



Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA  
Projeto Integrador de Engenharia 2

## **RICC: Rede Integrada de Controle de Culturas**

Orientadores: Alex Reis, Guillermo Alvarez, Ricardo Chain,  
Rhander Viana e Sébastien Rondineau

Brasília, DF  
2019



Douglas Cavalcante, Eduardo Batista, Gabriel Araújo, Hugo Carvalho, Ian Massa, João Honorato, Lucas Figueredo, Pablo Silva, Pedro Aires, Rodrigo Campos, Tiago Araújo, Tiago Avelino, Victor Macedo, Yasmin Costa

## **RICC: Rede Integrada de Controle de Culturas**

Relatório técnico referente ao projeto RICC - Rede Integrada de Controle de Culturas, no âmbito da disciplina Projeto Integrador de Engenharias 2.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Alex Reis, Guillermo Alvarez, Ricardo Chain, Rhander Viana e Sébastien Rondineau

Brasília, DF

2019

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sensor 034B. Fonte: (MET ONE INSTRUMENTS, 2018) . . . . .	18
Figura 2 – Pluviômetro TB4 pela HSA. Fonte: (AMERICA, 2019) . . . . .	19
Figura 3 – Soil Watch 10 sensor de umidade do solo. Fonte: (TECH, 2019) . . . . .	22
Figura 4 – Sensor de umidade do solo modelo SEN0193. Fonte: (ROBOT, 2019) . . . . .	22
Figura 5 – Circuitos de condicionamento para Pt100 . . . . .	27
Figura 6 – Diagrama de Blocos Transceptor RF. Fonte: (??) . . . . .	29
Figura 7 – Máquina de Estados dos Modos de Operação do Transceptor RF. Fonte: (??) . . . . .	30
Figura 8 – Formato do Pacote do Enhanced ShockBurst™ . . . . .	32
Figura 9 – Rede mesh WLAN. Fonte:(YANG JIAN-FENG MA, 2009) . . . . .	34
Figura 10 – Quadro de comunicação IEEE 802.11s. Adaptada de:(YANG JIAN-FENG MA, 2009) . . . . .	34
Figura 11 – Propagação de mensagem por inundação. Fonte:(FARIAS, 2008) . . . . .	36
Figura 12 – Exemplo de tabela de roteamento DSDV. Fonte:(FARIAS, 2008) . . . . .	37
Figura 13 – Sensor 034B. Fonte: (ECONÔMICO, 2017) . . . . .	41
Figura 14 – Ligação dos pinos no microcontrolador . . . . .	43
Figura 15 – <i>Layout</i> da placa de circuito impresso para estação . . . . .	43
Figura 16 – Esquemático do circuito da central . . . . .	43
Figura 17 – <i>Layout</i> da placa de circuito impresso para central . . . . .	43
Figura 18 – Esquemático do circuito do atuador . . . . .	44
Figura 19 – Esquemático do circuito do atuador . . . . .	44
Figura 20 – <i>Layout</i> da placa de circuito impresso para central . . . . .	44
Figura 21 – Esquemático do sistema fotovoltaico. Fonte:Do Autor . . . . .	47
Figura 22 – Esquemático de perdas de sistema fotovoltaico. Fonte:Do Autor . . . . .	49
Figura 23 – Geração x Consumo. Fonte:Do Autor . . . . .	54
Figura 24 – Conexão do banco de barias. Fonte:Do Autor . . . . .	56
Figura 25 – Esquemático do quadro de proteção. Fonte:Do Autor . . . . .	58
Figura 26 – Diagrama Unifilar. Fonte:Do Autor . . . . .	62
Figura 27 – Valores da radiação solar mensal segundo o PVsyst. Fonte:Do Autor . . . . .	63
Figura 28 – Inclinação, orientação e tipo de fixação do módulo FV. Fonte:Do Autor . . . . .	64
Figura 29 – Consumo diário das cargas da estação inseridos no PVsyst. Fonte:Do Autor . . . . .	65
Figura 30 – Selecionando o modelo de bateria no PVsyst. Fonte:Do Autor . . . . .	65
Figura 31 – Selecionando o modelo do módulo fotovoltaico e controlador no PVsyst. Fonte:Do Autor . . . . .	66
Figura 32 – Produção normalizada pela potência nominal. Fonte:Do Autor . . . . .	66

Figura 33 – Taxa de desempenho e fração solar. Fonte:Do Autor . . . . .	67
Figura 34 – Esquemático de seções de eletroduto. Fonte:Do Autor . . . . .	69
Figura 35 – Conector de emendas . . . . .	70
Figura 36 – Esquemático do atuador. Fonte:Do Autor . . . . .	72
Figura 37 – Diagrama unifilar do atuador. Fonte:Do Autor . . . . .	73
Figura 38 – Posicionamento dos componentes no quadro do atuador. Fonte:Do Autor	74
Figura 39 – Diagrama unifilar da central de comando. Fonte:Do Autor . . . . .	75
Figura 40 – Posicionamento dos componentes no quadro da central. Fonte:Do Autor	76
Figura 41 – Arquitetura do servidor. . . . .	79
Figura 42 – Figura 4-5 retirada do livro (PFISTER, 2011) . . . . .	81
Figura 43 – Protocolo AMQP . . . . .	82
Figura 44 – Aplicação web . . . . .	83
Figura 45 – Aplicativo mobile . . . . .	83
Figura 46 – Esquemático das API's . . . . .	84
Figura 47 – Diagrama do sistema da central. . . . .	86
Figura 48 – Diagrama de casos de uso de atuadores. . . . .	87
Figura 49 – Diagrama de casos de uso de centrais. . . . .	88
Figura 50 – Diagrama de casos de uso de estações. . . . .	89
Figura 51 – Diagrama de casos de uso de servidor. . . . .	90
Figura 52 – Diagrama de casos de uso de usuários. . . . .	91
Figura 53 – Diagrama de classes do servidor. . . . .	92
Figura 54 – Diagrama de sequência do servidor. . . . .	92
Figura 55 – Diagrama de sequência da estação. . . . .	93

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os sensores para umidade relativa e temperatura . .	15
Tabela 2 – Comparação entre os sensores de pressão atmosférica . . . . .	15
Tabela 3 – Comparações gerais entre os sensores avaliados para umidade relativa, temperatura e pressão do ar. . . . .	16
Tabela 4 – Comparação entre os sensores de pluviosidade do fabricantes avaliados.	20
Tabela 5 – Comparação entre os sensores de umidade do solo capacitivos . . . . .	23
Tabela 6 – Características do solo para diferentes texturas . . . . .	25
Tabela 7 – Possíveis sensores para temperatura do solo . . . . .	26
Tabela 8 – Modos de operação . . . . .	31
Tabela 9 – Volume de informações gerado por cada sensor . . . . .	35
Tabela 10 – Características avaliadas dos possíveis microcontroladores . . . . .	38
Tabela 11 – Matriz de decisão para processador da estação . . . . .	38
Tabela 12 – Matriz de decisão para processador do atuador . . . . .	39
Tabela 13 – Levantamento de Cargas . . . . .	48
Tabela 14 – Angulação dos painéis. (GAZOLI, 2012) . . . . .	49
Tabela 15 – Irradiação solar média em Brasília. (CRECESB, 2019) . . . . .	52
Tabela 16 – Coeficientes de variação térmica da placa solar . . . . .	53
Tabela 17 – Temperatura média mensal. (DATA.ORG, 2019) . . . . .	53
Tabela 18 – Queda de tensão por trecho de cabeamento . . . . .	61
Tabela 19 – Quantidade de condutores de comando por sensor . . . . .	61
Tabela 20 – Valores usuais para Albedo . . . . .	64
Tabela 21 – Principais resultados da simulação. Fonte do Autor . . . . .	67
Tabela 22 – Balanços e resultados principais. Fonte do Autor . . . . .	68
Tabela 23 – Taxa de ocupação das seções do perfil . . . . .	70
Tabela 24 – Dimensionamento dos condutores de força do atuador . . . . .	73
Tabela 25 – Dimensionamento do cabeamento de força da central. . . . .	76
Tabela 26 – Atores . . . . .	85
Tabela 27 – Casos de uso . . . . .	87

# Sumário

	<b>Introdução</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	<b>ESTRUTURA</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Design de Estrutura</b>	<b>9</b>
1.1.1	Estação	9
1.1.2	Régua de sensores	9
1.1.3	Estruturas Auxiliares	9
<b>1.2</b>	<b>Materiais</b>	<b>9</b>
1.2.1	Aço Carbono	9
1.2.2	Fibra de vidro	9
1.2.3	Polímeros de Impressão 3D	9
<b>1.3</b>	<b>Cálculos Estruturais</b>	<b>9</b>
1.3.1	Simulações	10
<b>1.4</b>	<b>Análise térmica</b>	<b>10</b>
1.4.1	Simulações	10
<b>2</b>	<b>SISTEMA ELETRÔNICO</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistema de sensoriamento da estação</b>	<b>11</b>
2.1.1	Cálculo da evapotranspiração	12
2.1.2	Umidade relativa, temperatura e pressão do ar	14
2.1.2.1	Escolha do sensor	15
2.1.2.2	Condicionamento do sinal	16
2.1.2.3	Calibração	16
2.1.2.4	Algoritmo de processamento	16
2.1.3	Velocidade e direção do vento	17
2.1.3.1	Escolha do sensor	17
2.1.3.2	Condicionamento do sinal	19
2.1.3.3	Calibração	19
2.1.3.4	Algoritmo de processamento	19
2.1.4	Pluviosidade	19
2.1.4.1	Definição do sensor	19
2.1.4.2	Condicionamento do sinal	20
2.1.4.3		20
2.1.4.4	Algoritmo de processamento	21
2.1.5	Radiação solar	21
2.1.6	Umidade do solo	21

