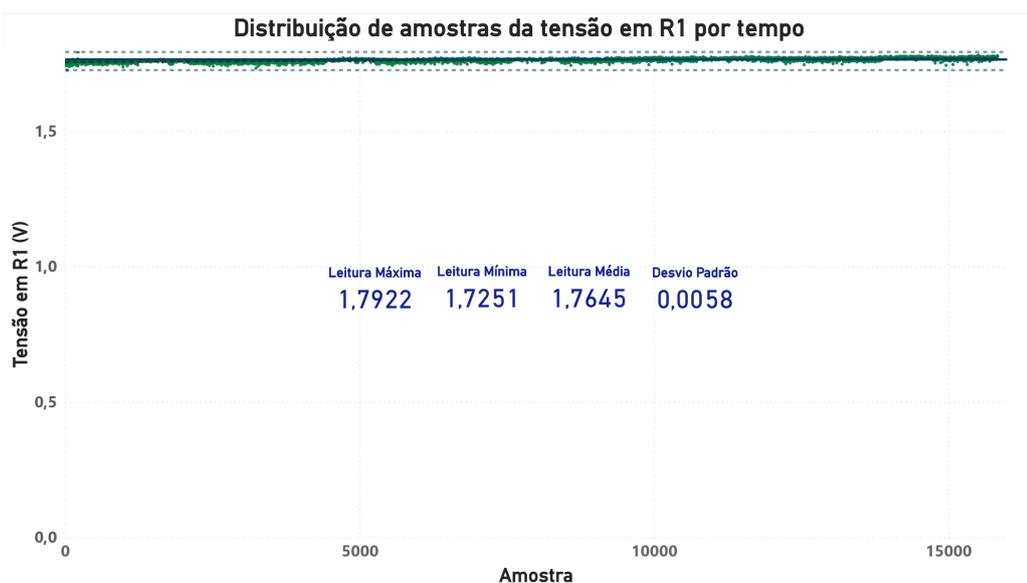


Figura 37 – Distribuição das amostras de tensão em R_1 .

Fonte: Produzido pelo autor

Na [Figura 37](#) apresenta-se a distribuição das amostras de leitura de tensão feitas pela placa SPI durante os testes. É possível observar que existe um *offset* em relação ao valor de referência medido pelo multímetro de $1,82V$. Entretanto, em uma análise qualitativa, é possível observar que o sistema apresenta uma boa estabilidade - dada uma baixa variação na fonte de tensão usada. A leitura média de $1,76V$ apresentou um desvio padrão muito baixo, de apenas $0,0058V$, se comparado esse valor em relação à tensão média.

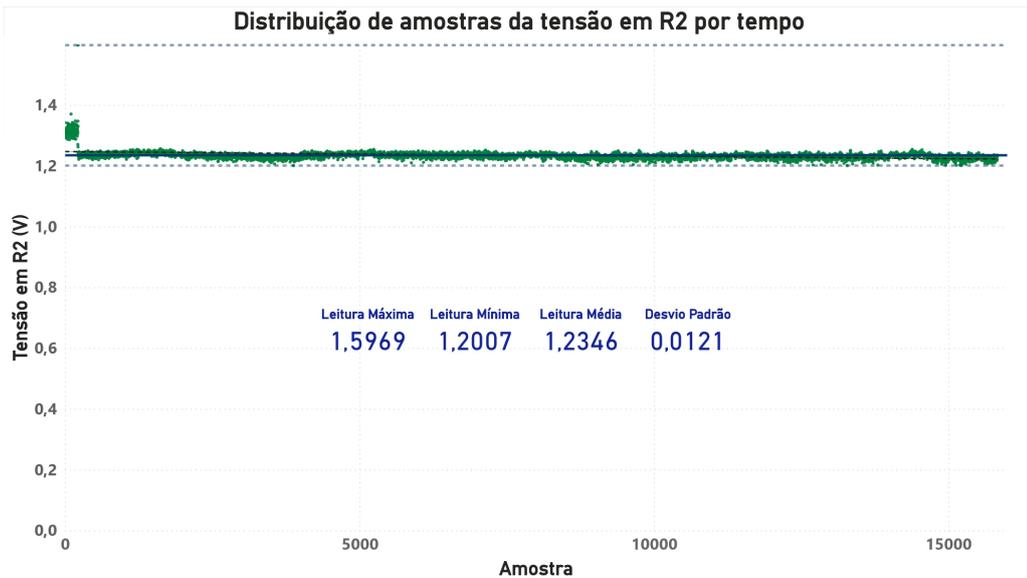


Figura 38 – Distribuição das amostras de tensão em R_2 .

Fonte: Produzido pelo autor

Já na [Figura 38](#) tem-se a distribuição das amostras de leitura de tensão feitas pela placa SPI durante o teste. Nessa distribuição é possível observar que, em algum momento após o início dos testes, houve uma queda de tensão na resistência R_2 que não foi acompanhada por R_1 . Essa queda abrupta pode ter ocorrido por alguma variação na tensão dada pela fonte usada para manter a corrente desejada - sendo essa tensão lida por um dos conversores analógicos/digitais AD7705 que apresentaram instabilidade em uma primeira tentativa de leitura. De qualquer forma, a queda de tensão média não passa de $100mV$ e não foi encontrado novamente esse comportamento ao longo do teste.

Ainda sobre a tensão de R_2 , pode-se observar que há um comportamento bastante estável. Estando a leitura da tensão média igual à $1,2346V$ e próxima ao valor de referência de $1,26V$ medido no multímetro e o desvio padrão relativamente baixo, igual à $0,0121V$, sendo cerca de duas vezes o apresentado para as amostras de tensão em R_1 , aumentado também pela queda abrupta na tensão.