2.1.6.1	Definição do sensor . . . . .	21
2.1.6.2	Condicionamento do sinal . . . . .	23
2.1.6.3	Calibração . . . . .	23
2.1.6.4	Algoritmo de processamento . . . . .	26
2.1.7	Temperatura do solo . . . . .	26
2.1.7.1	Escolha do Sensor . . . . .	26
2.1.7.2	Condicionamento do Sinal . . . . .	27
2.1.7.3	Calibração . . . . .	28
2.1.7.4	Algoritmo de processamento . . . . .	28
<b>2.2</b>	<b>Sistema de Comunicação . . . . .</b>	<b>28</b>
2.2.1	Especificação do Transceptor RF . . . . .	28
2.2.1.1	Camada Física . . . . .	28
2.2.1.2	Camada de Enlace . . . . .	32
2.2.2	Algoritmo da Rede de Comunicação . . . . .	33
<b>2.3</b>	<b>Processamento . . . . .</b>	<b>37</b>
2.3.1	Processador da estação . . . . .	38
2.3.2	Processador do atuador . . . . .	39
2.3.3	Processador da central . . . . .	39
<b>2.4</b>	<b>Funcionamento geral do sistema eletrônico . . . . .</b>	<b>42</b>
2.4.1	Diagrama de blocos do sistema eletrônico . . . . .	42
2.4.2	Diagrama lógico do sistema eletrônico . . . . .	42
2.4.3	Controle da irrigação . . . . .	42
<b>2.5</b>	<b>Esquemáticos dos circuitos . . . . .</b>	<b>42</b>
2.5.1	Estação . . . . .	43
2.5.2	Central . . . . .	43
2.5.3	Atuador . . . . .	44
<b>2.6</b>	<b>Plano de construção . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>2.7</b>	<b>Plano de teste . . . . .</b>	<b>44</b>
2.7.1	Teste do sistema de sensoriamento . . . . .	44
2.7.2	Teste do sistema de comunicação . . . . .	45
<b>3</b>	<b>ENERGIA . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema Fotovoltaico <i>Off-grid</i> . . . . .</b>	<b>46</b>
3.1.1	Estruturação do sistema . . . . .	47
3.1.2	Perdas do sistema . . . . .	48
3.1.2.1	Perdas no painel . . . . .	49
3.1.2.2	Perdas no controlador de carga . . . . .	50
3.1.2.3	Perdas no regulador de Tensão . . . . .	50
3.1.2.4	Perdas no cabeamento . . . . .	51
3.1.3	Dimensionamento do Painel Solar . . . . .	51

3.1.4	Dimensionamento da Bateria . . . . .	55
3.1.5	Dimensionamento do Controlador de carga . . . . .	56
3.1.6	Dimensionamento do Quadro de Proteção . . . . .	57
3.1.7	Dimensionamento do Cabeamento . . . . .	60
3.1.8	Esquemático do sistema . . . . .	61
3.1.9	Simulações . . . . .	62
3.1.10	Modo de construção . . . . .	68
3.1.10.1	Ocupação dos eletrodutos . . . . .	69
3.1.10.2	Emendas de condutores . . . . .	70
3.1.11	Protocolo de Teste . . . . .	70
<b>3.2</b>	<b>Atuador . . . . .</b>	<b>71</b>
3.2.1	Esquemático do módulo . . . . .	72
3.2.2	Dimensionamento da fonte . . . . .	74
3.2.3	Modo de construção . . . . .	74
3.2.4	Protocolo de testes . . . . .	75
<b>3.3</b>	<b>Central . . . . .</b>	<b>75</b>
3.3.1	Esquemático da central . . . . .	75
3.3.2	Modo de construção . . . . .	76
3.3.3	Protocolo de teste . . . . .	77
<b>4</b>	<b>SOFTWARE . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Arquitetura de software . . . . .</b>	<b>78</b>
4.1.1	Protocolos de comunicação . . . . .	80
<b>4.2</b>	<b>Modelagem das aplicações . . . . .</b>	<b>81</b>
4.2.1	Aplicação Web . . . . .	82
4.2.2	Aplicativo mobile . . . . .	82
4.2.3	API de dados . . . . .	82
4.2.4	API de consulta . . . . .	82
4.2.5	Central . . . . .	85
<b>4.3</b>	<b>Casos de Uso . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>4.4</b>	<b>Diagramas . . . . .</b>	<b>85</b>
4.4.1	Diagramas de caso de uso . . . . .	85
4.4.2	Diagrama de classe . . . . .	85
4.4.3	Diagramas de sequência . . . . .	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>95</b>



# Introdução

# 1 Estrutura

Aqui temos uma introdução do trabalho realizado neste ponto de controle e algumas alterações que serão detalhadas mais a frente ([CALLISTER, 1991](#))

## 1.1 Design de Estrutura

### 1.1.1 Estação

Aqui entra todas as informações sobre a estação, tamanhos, Cads, descrição dos materiais em cada parte, processo de fabricação, o que tem nela.

### 1.1.2 Régua de sensores

Aqui entra todas as informações sobre a Régua, tamanhos, Cads, descrição dos materiais em cada parte, processo de fabricação, o que tem nela.

### 1.1.3 Estruturas Auxiliares

Aqui entra a descrição e cad do atuador e da central, vai depender do andamento das outras coisas.

## 1.2 Materiais

### 1.2.1 Aço Carbono

Justificativas da escolha desse material, propriedades e seu uso.

### 1.2.2 Fibra de vidro

### 1.2.3 Polímeros de Impressão 3D

Justificativas da escolha desse material, propriedades e seu uso.

## 1.3 Cálculos Estruturais

Teoria da análise

### 1.3.1 Simulações

Descrição e análise dos resultados

## 1.4 Análise térmica

Teoria da análise

### 1.4.1 Simulações

Descrição e análise dos resultados

## 2 Sistema Eletrônico

Explicação da estruturação do texto do sistema eletrônico

### 2.1 Sistema de sensoriamento da estação

A produtividade de uma cultura pode ser ampliada a partir do controle das mais diversas variáveis do ambiente. O conhecimento de tais parâmetros possibilita ao produtor criar condições mais favoráveis ao desenvolvimento da plantação. As estações desenvolvidas no projeto RICC serão capazes de medir as seguintes grandezas:

- Referentes ao ambiente externo:
  1. Umidade relativa do ar
  2. Temperatura do ar
  3. Pressão atmosférica
  4. Velocidade e direção do vento
  5. Pluviosidade
  6. Radiação solar
- Referentes ao solo:
  1. Umidade
  2. Temperatura

As medições internas do solo fornecem informações mais específicas sobre o estado da plantação e o seu desenvolvimento. Por exemplo, a temperatura do solo tem impacto no processo de germinação das plantas, afetando sua aquisição de nutrientes e absorção de água ([P.R.COSTA et al., 2010](#)).

Já a umidade do solo trata do dado mais significativo para o projeto, pois é o que permite efetivamente o controle da irrigação. Nessa linha, diversos trabalhos estudaram o desenvolvimento de um sistema de controle automático da irrigação ([ROMERO et al., 2012](#)) ([ZHAO et al., 2009](#)), onde medições são realizadas em regiões separadas da plantação, realimentando um sistema de controle da bomba para a manter a taxa de umidade do solo dentro de um intervalo predeterminado e relacionado ao tipo de cultura. No nosso projeto, serão realizadas medições em três níveis, pois o ponto ideal de medição

da umidade do solo depende do tamanho da raiz e das características de absorção da planta (SU; SINGH; BAGHINI, 2014).

A diversidade dos aspectos do solo, como sua composição de grãos e presença de sais minerais, influencia diretamente na dinâmica hídrica. Ou seja, o comportamento da infiltração e do escoamento superficial da água são próprios do solo em monitoramento (CASAROLI, 2018). Para a validação desse trabalho optamos por um solo característico da região do Distrito Federal, retirado da Fazenda Água Limpa (FAL) da UnB, onde existe a disponibilidade de dois tipos de solo característicos:

- Latossolo vermelho amarelo; solo argiloso (composição de argila igual ou superior a 30%), menos permeável, apresenta grande capacidade de armazenar água.
- Neossolo; solo arenoso (composição de argila igual ou inferior a 15% e de areia superior a 70%) onde o escoamento da água no solo é acelerado.

Os dados coletados para o ambiente externo são de extrema importância para a agricultura, pois permitem a modelagem do processo de evapotranspiração, o que caracteriza os ciclos de água e de energia do ecossistema, além de contribuir para a análise e previsão das condições climáticas (PERRY et al., 2009). Informações sobre o comportamento desse processo na plantação podem embasar tomadas de decisões agrícolas como: a escolha do período para cultivo, colheita ou plantação (FRISVOLD; MURUGESAN, 2013); a gestão do processo de irrigação (GOWDA et al., 2008); a antecipação de condições erráticas do clima (GOMMES et al., 2010).

As medidas do ambiente externo e do solo serão utilizadas no controle de irrigação de forma complementar, o que será melhor detalhado nas próximas seções. Para cada grandeza a ser medida, serão especificados o processo de escolha do sensor, o condicionamento do sinal, a necessidade de calibração e o algoritmo de processamento.

### 2.1.1 Cálculo da evapotranspiração

Neste projeto, os dados climáticos serão utilizados com foco na gestão do processo de irrigação e por meio da modelagem da evapotranspiração em plantações de soja no solo do Cerrado. O estudo dessa modelagem, nas condições especificadas para o projeto, foi realizado pela Embrapa (OLIVEIRA; MEIRELLES; FRANCO, 2011) e será usado como base para o trabalho.

Dessa forma, a evapotranspiração será calculada de acordo com o método de Penman-Monteith, padrão indicado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) (ALLEN et al., 1998a). Baseado nesse estudo, podemos estimar a evapotranspiração da cultura em milímetros de água durante o intervalo de medição  $\delta$  ( $mm/\delta$ ), como sendo:

$$Et_c = K_c.Et_o \quad (2.1)$$

onde  $K_c$  é o coeficiente da cultura e  $Et_o$  é a evapotranspiração de referência em  $mm/\delta$ . O coeficiente da cultura  $K_c$  será calculado usando a curva ajustada em (GUERRA et al., 2005), pela seguinte equação:

$$K_c = -0,00022x^2 + 0,0318x + 0,4588 \quad (2.2)$$

sendo que  $x$  é a quantidade de dias após a emergência da planta e será determinado pela data de emergência, a qual deverá ser especificada pelo produtor por meio da interface do aplicativo.

Já a evapotranspiração de referência em  $mm\delta^{-1}$  pode ser definida pelo método de Penman-Monteith como:

$$Et_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0,34u_2)} \quad (2.3)$$

em que:

- $\Rightarrow R_n$ : saldo de radiação à superfície ( $MJm^{-2}/\delta$ ).
- $\Rightarrow G$ : fluxo de calor no solo ( $MJm^{-2}/\delta$ ).
- $\Rightarrow T$ : temperatura do ar na altura da estação ( $^{\circ}C$ ).
- $\Rightarrow u_2$ : velocidade do vento à 2 metros de altura ( $m/s$ ).
- $\Rightarrow e_s$ : pressão de saturação de vapor (kPa).
- $\Rightarrow e_a$ : pressão atual do vapor (kPa).
- $\Rightarrow \Delta$ : declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $kPa/^{\circ}C$ ).
- $\Rightarrow \gamma$ : constante psicométrica ( $kPa/^{\circ}C$ ).

As variáveis  $R_n$  e  $T$  serão estimadas usando, respectivamente, as medições dos sensores de radiação solar e temperatura do ar, os quais serão descritos posteriormente. Sabendo que a velocidade do vento pode mudar em função da altura, e que altura do sensor será inferior à 2 metros, uma correção será aplicada, conforme especificado em (ALLEN et al., 1998b). Dessa forma, a velocidade do vento à 2 metros  $u_2$  será estimada como:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (2.4)$$

onde  $z = 1,15m$  é a altura de medição e  $u_z$  é a velocidade do vento medida nessa altura.

De acordo com (ALLEN et al., 1998b), o fluxo de calor no solo  $G$  é aproximadamente zero para medições diária, ou seja,  $\delta = 1$  dia. Já para medições horárias ou em períodos menores é possível fazer a aproximação  $G = 0,1R_n$  durante o dia e  $G = 0,5R_n$  durante a noite. Por esse motivo, a determinação de  $G$  será realizada em função da horário da medição e da periodicidade  $\delta$  definida.

Além disso, a pressão de saturação de vapor  $e_s$  pode ser definida em função da temperatura do ar  $T$ , a partir da equação: (trocar pela equação do matão)

$$e_s = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (2.5)$$

e a pressão atual do vapor  $e_a$  pode ser estimada por  $e_s$  e pela umidade relativa do ar (em %)  $UR$ , que será medida pelo sensor de umidade do ar, de acordo com a seguinte equação:

$$e_s = \frac{UR.e_s}{100} \quad (2.6)$$

O declividade da curva de pressão de saturação de vapor  $\Delta$  também pode ser calculado em função da temperatura do ar  $T$ , como sendo:

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{17,27T}{T+237,3} \right) \right]}{[T + 237,3]^2} \quad (2.7)$$

Por fim, a constante psicométrica  $\gamma$  pode ser calculado como:

$$\gamma = A.P \quad (2.8)$$

onde  $A$  é o coeficiente psicrômetro com ventilação natural ( $80 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ ) e  $P$  é a pressão atmosférica em  $kPa$  que será estimada pelo sensor de pressão do ar.

### 2.1.2 Umidade relativa, temperatura e pressão do ar

Seguindo a trabalho realizado no ponto de controle 1, o grupo havia decidido pelo uso do sensor DHT22 para realizar as medições de umidade relativa e temperatura do ar.

Tabela 1 – Comparação entre os sensores para umidade relativa e temperatura

Sensor de umidade e temperatura	Faixa de operação (%RH)	Resolução (%RH)	Acurácia (%RH)	Faixa de operação (°C)	Resolução (°C)	Acurácia (°C)
DHT22	0 - 100	0,1	$\pm 5$	-40 - 80	0,1	$\pm 0,5$
BME280	0 - 100	0,008	$\pm 3$	-40 - 80	0,01	$\pm 1,0$

Tabela 2 – Comparação entre os sensores de pressão atmosférica

Sensor de pressão	Faixa de operação (hPa)	Resolução (hPa)	Acurácia (°C)
BMP280	300 - 1100	0,01	$\pm 1,0$
BME280	300 - 1100	0,18	$\pm 1,0$

A escolha se deu com base nos critérios de disponibilidade, custo (um mesmo sensor para mais de uma medição desejada) e a faixa de operação (quando comparado com o modelo DHT11).

Entretanto, como consequência da decisão de calcular a evapotranspiração da plantação, veio a necessidade de medição da pressão atmosférica e, com isso, os sensores do ambiente externo tiveram que ser reavaliados de forma a procurar uma melhor solução para o sensoramento. Após uma pesquisa rápida, foi encontrado o sensor BME280, o qual realiza a medição de pressão atmosférica em conjunto com as medições de umidade relativa e temperatura do ar, sendo então um potencial substituto para o sensor DHT22.

#### 2.1.2.1 Escolha do sensor

Com o intuito de avaliar o desempenho do sensor BME280 quando comparado com o sensor DHT22, foi realizado uma tabela listando as características operacionais de ambos com relação às medições de temperatura e umidade relativa, tabela 1.

Segundo os dados coletados, o sensor com maior acurácia é o SHT30, contudo é a opção mais cara. O sensor DHT11, apesar de ser o menos custoso, tem uma faixa de operação reduzida e a diferença de preço é pequena em comparação com o DHT22. Contudo, por um pequeno aumento de custo, o sensor BME280 apresenta uma melhor acurácia e menor consumo de corrente. Além disso, este último também realiza medições de pressão atmosférica e temperatura do ar, grandezas necessárias para o cálculo de evapotranspiração. Por esse motivo e pela maior vantagem financeira (com relação ao SHT33), o sensor escolhido é o BME280. Como esse sensor apresenta uma resolução (0,008%RH) em escala consideravelmente menor que sua acurácia ( $\pm 3\%RH$ ), será considerada uma variação mínima de 0,1%RH durante o processamento.



Tabela 3 – Comparações gerais entre os sensores avaliados para umidade relativa, temperatura e pressão do ar.

Sensor	Tensão de entrada (V)	Consumo de corrente (mA)	Comunicação	Pinos de comunicação	Preço (R\$)
DHT22	3,3 - 6	1,5	Serial	2 Digitais	34,99
BMP280	1,8 - 3,6	1,0	I2C	2 Digitais	42,70
BME280	1,71 - 3,6	0,714	I2C	2 Digitais	33,35

#### 2.1.2.2 Condicionamento do sinal

Neste caso, nenhum condicionamento é necessário para o sinal, pois isso já é realizado internamente no módulo. Dessa forma, a conexão com o microcontrolador pode ser realizada diretamente pela linhas SDA e SCL e pela alimentação Vin e Gnd. O sensor escolhido comunica seus dados pelo protocolo I2C e já converte as medições para suas respectivas unidades: %RH para umidade relativa do ar, °C para temperatura do ar e hPa para a pressão atmosférica.

#### 2.1.2.3 Calibração

Apesar dessas medidas não necessitarem de uma calibração para conversão de unidade, os fabricantes recomendam um processo de compensação para melhorar a acurácia da medida. Esse processo consiste na extração de parâmetros salvos nos registradores do módulo, que são usados em uma função (disponível no *datasheet*) para corrigir os valores medidos.

#### 2.1.2.4 Algoritmo de processamento

O algoritmo de processamento para este sensor está exemplificado no pseudocódigo

3

---

**Algoritmo 1: FastTwoSum**

---

**Input:**  $(a, b)$ , two floating-point numbers**Result:**  $(c, d)$ , such that  
 $a + b = c + d$ 

```

if  $|b| > |a|$  then
    | exchange  $a$  and  $b$  ;
end
 $c \leftarrow a + b$  ;
 $z \leftarrow c - a$  ;
 $d \leftarrow b - z$  ;
return  $(c, d)$  ;

```

---

### 2.1.3 Velocidade e direção do vento

#### 2.1.3.1 Escolha do sensor

O equipamento mais comum de medição da velocidade do vento é o anemômetro. Esse instrumento converte a força eólica em movimento rotacional. A velocidade do vento está relacionada à velocidade angular deste movimento. Dentre os modelos de anemômetro existentes, os de copo destacam-se pela simplicidade de construção e eficiência de conversão do movimento, sua configuração se assemelha à de um gerador eólico com quatro pás no rotor.

Foram encontrados poucos modelos disponíveis no mercado brasileiro, porém seus valores elevados (a partir de R\$139,98, para modelos simples) inviabilizaram o uso no projeto. Levando em consideração a facilidade de construção de um anemômetro de copo e, sobretudo, com o intuito de reduzir os custos, foi decidido inicialmente pela construção desse sensor. Dessa forma, a estrutura seria projetada e impressa em 3D. A velocidade angular seria medida por meio da interação de sensores de efeito hall com ímãs posicionados no rotor.

Pelos mesmos motivos apresentados para o anemômetro, também optou-se pela construção do sensor de direção do vento. Porém, neste caso, utiliza-se uma haste horizontal e uma bandeira, de forma que a força do vento fará com que a haste se alinhe com sua direção. Para determinar a direção da haste, uma configuração de sensor hall também com um ímã de neodímio pode ser utilizada.