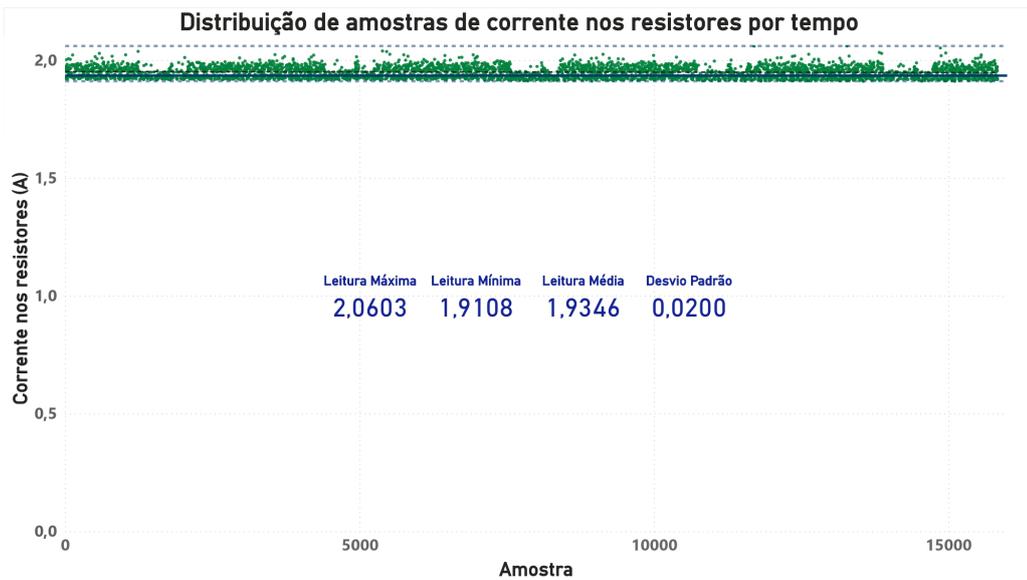


Figura 39 – Distribuição das amostras de corrente.

Fonte: Produzido pelo autor

As amostras da leitura de corrente apresentadas na [Figura 39](#) demonstram também uma certa estabilidade quando se observa a relação entre a leitura média de 1,93A e o desvio padrão de 0,02A, apesar de seu deslocamento do valor de referência de 2,01A. Considerando que este também foi um dos conversores AD7705 que apresentaram falhas de leitura na primeira tentativa de realização do teste, pode-se observar, assim como nas amostras de tensão em R_2 um comportamento mais disperso se comparado com as amostras da tensão em R_1 . Outro fator relevante nesta análise é a sensibilidade do sensor de corrente ACS712, de apenas $100mVA^{-1}$. Portanto, a menos que houvesse uma variação de 1A na corrente, a tensão do sensor deveria permanecer praticamente constante - levando à conclusão de que a dispersão vista nas amostras é consequência de ruídos do próprio AD7705. Outra possível análise que justifique a dispersão dos dados é a característica do XL4015, que transforma a corrente contínua em pulsos para poder fazer a redução de tensão - na [Figura 39](#) é possível distinguir a dispersão como forma de pulsos, podendo ser ruído na fonte usada para os testes, pois a periodicidade da onda quadrada distinguível chega a, aproximadamente, uma hora e é muito superior à frequência de chaveamento do conversor DC-DC. Problemas de ruído dados pelo XL4015 podem ser contornados colocando-se um filtro passa-baixa na saída do *step-down*.

As amostras coletadas pela placa SPI apresentaram, de forma geral, um *offset* em relação aos valores lidos no multímetro. Este problema, porém, não é de grande relevância porque, nos testes, não há qualquer garantia de que o valor de referência seja mais exato que o valor lido pela placa SPI e, sendo o valor de referência mais confiável, é possível ajustar em código o ganho ou *offset* para levar a tensão lida a uma tensão conhecida por outro meio de

medição. O principal objetivo das leituras é analisar a estabilidade e confiabilidade da placa SPI como sistema de medição - sendo sua precisão adequada, a exatidão pode ser ajustada.

5.3 Leitura do *Sense Hat*

O *Sense Hat*, como mencionado anteriormente no [Capítulo 4](#), possui uma facilidade muito grande na implementação se comparado ao sistema SPI. Uma biblioteca é chamada para fazer a leitura dos sensores presentes na placa.

O consumo do sensor, fora do esperado, é muito baixo, pois sua alimentação de 5V é usada apenas para a matriz de LEDs que não é utilizada. A porta de alimentação de 3,3V da *Raspberry Pi* que alimenta os sensores possui uma saída máxima de 50mA. Esse valor é apresentado com correção na [Tabela 6](#).

O sistema montado com o sensor mostrado na [Figura 23](#) é de tal modo que ele seja encaixado em uma placa perfurada e os pinos utilizados para alimentação e comunicação com a *Raspberry Pi* sejam acessíveis pelos conectores do tipo *borne* soldados na ponta da placa. Essa montagem foi feita para que ele possa ser colocado em uma caixa com isolamento adequado sob os módulos fotovoltaicos, onde a medição de atitude é mais adequada para detectar mudanças de orientação e as conexões passem por cabos também mais resistentes ao ambiente, pois devem sair da caixa onde está o sensor para chegar no quadro elétrico onde se encontra a *Raspberry Pi*.

Nos testes realizados, o *Sense Hat* teve todos seus sensores lidos para análise. O período de amostragem previsto de 100ms mostrou-se impraticável pela concorrência no escalonamento e problemas mencionados na [seção 5.2](#) - o período usado para os testes foi de 1s e mostrou-se bem atendido nas amostras. Os sensores correspondentes à sua unidade de medição inercial (IMU) - acelerômetro e giroscópio - foram lidos de modo a detectar deslocamento rotacional nos eixos de *pitch*, *roll* e *yaw*.

Durante o teste foram coletadas 15846 amostras de cada um dos sensores presentes no *Sense Hat*. As amostras possuem um intervalo aproximado de 1 segundo entre si.

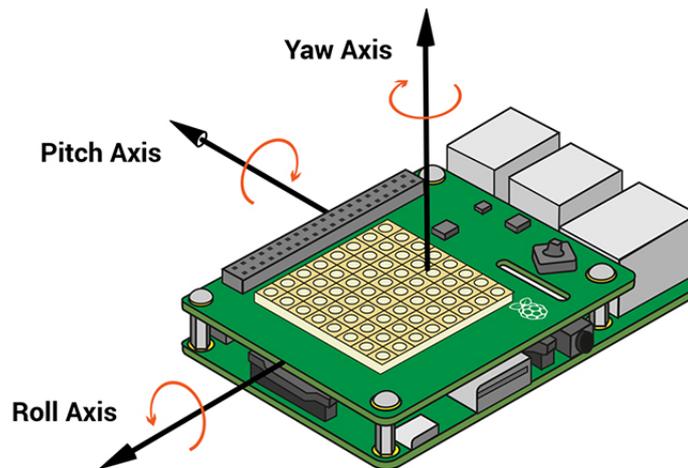


Figura 40 – Eixos no *Sense Hat*.

Fonte: www.deviceplus.com

A [Figura 40](#) demonstra a distribuição desses eixos no *Sense Hat*. As leituras feitas para determinação de rotação em relação a esses eixos foi feita para que as informações coletadas dos sensores já estivessem representadas em graus.

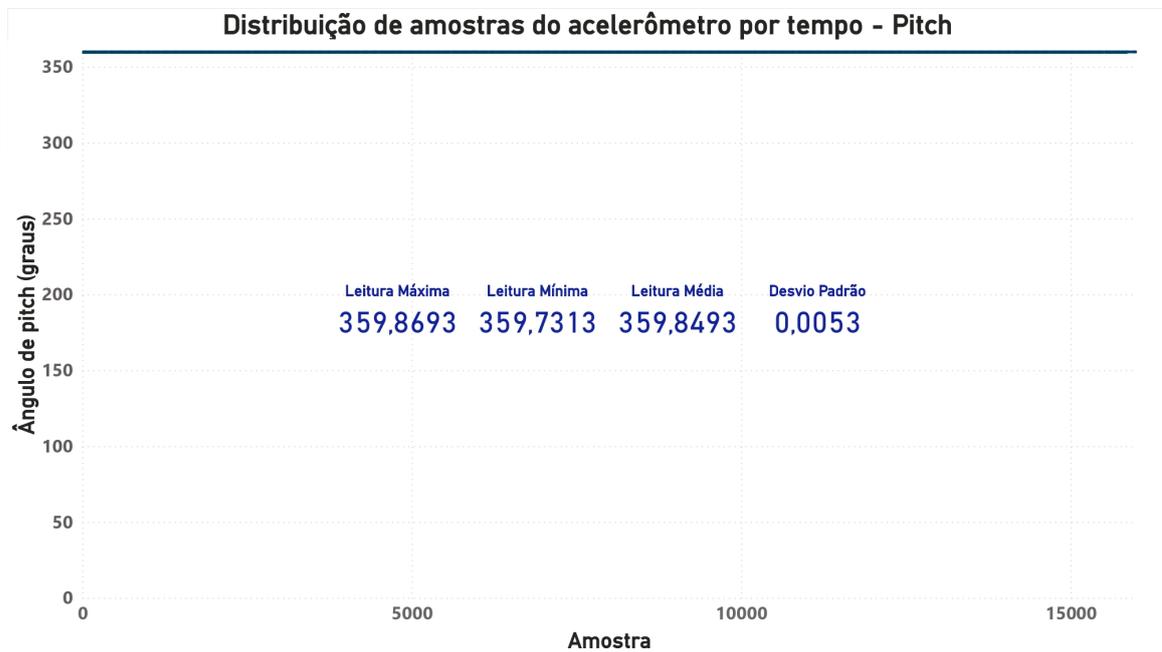


Figura 41 – Distribuição das amostras do ângulo de *pitch* no acelerômetro.

Fonte: Produzido pelo autor

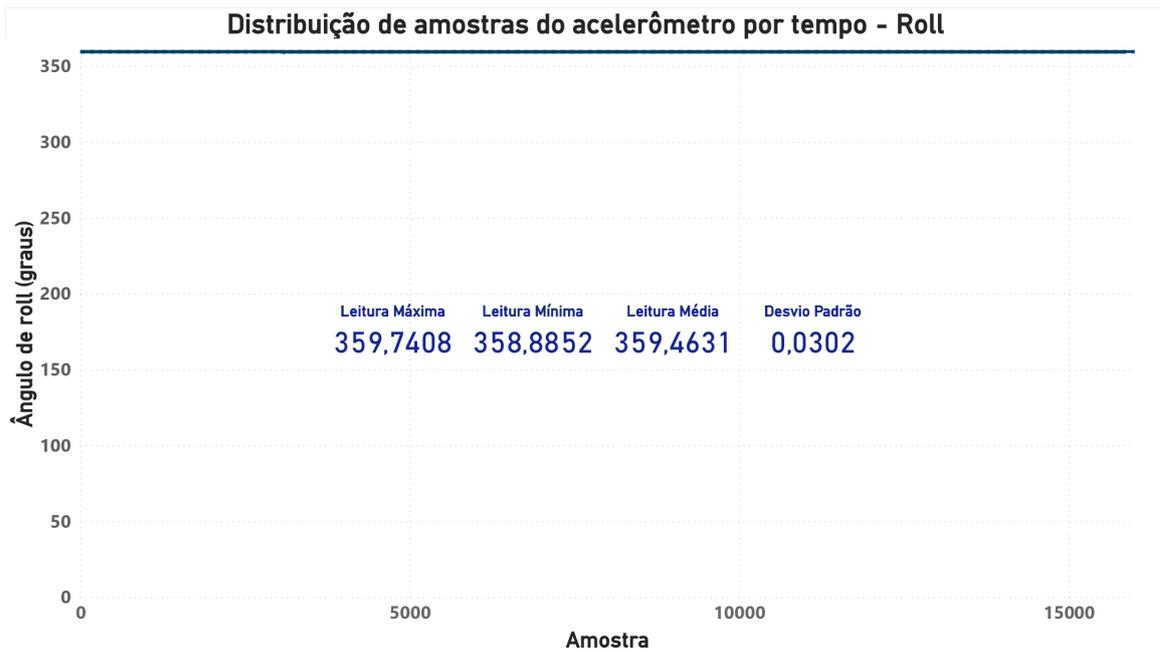


Figura 42 – Distribuição das amostras do ângulo de *roll* no acelerômetro.