O professor Alex Reis disponibilizou ao grupo o equipamento 034B da empresa *Met One Instruments* figura 1, que é formado pelos sensores de velocidade e direção do vento. Seu valor de venda de US\$ 785,00 foi encontrado no site <https://www.stevenswater.com>. Uma vez que este instrumento trata-se de um modelo comercial desenvolvido para



Figura 1 – Sensor 034B. Fonte: (MET ONE INSTRUMENTS, 2018)

uso em estações meteorológicas, optou-se por seu uso no lugar dos equipamentos que projetaríamos. A acurácia obtida nas medições é de  $\pm 4^\circ$  para direção e de  $\pm 0,1 m/s$ , e a resolução é de  $0,5^\circ$  para direção

Os princípios de funcionamento do sensor 034B são semelhantes aos descritos anteriormente. Para a determinação de velocidade há um *Reed Switch* (chave acionada magneticamente), por onde são gerados pulsos a uma frequência relacionada à velocidade do vento. Este valor de frequência  $f_{Hz}$  em Hertz será lido no microcontrolador e convertida para uma velocidade  $V_{mps}$  em  $m/s$  por meio da equação seguinte, fornecida pelo fabricante no manual de operação do sensor (MET ONE INSTRUMENTS, 2001).

$$V_{mps} = \frac{f_{Hz}}{1,2517} + 0,28 \quad (2.9)$$

A direção do vento é determinada com o auxílio de um potenciômetro linear. Será portanto, montado um divisor de tensão resistivo. A direção é proporcional à queda de tensão que for observada. O manual de operação recomenda que seja associado um resistor de  $1k\Omega$  para evitar sobrecarga no equipamento.

Dado o elevado custo do sensor que será usado para a construção do protótipo, buscamos possíveis substitutos menos onerosos para utilização no projeto de um possível produto final. Este componente deve ter o maior número de características compatíveis com o utilizado. Assim, garante-se que as soluções propostas neste trabalho continuem válidas, ou que sejam minimamente modificadas.

O anemômetro produzido pela empresa brasileira WRF Comercial possui o mesmo princípio de funcionamento e pode ser alimentado com os mesmos valores de tensão. Assim, as conexões físicas e algoritmos mantem-se os mesmos em ambos os casos. Entretanto, os processos de calibração e confiabilidade dos dados devem ser reavaliados, já que o fa-

bricante não fornece informações suficientes para que se faça previamente tais inferências. Essas informações foram requisitadas ao fabricante, porém não obtivemos resposta até o momento. Para o produto final, uma solução viável seria a construção dos sensores, como descrito no começo desta seção.

#### 2.1.3.2 Condicionamento do sinal

#### 2.1.3.3 Calibração

#### 2.1.3.4 Algoritmo de processamento

### 2.1.4 Pluviosidade

No primeiro ponto de controle, foi detalhado o processo de escolha do sensor de pluviosidade, avaliando sensores comerciais, sensores de chuva e a fabricação de um sensor. Os sensores de chuva foram descartados devido a necessidade de impermeabilização e maior suscetibilidade à ruídos do meio. Em relação aos sensores comerciais, não foi encontrado uma opção viável para o projeto e, portanto, decidiu-se pela fabricação do pluviômetro. Este sensor seria realizado no modelo de gangorra e usando um sensor de efeito Hall para realizar a medição.

Entretanto, assim como para o sensor de velocidade e direção do vento, o professor Alex Reis emprestou ao grupo um pluviômetro comercial modelo TB4 da *Hydrological Services America* (HSA) figura 2.



Figura 2 – Pluviômetro TB4 pela HSA. Fonte: ([AMERICA, 2019](#))

#### 2.1.4.1 Definição do sensor

O pluviômetro comercial da HSA foi encontrado anunciado pela empresa Fondriest por um preço de US\$850,00 sem taxas de entrega, o que se converte em aproximadamente R\$3140,00 (pela conversão atual de 3,92). Esse preço excede o limite previsto para o projeto e, portanto, não seria uma solução viável para o produto final.

Contudo, apesar de não ser uma opção viável financeiramente, ainda é possível ser usado como prova de conceito no protótipo. Isso porque outros sensores mais simples, como o fornecido pela empresa brasileira WRF Comercial (por R\$148,50) apresentam o mesmo princípio de funcionamento e dimensões semelhantes.

Mais especificamente, ambos os sensores funcionam usando *Reed Switches* em conjunto com ímãs fixados na estrutura e na mesma configuração de gangorra descrita anteriormente. Por esse motivo, a lógica do programa de processamento desse sinal poderia ser mantida, apenas necessitando de uma nova calibragem. As informações de comparação entre os sensores está descrita na tabela 4

Tabela 4 – Comparação entre os sensores de pluviosidade do fabricantes avaliados.

Fabricante	Faixa de operação (mm/hr)	Resolução (mm)	Acurácia (%mm)	Tensão de entrada (V)	Comunicação	Pinos (A/D)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Preço (R\$)
WRF	-	0,25	-	-	Analógica	1 A	147	160	148,50
HSA	0 - 700	0,2	$\pm 3$	0 - 12	Analógica	1 A	200	315	3140,00

Analizando a tabela 4, percebe-se que a diferença nas dimensões entre os sensores é alta, porém, o sensor fabricado pela WRF possui ambas as dimensões de altura e diâmetro menores, possibilitando o projeto de uma estrutura de adaptação mais simples para o encaixe.

O problema deste último sensor da WRF está em sua falta de documentação, a qual foi requisitada para o fabricante, sem resposta até o momento de escrita deste documento. Assim, no caso de ausência de informação, as métricas de faixa de operação e acurácia devem ser testadas experimentalmente. Ainda, pensando em um produto a longo prazo, seria interessante a fabricação deste sensor (como planejado anteriormente) para reduzir os custos do produto.

Os dados de consumo de corrente destes sensores dependem do circuito de condicionamento, considerando que são compostos apenas de chaves magnéticas passivas. Uma vez escolhido o sensor TB4 da empresa HSA para o protótipo, foi definido o circuito de condicionamento da mesma forma que o circuito da figura ??, por se tratarem de *Reed Switches* com mesmo propósito

#### 2.1.4.2 Condicionamento do sinal

O circuito de condicionamento deste sensor pode ser com apenas um resistor de *pull-down*

#### 2.1.4.3

O processo de calibração deste sensor envolve o conhecimento prévio das dimensões do funil e das características mecânicas da gangorra interna. Essas características se encontram no *datasheet* do sensor e são, mais especificamente,

#### 2.1.4.4 Algoritmo de processamento

O algoritmo de processamento previsto para este sensor está exemplificado no pseudocódigo 3

---

**Algoritmo 2: FastTwoSum**


---

**Input:**  $(a, b)$ , two floating-point numbers

**Result:**  $(c, d)$ , such that  
 $a + b = c + d$

```

if  $|b| > |a|$  then
    | exchange  $a$  and  $b$  ;
end
 $c \leftarrow a + b$  ;
 $z \leftarrow c - a$  ;
 $d \leftarrow b - z$  ;
return  $(c, d)$  ;

```

---

#### 2.1.5 Radiação solar

#### 2.1.6 Umidade do solo

A medição de umidade do solo é central para o projeto e, portanto, deve ser definida criteriosamente. Dentre as formas de medição encontradas para essa aplicação, foram separadas no primeiro ponto de controle três categorias de sensores que cumprem as restrições de custo e disponibilidade: tensiômetros, sensores resistivos e sensores capacitivos. Ainda no ponto de controle 1, foi decidido pelo uso de sensores capacitivos, devido à melhor relação entre acurácia de medição, durabilidade, disponibilidade e custo.

##### 2.1.6.1 Definição do sensor

Dentre os sensores capacitivos encontrados, o que melhor se adequou ao projeto foi o sensor SoilWatch 10 da empresa Pino-Tech (figura 3). Esse sensor é completamente a prova d'água e já foi usado em projetos de controle de irrigação, sendo ideal para a nossa aplicação.



Figura 3 – Soil Watch 10 sensor de umidade do solo. Fonte: (TECH, 2019)

Entretanto, este sensor ainda não é disponível no Brasil e o custo de importação seria muito alto para o projeto, além do risco associado ao tempo de entrega. Por esse motivo, foi decidido deixar esse sensor como ideia para um produto futuro e foram avaliadas outras possibilidades mais viáveis para o protótipo. Dentre as possibilidades destacou-se o sensor SEN0193 (figura 4) pelos critérios de custo e documentação disponível, já que para a maior parte dos sensores avaliados nenhuma documentação específica foi encontrada. Dessa forma, esse foi o sensor escolhido para o protótipo.



Figura 4 – Sensor de umidade do solo modelo SEN0193. Fonte: (ROBOT, 2019)

De forma a analisar as mudanças que seriam necessárias para a transição do sensor SEN0193 para o sensor Soil Watch 10, pensando em um produto final, foi montada a tabela 5 com os parâmetros operacionais de ambos. Pela tabela vemos que as tensões de entrada e saída assim como a faixa de operação são diretamente compatíveis. Houve

apenas um pequeno aumento no consumo de corrente e variações nas dimensões físicas. Em relação as dimensões, da forma que foi pensada a estrutura seriam necessárias poucas alterações, apenas uma adaptação no encaixe do medidor. Apesar do sensor SEN0193 não ser completamente a prova d'água, a parte com circuito exposta será isolada pela estrutura do medidor.