Fonte: Produzido pelo autor

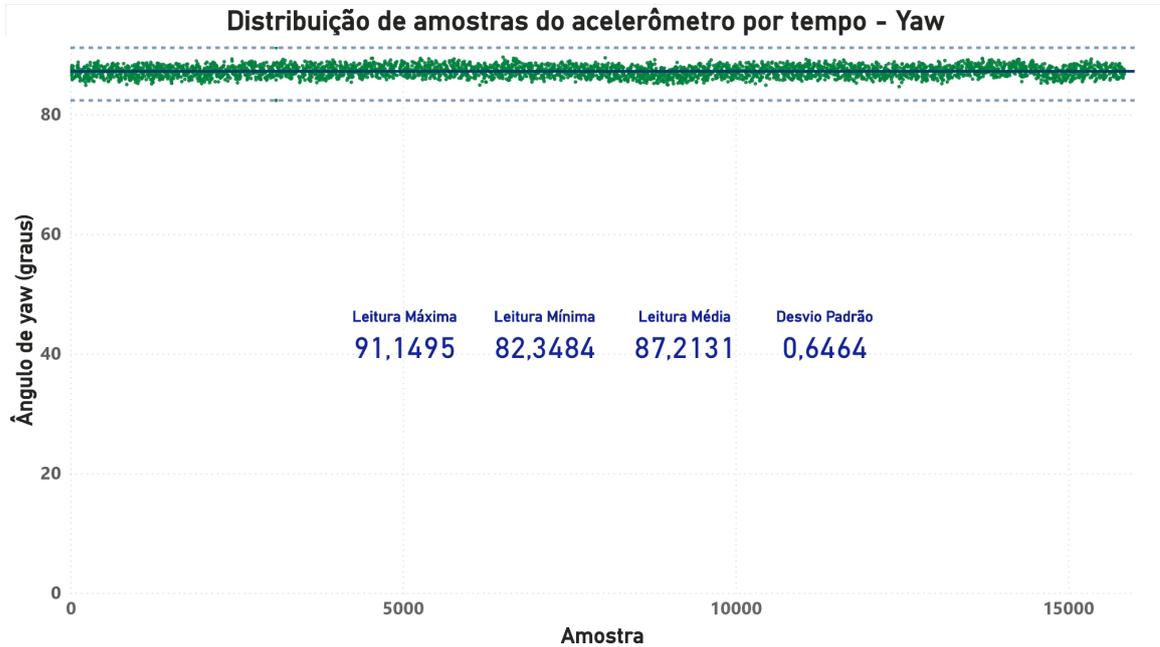


Figura 43 – Distribuição das amostras do ângulo de *yaw* no acelerômetro.

Fonte: Produzido pelo autor

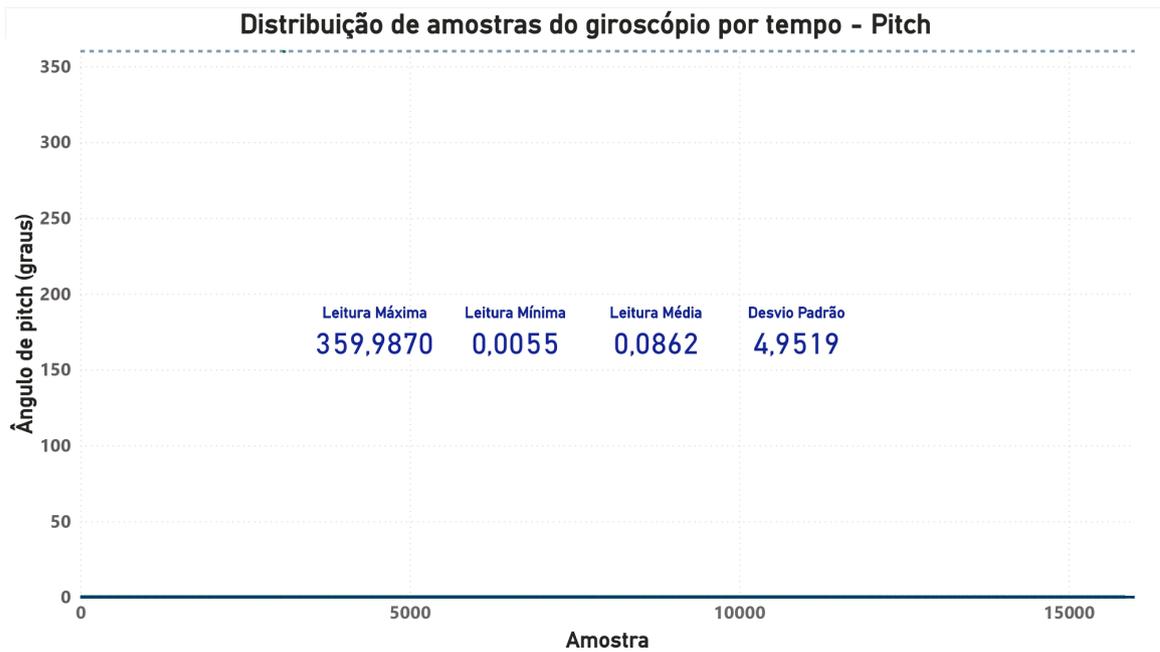


Figura 44 – Distribuição das amostras do ângulo de *pitch* no giroscópio.

Fonte: Produzido pelo autor



Figura 45 – Distribuição das amostras do ângulo de *roll* no giroscópio.

Fonte: Produzido pelo autor



Figura 46 – Distribuição das amostras do ângulo de yaw no giroscópio.

Fonte: Produzido pelo autor

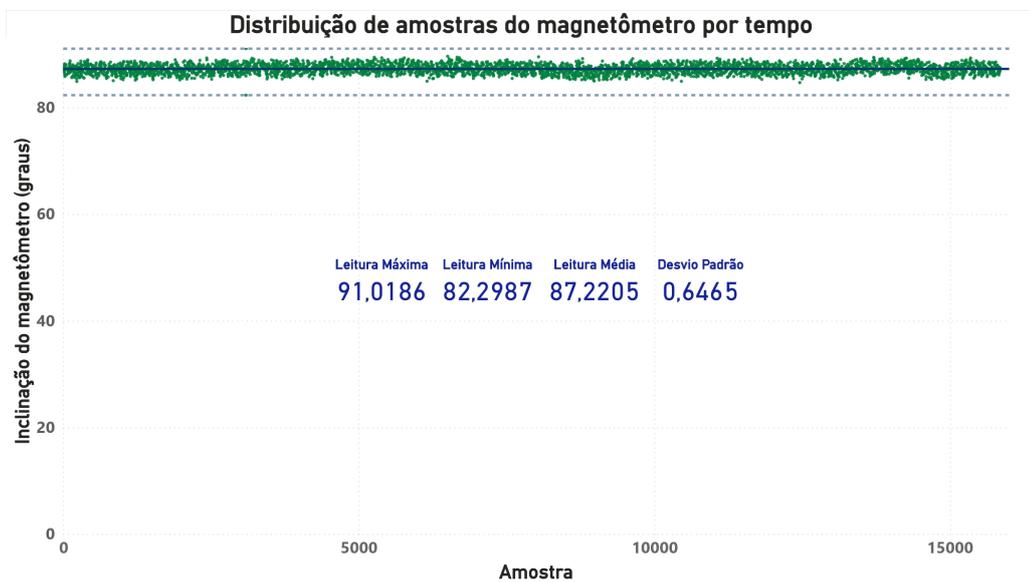


Figura 47 – Distribuição das amostras da bússola.

Fonte: Produzido pelo autor

Tem-se apresentados nas [Figura 41](#), [42](#) e [43](#) as leituras referentes ao acelerômetro do *Sense Hat*. É possível observar que, dada a relação $360^\circ = 0^\circ$, tem-se uma proximidade com as leituras do giroscópio apresentadas nas [Figura 44](#), [45](#) e [46](#). Comparando-se as leituras com a representação dos eixos na [Figura 40](#), é possível inferir que o sensor estava posto praticamente paralelo ao plano horizontal em relação aos ângulos de *pitch* e *roll* e com uma

rotação de aproximadamente 82° no eixo de *yaw*. Esse comportamento é visto nas três figuras (43, 46 e 47). Quanto ao ângulo dado pela bússola, em relação ao norte magnético, é possível observar, por análise, que este ângulo também corresponde ao ângulo de *yaw* no referencial do *Sense Hat*.

Os outros sensores presentes no *Sense Hat* também foram lidos. São grandezas de pressão barométrica, umidade e temperatura. Essas grandezas, apesar de coletadas pela interface de comunicação *I²C* com o *Sense Hat*, são também coletadas por outro conjunto de sensores em outra interface de comunicação não desenvolvida neste trabalho.

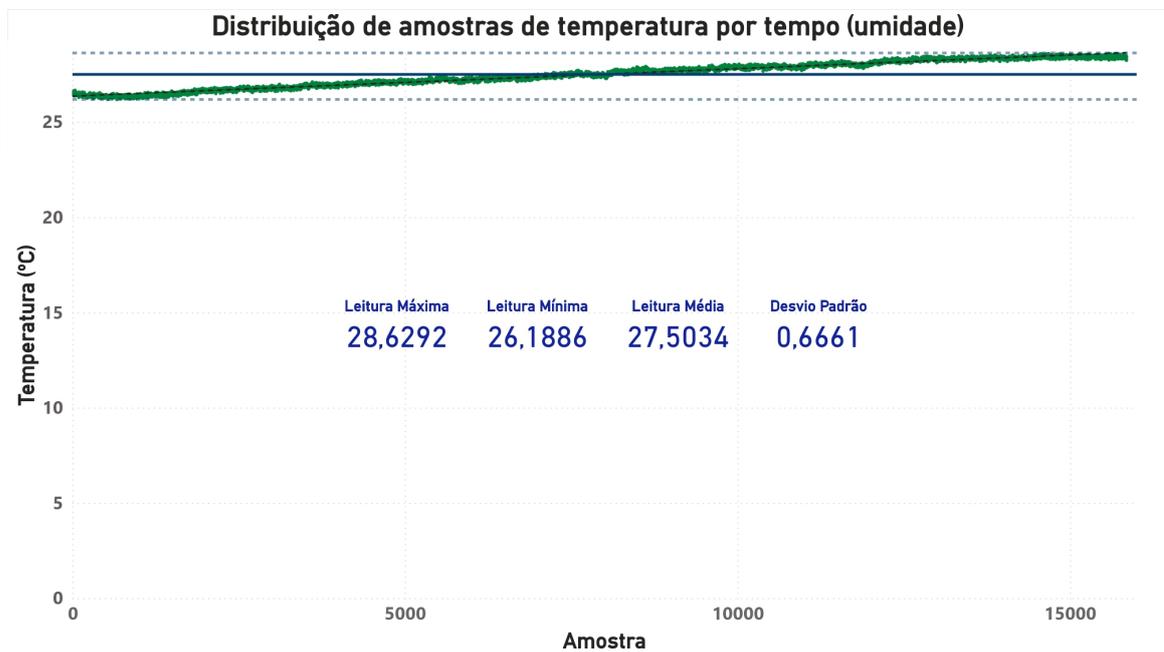


Figura 48 – Distribuição das amostras de temperatura pelo sensor de umidade.

Fonte: Produzido pelo autor

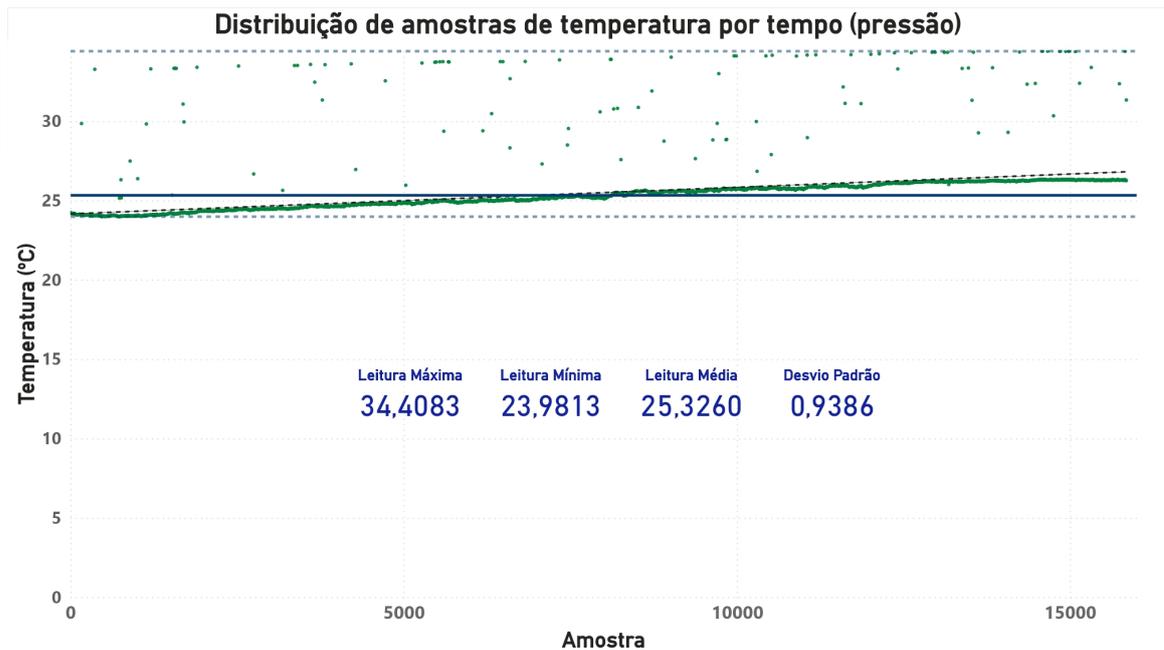


Figura 49 – Distribuição das amostras de temperatura pelo sensor de pressão.