Tabela 5 – Comparação entre os sensores de umidade do solo capacitivos

Fabricante	Faixa de operação (%RH)	Tensão de entrada (V)	Tensão de saída (V)	Consumo de corrente (mA)	Comunicação	Pinos (A/D)	Largura (mm)	Altura (mm)	Preço (R\$)
DFRobot	0 - 100	3,3 - 5,5	0 - 3	5	Analógica	1 A	23	98	29,90
Soil Watch	0 - 100	2,8 - 5,0	0 - 3	24	Analógica	1 A	25	170	85,14

### 2.1.6.2 Condicionamento do sinal

O condicionamento do sinal deste sensor é realizado internamente no módulo, de forma a produzir na saída um sinal analógico proporcional à capacitância medida. Assim, o sensor pode ser conectado diretamente na entrada analógica do microcontrolador, produzindo um número inteiro digital de 0 a 1023. Porém, esse número ainda não representa um valor real de umidade.

### 2.1.6.3 Calibração

Devido a sensibilidade do sensor quanto as características do ambiente, a obtenção de valores reais de umidade depende do tipo de solo e da cultura escolhida. Assim, para garantir que a leitura analógica do sensor esteja de acordo com o valor efetivo de umidade do solo, é necessário um processo de calibração.

Basicamente, devemos ajustar as saídas dos sensores capacitivos de acordo com alguma medição de referência. A prática de calibração (calibragem) ocorre predominantemente em duas situações, a calibragem em solo, no local de controle da irrigação e a calibragem em laboratório, realizada em ambiente controlado. Nosso contato com a Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e com a Embrapa Hortaliças, constatou que ambas praticam a calibragem em laboratório, tendo em vista a dificuldade de preparação do processo em solo. Além disso, a Embrapa Hortaliças se disponibilizou a auxiliar no processo fornecendo orientação e infraestrutura local para a prática desse trabalho. Justificando assim nossa escolha por esse modelo.

A ideia geral da prática é recolher uma amostra de solo em um recipiente controlado (cuja a massa é conhecida/medida) monitorando a massa do conjunto solo-recipiente, processo conhecido como gravimetria. Assim, saturando a amostra de solo com água, acompanhar as medições dos sensores junto da variação da massa total. Para associar esses valores de massa à uma umidade de referência é necessário secar em estufa o conjunto a fim de obter a massa seca total. A umidade gravimétrica em um instante  $t$  é dada por (RADI et al., 2018):



$$U(t) = \frac{m_{su}(t) - m_s}{m_s}$$

Onde  $m_{su}(t)$  é a massa de solo úmido em um instante  $t$  e  $m_s$  é a massa de solo seco (lembrando que o valor da massa do recipiente deve ser descontado dessas medidas). A metodologia do procedimento (extraída de (CASAROLI, 2018), (RADI et al., 2018) e (BOGENA et al., 2017)) é descrita a seguir:

- Materiais e ferramentas:
  - Sensores de umidade capacitivos;
  - Amostra do solo do cultivo (a altura do perfil da amostra depende da cultura);
  - Recipiente vazado para evasão de água;
  - Microcontrolador para tratamento de dados;
  - Sensor de temperatura;
  - Balança de precisão.
- Procedimentos:
  1. Recortar e fazer a retirada do perfil do solo para calibração de acordo com a cultura a ser monitorada;
  2. Retirar resquícios orgânicos e minerais (plantas e pedras) do solo;
  3. Secar em estufa o solo a uma temperatura de  $105^{\circ}C$  durante um período de pelo menos 24 horas;
  4. Medir a massa do recipiente vazio  $m_0$ ;
  5. Posicionar junto ao solo a estrutura do sensor no recipiente a uma altura desejada de medição de acordo com a cultura;
  6. Medir a massa do conjunto seco  $m_s + m_0$ ;
  7. Testar a estabilidade dos sensores; irrigar até o ponto de saturação do solo e realizar medições ao longo de um período de 20 minutos com amostragem de 1 coleta por minuto.
  8. Monitorar a temperatura ambiente e do recipiente;
  9. Saturar o solo com água;
  10. Posicionar o conjunto solo-recipiente na balança para determinar a massa umida saturada  $m_{su}(0) + m_0$ ;
  11. Calcular o valor de referência da umidade gravimétrica  $U(0)$ ;

12. Retirar o conjunto da balança e repousar em temperatura ambiente, garantindo a evasão da água do solo;
13. Realizar medições do sensor capacitivo em um período de 1 horas com taxa de atualização de 1 amostra por minuto;
14. Após o intervalo de 1 hora, reposicionar o conjunto na balança determinando a massa úmida  $m_{su}(1) + m_0$ ;
15. Calcular o valor de referência da umidade gravimétrica  $U(1)$ ;
16. Repetir o processo de secagem e pesagem em intervalos de 1 hora, computando a umidade gravimétrica junto as medições do sensor capacitivo até que o valor da  $k$ -ésima medida seja inferior a uma cota relacionada ao tipo de solo e cultura específica  $U(k) \leq \alpha$ .

Algumas considerações são necessárias para esse método. Em primeiro lugar, realizar a calibragem para cada sensor envolvido nas medições, além de repetir o processo para acúmulo de dados e garantir precisão estatística para a coleta. Além disso, relacionar os valores obtidos pela gravimetria com os dados dos sensores capacitivos, utilizando um método estatístico de minimização do erro quadrático.

Esse processo pode ser refinado, principalmente em relação a grandeza de referência, garantindo uma maior precisão para os sensores. Substituindo a análise da umidade gravimétrica  $U(t)$  pela umidade volumétrica  $\theta(t)$ , acrescentamos mais um parâmetro de controle das características do sistema, a densidade do solo  $\rho_s$  (CASAROLI, 2018). A umidade volumétrica é definida por:

$$\theta(t) = U(t)\rho_s = \frac{m_{su}(t) - m_s}{m_s}\rho_s$$

Até o presente momento a viabilidade do monitoramento da densidade do solo não foi aferida, podendo ou não entrar no procedimento de calibração.

O  $\alpha$  é um valor de umidade gravimétrica mínimo obtido de uma umidade volumétrica  $\theta_{min} = 0,100 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (CASAROLI, 2018). Para a conversão necessitamos do valor da densidade do solo, o que pode ser consultado da seguinte tabela extraída de (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006):

Tabela 6 – Características do solo para diferentes texturas

Textura do Solo	Densidade $\rho_s$	Cc (% em peso)	DTA ( $mm/cm$ )
Arenosa	1,55 - 1,80	10 - 20	0,6 - 1,0
Franco-arenosa	1,40 - 1,60	15 - 27	0,9 - 1,5
Franco-arenosa-argilosa	1,35 - 1,50	11 - 17	1,4 - 2,0
Franco-argilosa	1,30 - 1,40	31 - 42	1,6 - 2,2
Argilosa	1,20 - 1,30	39 - 49	2,0 - 2,5

Onde  $C_c$  representa a capacidade de campo, ponto de saturação do solo, e DTA a Disponibilidade Total de Água do Solo segundo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Além dessa forma, podemos medir a densidade do solo escolhido, determinando mais precisamente o valor de  $\alpha$ . Por fim:

$$\alpha = \frac{\theta_{min}}{\rho_s} = \frac{0,100}{\rho_s} \Rightarrow 0,055 \leq \alpha \leq 0,084$$

#### 2.1.6.4 Algoritmo de processamento

---

**Algoritmo 3: FastTwoSum**


---

**Input:**  $(a, b)$ , two floating-point numbers

**Result:**  $(c, d)$ , such that  
 $a + b = c + d$

**if**  $|b| > |a|$  **then**  
    | exchange  $a$  and  $b$  ;  
**end**  
 $c \leftarrow a + b$  ;  
 $z \leftarrow c - a$  ;  
 $d \leftarrow b - z$  ;  
**return**  $(c, d)$  ;

---

#### 2.1.7 Temperatura do solo

São vários os materiais transdutores que podem ser utilizados para medição de temperatura: termopares, termistores, termorresistências e junções PN. É importante que o sensor escolhido possua um encapsulamento que suporte as condições de maiores umidade e corrosividade.

##### 2.1.7.1 Escolha do Sensor

Abaixo estão relacionados alguns possíveis sensores comerciais que atendem as necessidades do projeto em termos de faixa de operação e acurácia da medida.

Tabela 7 – Possíveis sensores para temperatura do solo

Sensor	Faixa de operação ( $^{\circ}C$ )	Acurácia ( $^{\circ}C$ )	Tensão de entrada (V)	Consumo de corrente (mA)	Preço (R\$)	Pinos
LM35	-55 - 150	$\pm 0,5$	4 - 30	60	8,91	1 analógico
Ds18b20	-55 - 125	$\pm 0,5$	3 - 5	1	12,99	1 digital
Pt100	-200 - 650	$\pm 0,1$	3 - 5	-	10,96	1 analógico

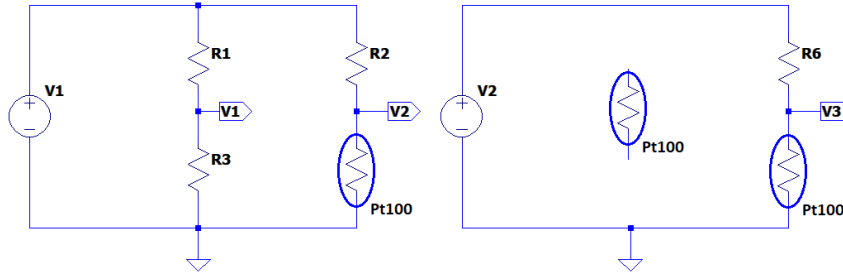


Figura 5 – Circuitos de condicionamento para Pt100

Todas as opções levantadas possuem uma ampla faixa de operação, que contempla a esperada para temperatura do solo. Os preços são semelhantes, fazendo com que o principal critério de escolha seja a acurácia. Neste caso, a melhor opção é o Pt100.

O consumo de corrente para o Pt100 depende do circuito que o condiciona, visto que trata-se de uma resistência que varia em função da temperatura, por isso tal valor não é encontrado na tabela 7.