Fonte: Produzido pelo autor

O *Sense Hat* possui duas formas diferentes de medir a temperatura ambiente, dada por um conjunto diferente de sensores. Por padrão, quando solicita-se a leitura de temperatura, ele nos fornece a leitura dada pelo conjunto de sensores de umidade mostrada na [Figura 48](#), mas é possível também solicitar esse valor dado pelo sensor de pressão barométrica, com resultados mostrados na [Figura 49](#).

É possível observar que em ambos os casos há uma tendência de aumento na temperatura ao longo do teste. Entretanto, a temperatura dada pelo sensor de umidade tem um comportamento mais preciso se comparado ao sensor de pressão, isso justifica a leitura padrão do *Sense Hat* de temperatura ser dada pelo sensor de umidade. Em ambos os casos, apesar da diferente dispersão das amostras, é notável que há um desvio padrão próximo entre ambos.



Figura 50 – Distribuição das amostras de pressão.

Fonte: Produzido pelo autor

A pressão lida no *Sense Hat* teve um comportamento um tanto peculiar, mostrado na Figura 50. É possível observar que a distribuição das amostras se comporta quase como uma parábola, mas, avaliando-se a variação total entre a maior e menor leitura, tem-se uma diferença menor que $2mBar$ e o desvio padrão é baixo em relação ao valor médio, reforçando a boa precisão das leituras. O gráfico apresentado tem uma referência superior correspondente à $1atm$.

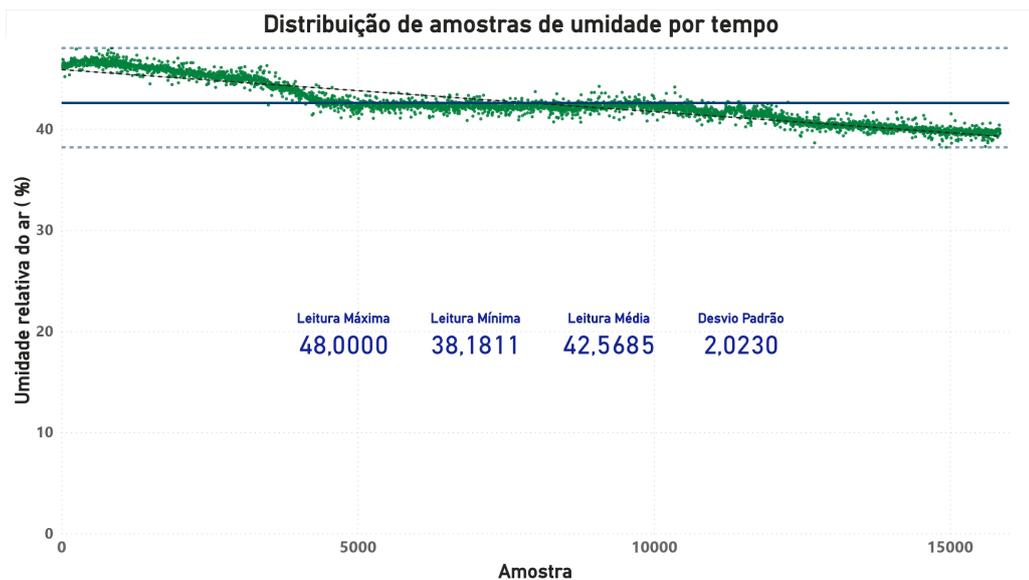


Figura 51 – Distribuição das amostras de umidade.

Fonte: Produzido pelo autor

O sensor de umidade presente no *Sense Hat* teve o comportamento mostrado na [Figura 51](#). É possível observar uma tendência de queda e, entre os outros sensores lidos, este foi o que apresentou o maior desvio padrão em relação a sua média. O local do teste, uma sala com pouca ventilação, pode ter favorecido essa tendência e flutuações ocorrendo com a presença de pessoas falando e interagindo próximo ao sensor, que ficou exposto a este tipo de interferência.

As três medições do *Sense Hat* não relacionadas à atitude (temperatura, pressão e umidade) são redundantes para a planta fotovoltaica, isso porque, como já mencionado, há outros sensores dedicados para essas grandezas em diferentes pontos e comunicando-se por outra interface não apresentada neste trabalho. As condições de instalação do *Sense Hat* também tornam essas leituras melhor aproveitadas para conhecimento das condições do próprio *Sense Hat* do que condições da planta fotovoltaica. A instalação do módulo será feita em uma caixa isolada, de modo a evitar entrada de umidade e com pouca troca de calor com ambiente externo.

6 Conclusões

Os problemas encontrados foram, em grande maioria, contornados ou solucionados por completo. O sistema de comunicação GPRS, apesar de ser implementado e testado a conexão ainda não chegou a ser utilizada de fato na transmissão de dados coletados na planta, apenas em testes feitos pontualmente.

O conjunto para leitura SPI, uma vez configurado adequadamente, pode ser utilizado para leitura de tensões e correntes do sistema. Apesar da configuração e montagem ter um grau de detalhamento elevado com determinação de ganhos e ajustes em código. Uma vez configurado e garantindo-se que a margem dos ganhos está adequada, basta colocar o sistema no trilho DIN e conectar os fios de alimentação e os fios com as grandezas elétricas a serem medidas.