#### 2.1.7.2 Condicionamento do Sinal

A resistência  $R_T$  do Pt100 a uma temperatura  $T$  é conseguida por meio da seguinte equação, onde  $R_0 = 100 \, \Omega$  é a resistência do sensor a  $0^\circ C$ .

$$R_T = R_0(1 + 3,9083 \cdot 10^{-3}T) \quad (2.10)$$

Portanto, a resistência  $R_T$  deve ser medida para que se calcule a temperatura  $T$ . Para tanto, foram levantados dois possíveis circuitos, apresentados na figura 5

O primeiro circuito, apresentado à esquerda, é uma ponte de Wheatstone, que quando em equilíbrio não apresenta diferença de potencial entre os nós  $V_1$  e  $V_2$ . As variações de resistência no Pt100 fazem com que haja uma tensão observável entre estes nós, a partir da qual é estimada a resistência  $R_T$  e obtida a temperatura  $T$ . Ainda, é necessária a amplificação deste sinal para que possa ser entendido pelo microprocessador.

O segundo circuito, apresentado à direita, é um divisor de tensão. A queda de tensão vista no Pt100 é proporcional a sua resistência, e deste modo também é possível estimar o valor desejado da temperatura  $T$ .

Ambos os circuitos foram simulados utilizando o software LTspice para que se pudesse avaliar suas performances. A amplificação necessária para a ponte de Wheatstone foi executada com um INA128 (seu modelo de simulação é fornecido no site de seu fabricante, Texas Instruments). O Pt100 foi simulado como uma resistência variando entre  $109 \, \Omega$  e  $119 \, \Omega$ , correspondendo aproximadamente às temperaturas  $24^\circ C$  e  $49^\circ C$ , respectivamente.

### 2.1.7.3 Calibração

### 2.1.7.4 Algoritmo de processamento

## 2.2 Sistema de Comunicação

### 2.2.1 Especificação do Transceptor RF

Essa seção se dedica a especificação do módulo RF a ser utilizado, tratando sobre os protocolos de comunicação das camadas OSI (*Open System Interconnection*) já implementadas. O padrão OSI é um modelo de rede de computadores amplamente utilizado em aplicações de telecomunicações. Trata-se de uma arquitetura para protocolos de comunicação. O modelo secciona redes de computadores em sete camadas, com objetivo de que a cada camada seja atribuída uma funcionalidade assinalada por um protocolo específico. As sete camadas do sistema OSI são: Física, Enlace, Rede, Transporte, Sessão, Apresentação e Aplicação. Nesta sessão vamos tratar mais especificamente das camadas Física e de Enlace, que são as implementadas no módulo RF nRF24LE1.

#### 2.2.1.1 Camada Física

Na camada física são tratados os seguintes parâmetros: (i) taxas de transferência de dados, (ii) frequência de recepção e de transmissão, (iii) largura de banda do sinal e (iv) filtros de recepção. O módulo RF nRF24LE1, implementa a camada física, sendo o objetivo deste documento apresentar suas características.

O módulo RF nRF24L01p, opera no espectro ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que possui banda de operação entre 2,4 GHz e 2,4835GHz, possui modulação GFSK, interface de antena comum no transmissor e receptor e taxas de transmissão de dados 250 Kbps, 1 Mbps e 2 Mbps. A seguir é mostrado o diagrama de blocos do transceptor.

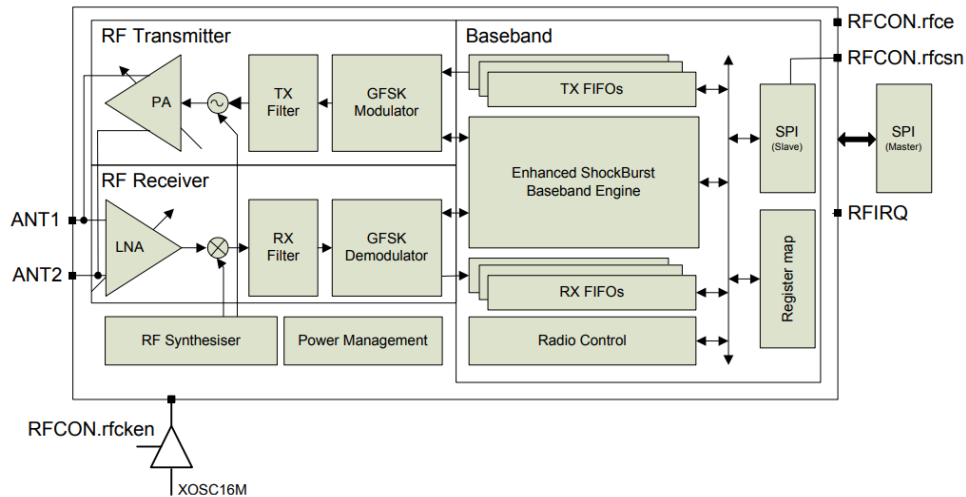


Figura 6 – Diagrama de Blocos Transceptor RF. Fonte: (??)

O transceptor possui um máquina de estados que controla os diferentes modos de operação, são eles: (i) *Power Down*, (ii) *Standby-I*, (iii) *Standby-II*, (iv) RX e (v) TX. A seguir é mostrada a máquina de estados do transceptor e uma descrição de cada um deles.

- (i) *Power Down*: O transceptor RF é desabilitado com consumo mínimo de corrente. Todos os valores dos registradores disponíveis pelo SPI são mantidos e o SPI pode ser ativado.
- (ii) *Standby-I*: Usado para minimizar o consumo médio de corrente e manter tempos curtos de inicialização. O modo ativo ocorre somente se o bit *rfce* (*control enable*) estiver ativado, enquanto não estiver, o transceptor de RF retorna ao Standby-I dos modos TX e RX.
- (iii) *Standby-II*: Nesse modo os *buffers* de *clock* extras são ativados e há maior consumo de corrente em comparação com ao (ii). O transceptor de RF entrará no modo de espera II se o bit *rfce* for mantido alto durante uma transmissão com os FIFOs de transmissão (FIFOs TX) vazio. Se um novo pacote é baixado para o FIFO TX, o filtro PLL é iniciado imediatamente e o pacote é transmitido após o atraso normal de estabelecimento do PLL ( $\delta t_{PLL} = 130\mu s$ ).
- (iv) RX: Transceptor é ativado como receptor. Nesse modo, o receptor demodula os sinais que chegam no canal, apresentando constantemente os dados demodulados ao mecanismo de protocolo de banda base. Se um pacote válido for encontrado (por um endereço correspondente e um CRC()válido), o *payload* do pacote será apresentado em um *slot* livre nos FIFOs de recepção (FIFOs RX). Se os FIFOs RX estiverem cheios, o pacote recebido é descartado. O transceptor permanece nesse modo até o



Tabela 8 – Modos de operação

Modo	Registrador PWR-UP	Registrador PRIM_RX	rfce	Estado dos FIFOs
RX	1	1	1	-
TX	1	0	1	Esvazia todos os níveis no FIFO TX <sup>a</sup>
TX	1	0	Mínimo de 10 $\mu$ s de pulso alto	Esvazia apenas um nível no FIFO TX <sup>b</sup>
Standby-I	1	0	1	FIFO TX vazio
Standby-II	1	-	0	Sem pacotes para transmissão a caminho
Power Down	0	-	-	-

a - Se o bit rfce é mantido alto o FIFO TX é esvaziado e todos os ACK necessários e possíveis retransmissões são realizados. A transmissão continua enquanto o FIFO TX for recarregado. Se o FIFO de TX estiver vazio quando o bit rfce ainda estiver alto, o transceptor de RF entrará em Standby-II. Neste modo, a transmissão de um pacote é iniciada assim que o rfce é definido alto após o *upload* de um pacote para o FIFO TX.

b - Este modo de operação realiza um pulso alto no bit rfce por pelo menos 10  $\mu$ s . Permitindo a transmissão de um único pacote. Este é o modo de operação normal, e após a transmissão do pacote, o transceptor de RF entra no Standby-I.

### Frequência do Canal

A largura de banda ocupada por cada canal depende da taxa de transmissão usada no transceptor. Para as taxas de 250 *kbps* e 1 *Mbps*, a largura de banda será inferior a 1 *MHz*. Entretanto, se usada uma taxa de 2 *Mbps*, a largura do canal pode atingir até 2 *MHz*. Isso significa que a frequência central dos diferentes canais devem estar espaçadas em, pelo menos, 1 *MHz* nos primeiros casos e 2 *MHz* no último, para garantir que não haverá sobreposição. Para o transceptor escolhido, o mínimo espaçamento programável (resolução da frequência do canal) é de 1 *MHz*.

A frequência do canal é inicializada pelo registrador RF\_CH de acordo com a fórmula  $F_0 = 2400 + \text{RF\_CH MHz}$  Para comunicação mútua, o receptor e o transmissor devem ter a mesma frequência do canal RF.

### Detector de Potência Recebida (RPD)

O RPD, localizado no bit 0 do registrador 9, dispara a partir de níveis de potência acima de -64 dBm detectados no canal, caso contrário o RDP = 0.

O RPD pode ser lido a qualquer momento enquanto o transceptor RF estiver em modo RX. Isso oferece um *snapshot* do nível atual de potência recebida no canal. O RPD é bloqueado sempre que um pacote é recebido ou quando o microcontrolador define rfce = 0. O status do RPD está correto quando o modo RX está ativado e após um tempo de espera de  $T_{stby2a} + T_{delay\_AGC} = 130\mu s + 40\mu s$ . O ganho de RX varia com a



temperatura, o que significa que o limiar de RPD também varia temperatura. O *threshold* de RPD é reduzido em 5dB a  $T = -40^{\circ}C$  e aumentado em 5dB a  $85^{\circ}C$ .