A alimentação do circuito com os XL4015 mostrou-se excessiva, pois os circuitos sequer chegam a utilizar metade da corrente que o dispositivo é capaz de fornecer. Esse excesso é maior ainda para o XL4015 exclusivo para os módulos AD620 e ACS712, pois esses juntos não passam de algumas dezenas de miliampères, um valor de ordem de grandeza quase mil vezes menor que o valor de corrente que o *step-down* pode fornecer. Essa alimentação poderia ser feita pelo próprio *Raspberry Pi*, uma vez que a capacidade de corrente na porta de alimentação de 5V é suficiente para essas placas.

A organização dos quadros de energia é outro trabalho fundamental ainda em desenvolvimento, pois nele está sendo considerada a dissipação de calor dos circuitos e organização lógica para reduzir comprimento de fios que não podem ter grande extensão, como é o caso de fios utilizados para comunicação de baixa potência que não podem ultrapassar alguns metros de distância.

7 Trabalho Futuro e Considerações

A montagem das plantas fotovoltaicas e coleta de dados é um passo fundamental. Essas informações serão utilizadas para realizar inferência acerca da qualidade dos circuitos implementados e principalmente das diferenças nas características de eficiência entre os painéis para diferentes condições ambientais.

Ajustes no algoritmo de leitura dos sensores para minimizar a concorrência no processamento e melhorar a previsibilidade dos intervalos entre as leituras é uma melhoria fundamental para padronizar as leituras, assim como uma melhoria no algoritmo para que ele possa se adequar a diferentes variações ambientais. Pode-se efetuar uma pré-avaliação da frequência das ondas do Lago Paranoá e com base nesse valor, ajustar a frequência de amostragem. Sem essa pré-avaliação, não há como inferir se o sistema está fazendo uma super ou sub amostragem com os intervalos fixos pré-determinados. Uma leitura e análise em tempo real da atitude para ajuste automático desses intervalos de leitura podem resultar em uma maior eficiência, economizando memória e valorizando apenas momentos mais críticos.

Ainda que haja economia de memória não volátil, para uma melhor organização e apresentação dos dados lidos, um banco de dados pode ser estruturado para armazenamento das leituras na *Raspberry Pi* e sua conexão remota possibilitada para consulta.

A estabilidade da conexão GSM é importante para que o sistema seja consultado remotamente, assim como o gerenciamento dos processos que possam utilizar - de forma indesejável - a conexão. Essa consulta pode possibilitar a visualização de dados mais recentes e também a criação de alertas, caso o sistema detecte algum problema de funcionamento.

Referências

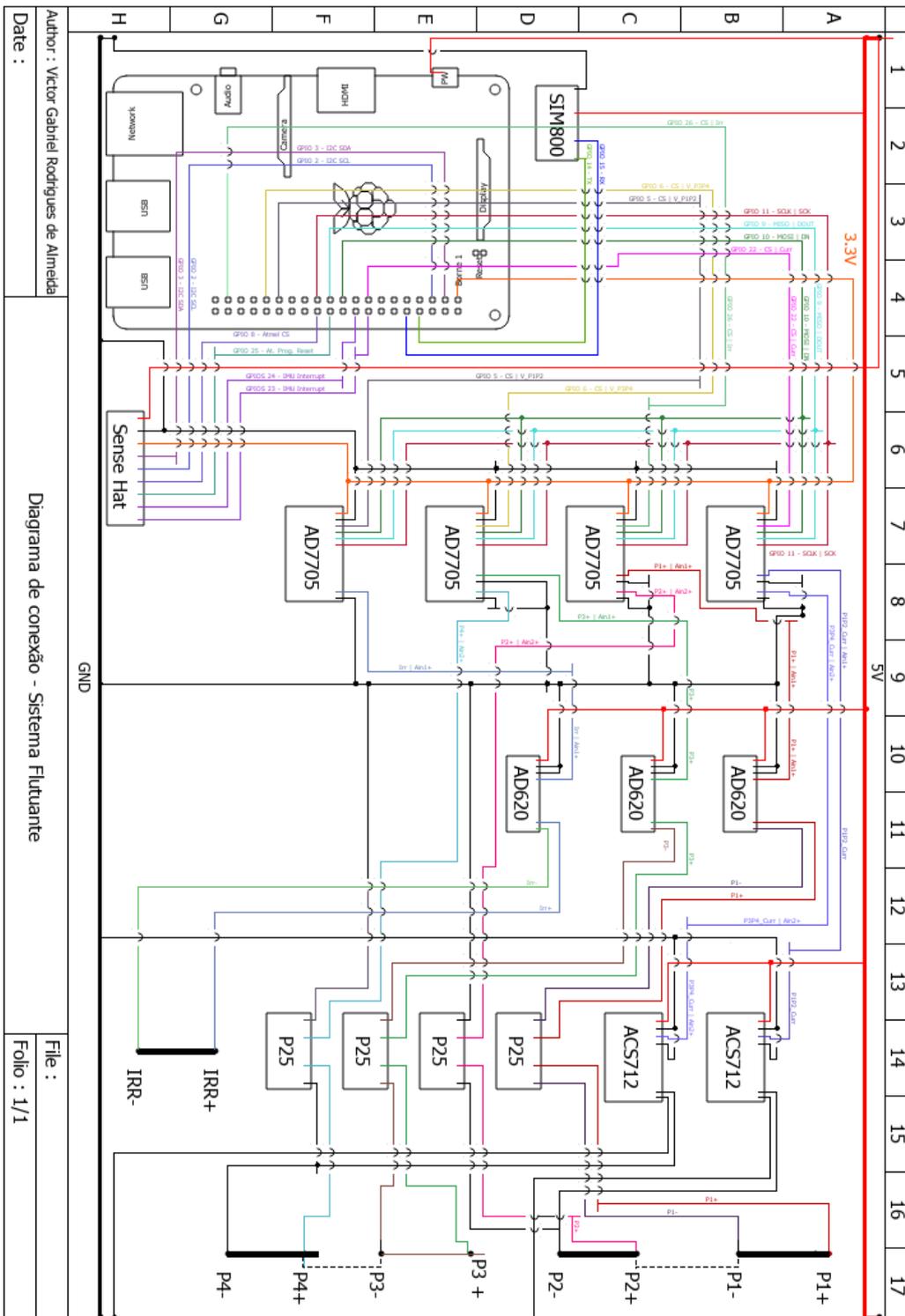
- ALLEGRO MICROSYSTEMS. **ACS712 - Datasheet**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>>.
- ANALOG DEVICES. **AD620 - Datasheet**. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>>.
- ANALOG DEVICES. **AD7705 - Datasheet**. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7705_7706.pdf>.
- BADER, D. **Schedule - 1.1.0 Documentation**. Disponível em: <<https://schedule.readthedocs.io/en/stable/>>.
- CHAAR, L. E.; LAMONT, L. A.; ZEIN, N. E. Review of photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2165–2175, jun. 2011.
- CHOUDHURY, S.; SINGH, G. K.; MEHRA, R. M. Design and Verification Serial Peripheral Interface (SPI) Protocol for Low Power Applications. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 3, p. 16750–16758, Outubro 2014. Citado na p. 19.
- DAWOUD, D. S.; DAWOUD, P. **Serial Communication Protocols and Standards**. 1. ed.: River Publishers, 2020. Citado na p. 17.
- HAUPT, A.; DACHI, É. P. **Eletrônica Digital**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.
- LEENS, F. An introduction to I2C and SPI protocols. **IEEE Instrumentation Measurement Magazine**, v. 1, p. 8–13, Fevereiro 2009.
- MEHROTRA, S.; RAWAT, P.; DEBBARMA, M.; SUDHAKAR, K. Performance of a Solar Panel with water immersion cooling technique. **International Journal of Science, Environment and Technology**, v. 3, p. 1161–1172, jun. 2014. Citado nas pp. 12, 13.
- PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1625–1636, Abril 2011. Citado na p. 12.
- PHILIPS SEMICONDUCTORS. **Philips Semiconductors I2C Handbook**. 2004. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee00013/microPCI/files/I2C/Philips%5C%20Semiconductors%5C%20I2C%5C%20Handbook.pdf>>. Citado na p. 20.
- PHILIPS SEMICONDUCTORS. **THE I2C-BUS SPECIFICATION**. 2000. Disponível em: <https://www.csd.uoc.gr/~hy428/reading/i2c_spec.pdf>.
- PPPD Documentation. Disponível em: <<https://linux.die.net/man/8/pppd>>.
- RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi Documentation**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/>>.

XLSEMI. **XL4015 - Datasheet**. Disponível em: <https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1811081616_XLSEMI-XL4015E1_C51661.pdf>.

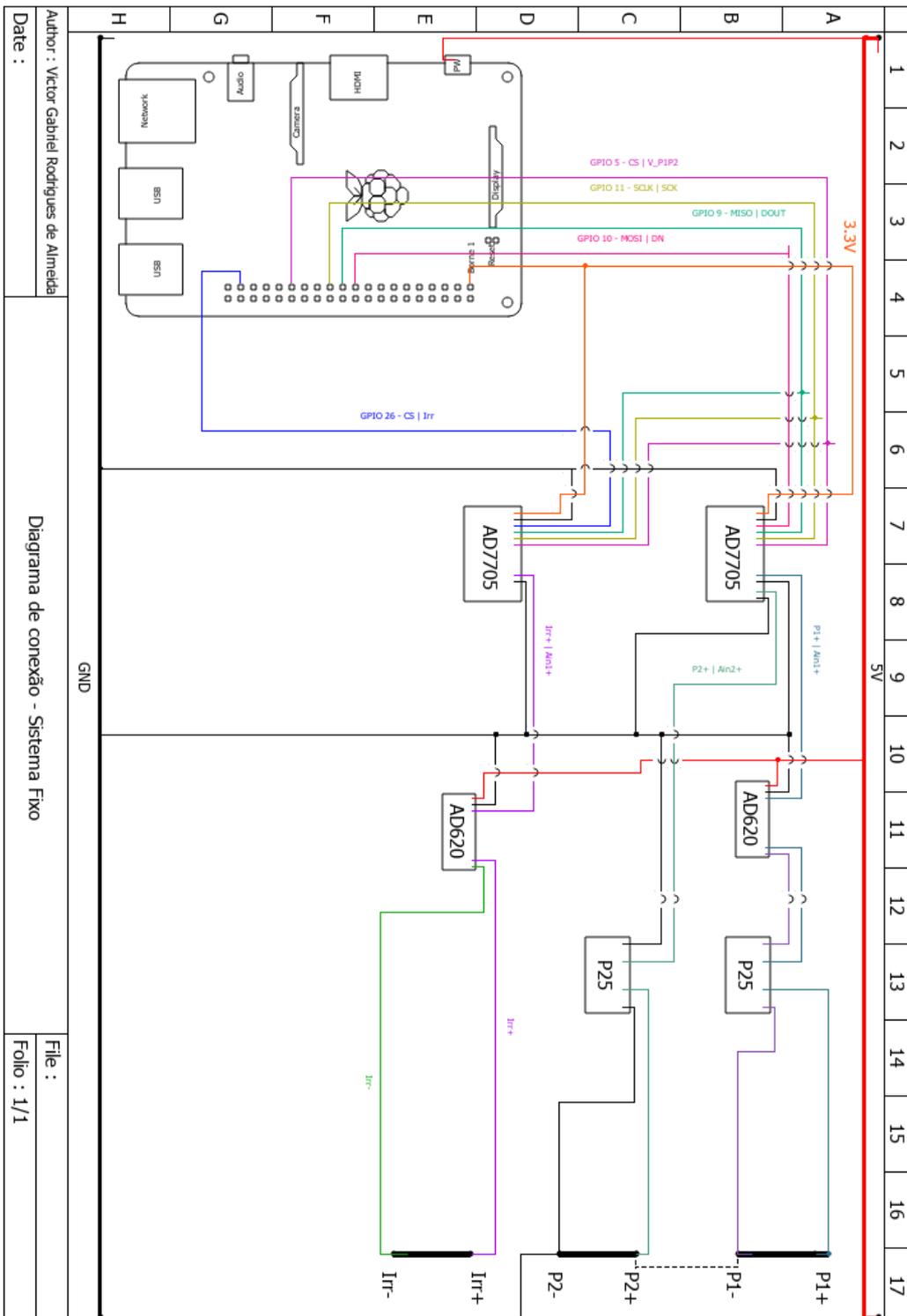
ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012. Citado na p. 12.

Apêndices

APÊNDICE A – Diagrama Unifilar do Sistema Flutuante



APÊNDICE B – Diagrama Unifilar do Sistema Fixo



APÊNDICE C – Diagrama Unifilar de Energização dos Dispositivos