### 2.2.1.2 Camada de Enlace

Na camada de Enlace, o módulo RF nRF24LE1 possui o protocolo Enhanced ShockBurst™. O protocolo consiste em uma camada de enlace baseada em pacotes de dados que apresenta montagem automática dos pacotes, temporização, reconhecimento automático (*ack*) e retransmissões de pacotes. O Enhanced ShockBurst™ permite a implementação de comunicação de baixo consumo de energia e alto desempenho.

As principais características do protocolo são:

- Entre 1 e 32 *bytes* de comprimento de *payload*;
- Manuseio de pacotes automático
- Manuseio das transações de pacotes automático
- *Ack* automático
- Retransmissão automática

Como dito anteriormente, o Enhanced ShockBurst™ possui temporização e manuseio de pacote automático. Como o protocolo consiste em um enlace de dados bidirecional, ou seja, é uma comunicação ponto a ponto consistindo em dois transceptores, um Receptor Primário (*PRX*) e um Transmissor Primário (*PTX*). O protocolo sempre é iniciado e finalizado no transmissor, a partir da transmissão do pacote e ao fim da transação com um pacote *ack* recebido pelo transmissor.

É importante ressaltar que o Enhanced ShockBurst™ possibilita a configuração do número máximo de retransmissões e o *delay* máximo entre as retransmissões. Todo o manuseio automático do protocolo é feito sem o microcontrolador.

### Formato do pacote do Enhanced ShockBurst™

Preamble 1 byte	Address 3-5 byte	Packet Control Field 9 bit	Payload 0 - 32 byte	CRC 1-2 byte
-----------------	------------------	----------------------------	---------------------	--------------

Figura 8 – Formato do Pacote do Enhanced ShockBurst™

- **Preâmbulo (*preamble*):** é responsável pela sincronização do demodulador no receptor para receber a sequência de bits que estão chegando. Esse procedimento é feito para estabilizar o receptor.
- **Endereço (*Address*):** Este é o endereço do destinatário. O endereço garante que o pacote correto seja detectado pelo receptor.
- **Campo de Controle do Pacote (*Packet Control Field*):** Neste campo contém um campo de 6 bits para indicar o tamanho do pacote, um campo de 2 bits com a *ID* do pacote para identificar se é um pacote novo ou uma retransmissão e um bit para um *flag* de *no-ack*.
- **Payload:** O *Payload* é a carga útil do pacote e é um conteúdo definido pelo usuário do pacote. Pode ter de 0 a 32 bytes de largura.
- **CRC - (*Cyclic Redundancy Check*):** O CRC é o mecanismo de detecção de erros no pacote. Pode ter 1 ou 2 bytes e é calculado sobre o Endereço, Campo de Controle do Pacote e Payload. Se o CRC falhar o pacote não é aceito pelo Enhanced ShockBurst™.

### 2.2.2 Algoritmo da Rede de Comunicação

O protocolo já estabelecido do módulo nRF24L01 define a camada de enlace garantindo o fluxo de dados a uma taxa confiável para comunicação ponto a ponto. Assim, faz-se necessária a implementação de uma rede de comunicação em malha. De modo a prover uma comunicação estável entre duas estações que não estejam diretamente conectadas, procurando um caminho possível através de outras estações.

Essa comunicação é baseada no padrão IEEE 802.11s ([HIERTZ et al., 2010](#)), que estabelece um padrão flexível e extensível de comunicação para redes wireless Ad-Hoc em malha ([BANG, 2015](#)). A figura 9 apresenta a organização dessa rede, onde MP são pontos de malha, basicamente nós comuns com recursos de malha, MAPs são pontos de acesso de malha e MPPs são pontos de malha com função de portal.

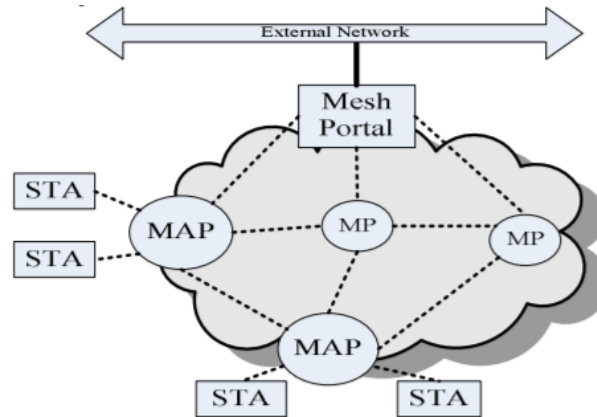


Figura 9 – Rede mesh WLAN. Fonte: (YANG JIAN-FENG MA, 2009)

Seguindo o padrão IEEE 802.11s, o quadro de comunicação que será implementado conta com 4 endereços. O endereço 1 é o receptor, sendo ele o próximo ponto de malha pelo qual a mensagem passará. O endereço 2 é do transmissor, que define o ponto da malha que enviou a mensagem. O endereço 3 define o destino final da mensagem. E o endereço 4 que define a origem dos dados. O quadro de comunicação geral pode ser visto na Figura 10.

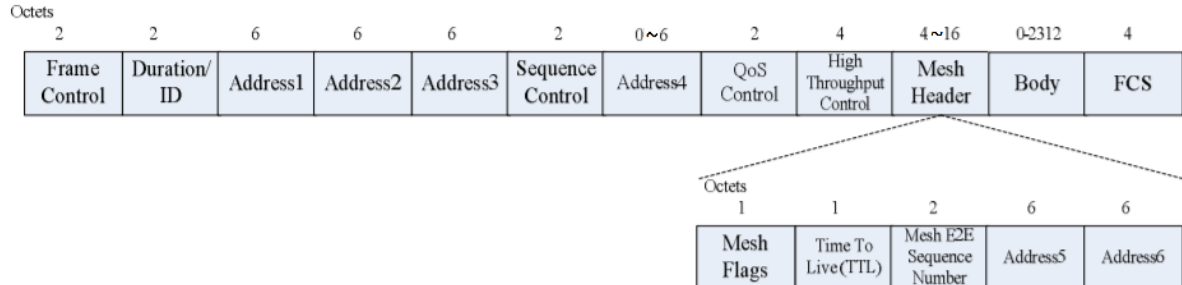


Figura 10 – Quadro de comunicação IEEE 802.11s. Adaptada de: (YANG JIAN-FENG MA, 2009)

O quadro de comunicação também conta com um campo de mensagem que é definido como Mesh Header, responsável por organizar a distribuição de mensagens dentro da malha, controlando desde a inundação de transmissão de dados, através do “Mesh e2e Sequence Number”, até evitar que dados da malha caiam acidentalmente em um *loop* de encaminhamento infinito, através do TTL (*Time To Live*).

Parte dos bits de *Payload* do pacote padrão já gerado pelo transceptor (figura 2.2.1.2) devem ser utilizados para que se implemente o quadro de comunicação da rede *mesh*. Assim, dos 32 *bytes* disponíveis para envio de mensagem, 8 deles serão reservados para o envio informações referentes ao estabelecimento da malha. Os primeiros 2 *bytes*

são um identificador para a central da rede, outros 2 *bytes* identificam o nó de origem da mensagem e os últimos 4 *bytes* são uma *timestamp* que indicam o horário de coleta dos dados no pacote.

A tabela 9 informa a quantidade de *bits* necessários para a representação de cada um dos valores que devem ser transmitidos entre os nós da rede. Cada envio totaliza um total de 108 bits, o que pode ser enviado em apenas um pacote de dados. Outras informações importantes ao projeto estão contidas nesta mesma tabela, tais como os pinos necessários e o volume total de dados gerado em um dia, visto as 12 medições que são feitas ao longo deste período

Tabela 9 – Volume de informações gerado por cada sensor

Medida	Valores Esperados	Mínima Variação	Unidade	Tipo da variável	Quantidade de bits (Mínima)	Envios por dia	Total de bits por dia	Pinos Analógicos	Pinos Digitais
Umidade do ar	0 - 100	0,008	%	float	16	12	192	0	2
Temperatura ambiente	0 - 60	0,01	°C	float	16	12	192	0	
Pressão atmosférica	300 - 1100	0.18	hPa	float	16	12	192	0	
Radição Solar		0,01	W/m <sup>2</sup>	float	16	12	192	0	
Umidade do solo	0 - 100	0,1	%	float	16	12	192	3	0
Temperatura do solo	0 - 60	0,1	°C	float	16	12	192	1	0
Velocidade do vento	0 - 27	0.1	m/s	float	16	12	192	0	1
Direção do vento	0 - 360	1	°	uint	9	12	108	1	0
Pluviosidade	0 - 200	0.2	mm	uint	8	12	96	0	1
Total					129	108	1548	5	4

Para garantir a funcionalidade da rede *mesh*, além do quadro de comunicação é importante definir o sistema de rede de roteamento a ser utilizado. São possíveis os seguintes sistemas (FARIAS, 2008):

- pró-ativos: os nós mantêm a informação da rota de todos os possíveis destinos, através de uma tabela de roteamento. Quando houver necessidade, a rota a ser utilizada será conhecida previamente.
- reativos: não calculam as rotas a priori, sendo esta calculada apenas quando existe a necessidade de envio de mensagens.
- híbridos: apenas alguns nós específicos atualizam periodicamente as rotas, enquanto outros continuam sendo reativos.

A baixa dinamicidade na malha de comunicação cria um ambiente ideal para redes pró-ativas, que para redes muito dinâmicas acabam gerando um fluxo de dados de controle muito alto, mas funciona com uma pequena taxa de perda de pacote e de poucos dados de controle para redes pouco voláteis a pequenas taxas de transmissão. Dentre os protocolos pró-ativos destaca-se o DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*), baseado no algoritmo *Distance Vector* de Bellman Ford. Tal método já foi usado em várias comparações,

que mostram resultados mistos, mas seus resultados são especialmente bons para redes com variações lentas na topologia.([THOMA, 2011](#))

O DSDV é um protocolo de roteamento orientado por tabela, ou seja, cada nó mantém uma tabela de roteamento atualizada periodicamente com informações sobre a topologia da rede. Desse modo, quando há requisição de troca de mensagens, o caminho para chegar ao destino final seja conhecido automaticamente ([FARIAS, 2008](#)). Neste protocolo, todos os nós enviam informações aos demais por broadcast para o cálculo da tabela de roteamento. Na tabela contém a rota para cada nó na rede e a quantidade de saltos necessários para atingir cada destino. Em caso da perda de um determinado *link*, os nós que perceberem essa alteração atualizam a tabela de roteamento e propagam essa informação aos demais, tornando a malha adaptativa.

A Figura 11 mostra a propagação de mensagens de controle entre os nós no momento do cálculo da tabela de roteamento.

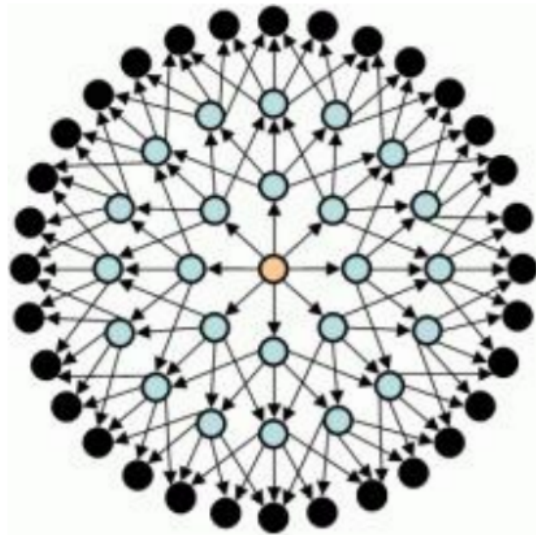


Figura 11 – Propagação de mensagem por inundação. Fonte:([FARIAS, 2008](#))

A tabela de roteamento calculada possui informações sobre o caminho até cada destino possível, com o nó vizinho a que deve ser encaminhada a mensagem, a quantidade de saltos necessários até o destino e número de identidade do destino. Abaixo, um exemplo de uma tabela de roteamento DSDV.

Destino	Próximo Salto	Métrica (Salto)	Nº Seqüência	Tempo	Estab. Dados
A	A	0	A-846	1000	Ptr-A
B	B	1	B-470	1200	Ptr-B
C	B	3	C-920	1500	Ptr-C
D	B	4	D-502	1200	Ptr-D

Figura 12 – Exemplo de tabela de roteamento DSDV. Fonte:([FARIAS, 2008](#))

## 2.3 Processamento

Cada um dos módulos que compõem o sistema possui funções específicas, de forma que o *hardware* para cada um deles precisa de ser avaliado individualmente. No processo de escolha, deve-se considerar os circuitos periféricos que interfaceiam com a unidade de processamento a ser definida. Em comum, estações, central e atuadores devem possuir uma capacidade de processamento que os habilite a comunicar com o transceptor nRF24L01p (via I2C ou SPI) e executar os algoritmos de protocolo adicionais para a implementação da rede *mesh*. A seguir são descritas as características particulares de cada um dos módulos:

- Estação:
  - Capacidade de interfacear com todos os sensores estipulados (5 pinos digitais e 2 conversores A/D e 2 pinos para comunicação SPI).
  - Capacidade de armazenar localmente todas as medidas ao longo de um dia (X bits).
- Central:
  - Possibilidade de estabelecer conexão estável com internet para realizar comunicação com os serviços em nuvem.
  - Memória suficiente para armazenar os dados de X estações por X dias (X bits)
- Atuador:
  - Capacidade de receber e executar os comandos para acionamento da carga.

Dentre dez possíveis componentes disponíveis no mercado brasileiro, foram analisadas as seguintes características técnicas para a escolha daquele que melhor supra as necessidades do projeto: (i) memória RAM; (ii) memória para armazenamento de programa, (iii) quantidade de pinos digitais disponíveis para uso geral, (iv) quantidade de conversores A/D e (v) sua resolução; suporte nativo aos protocolos (vi) SPI, (vii) I2C e (viii) Wi-Fi de comunicação; (ix) *clock* de processamento; (x) tensão de operação, (xi)

corrente máxima drenada e (xii) preço. A tabela 10 resume tais informações, uma vez que todas os processadores possuem comunicação SPI e I2C, esta informação foi omitida da tabela.

Tabela 10 – Características avaliadas dos possíveis microcontroladores

Processador	SRAM (Kb)	Memória de Programa (Kb)	GPIO (Un)	Conversores A/D		Clock (MHz)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Wi-Fi	Preço (R\$)
				Qtd.	Resolução (bits)					
Raspberry Pi 3 B+	1000000	4000000	26	0	-	1400	230	5	Sim	200
Raspberry Pi Zero	512000	4000000	26	0	-	1000	140	5	Sim	110
ESP32	520	448	40	20	12	240	80	4.5 ~9	Sim	40
ESP8266	80	512	16	1	10	80	80	4.5 ~9	Sim	22.96
MSP4302553G	0.5	16	24	8	10	16	0.23	1.8 ~3.6	Não	30
ATMEGA328P	2	32	32	6	10	16	6.6	1.8 ~5.5	Não	25
ATMEGA8A-PU	1	8	23	6	10	16	3.6	2.7 ~5.5	Não	14.8
PIC16F877A	0.368	14.3	33	8	10	20	0.8	2 ~5.5	Não	28.62
PIC18F452	1.5	32	34	8	10	40	1.6	2 ~5.5	Não	38.88
PIC24FJ64GB002	8	64	34	9	10	32	10	2 ~3.6	Não	35.45

### 2.3.1 Processador da estação

Com os dados contidos na tabela 10 e as características desejadas para os processadores do sistema, construiu-se um quadro de decisão para cada um dos três diferentes módulos. Foi atribuída uma nota (1, 2, 4, 6, 8 ou 10) para cada um dos critérios. A nota dada é tão maior quanto a conformidade do processador para o requisito em análise. Além dos requisitos técnicos, foi adicionado o critério “Facilidade de programação” que envolve os conhecimentos prévios da equipe com o processador em análise e a necessidade de aquisição *hardware* específico para programação do componente (*Pickit 3* para os microcontroladores da família PIC e a *launchpad* para os da família MSP, nos valores de R\$ 76,90 e R\$ 92,00, respectivamente)

Tabela 11 – Matriz de decisão para processador da estação

Processador	SRAM	Memória de Programa	Resolução do A/D	Clock	Potência	Preço	Facilidade de programação	Total
ESP32	10	10	10	10	2	6	10	58
MSP4302553G	2	10	8	8	10	6	8	52
ATMEGA328P	6	10	8	8	6	8	10	56
ATMEGA8A-PU	4	8	8	8	6	10	10	54
PIC16F877A	1	8	8	10	8	6	6	47
PIC18F452	4	10	8	10	8	6	6	52
PIC24FJ64GB002	10	10	8	10	6	6	6	56

Foram desconsiderados da matriz de decisão as placas Raspberry Pi 3 B+, Raspberry Pi Zero devido ao elevado valor frente às demais possibilidades, a placa ESP8266 também foi desconsiderada por não atender a quantidade mínima de conversores A/D necessários. A maior pontuação foi atingida pelo microprocessador ESP32, suas principais qualidades são: (i) memória RAM e (ii) de armazenamento de programa, (iii) maior *clock* de processamento e (iv) resolução dos conversores A/D.

### 2.3.2 Processador do atuador

Uma segunda matriz de decisão foi elaborada para o processador dos atuadores. Aqui, a placa ESP8266 volta a ser uma possibilidade, visto que as entradas analógicas não são necessárias neste módulo do sistema. O processador do atuador deve interfacear somente com o transceptor e com o módulo relé, o que demanda apenas pinos digitais. Assim, a coluna referente à resolução do conversor A/D foi retirada. Também, como não será executada a aquisição de dados com os sensores, sua demanda de processamento é reduzida em relação à estação. Desde modo, as colunas referentes ao *clock* e memória de programa não são mais consideradas na matriz de decisão, pois todas as opções possuem características mínimas nesses quesitos. Por fim, como o consumo de potência é um fator menos crítico no caso do atuador (dado sua forma de alimentação), os processadores em análise tiveram suas notas aumentadas neste quesito. As demais colunas, preço e facilidade de programação, mantiveram-se iguais.

Tabela 12 – Matriz de decisão para processador do atuador

Processador	SRAM	Potência	Preço	Facilidade de programação	Total
ESP32	10	6	6	10	42
ESP8266	10	6	8	10	44
MSP4302553G	2	10	6	8	34
ATMEGA328P	6	8	8	10	40
ATMEGA8A-PU	4	8	10	10	40
PIC16F877A	1	10	6	6	33
PIC18F452	4	10	6	6	36
PIC24FJ64GB002	10	8	6	6	40

A tabela 12 apresenta a matriz de decisão para a escolha do processador dos atuadores. A melhor pontuação foi atingida pelo ESP8266 e a ESP32 (microprocessador escolhido para as estações) ficou em segundo lugar com apenas dois pontos de diferença. Pensando em um produto comercial, a padronização dos microcontroladores para todo o sistema se torna uma solução interessante visando economizar com pedidos em larga escala, especialmente considerando que as estações são, normalmente, mais numerosas do que os atuadores. Essa economia na compra pode compensar a diferença de preço entre os microcontroladores, fator decisivo na pontuação final da matriz de decisão. Por esse motivo, optou-se por também utilizar o ESP32 nos atuadores.

### 2.3.3 Processador da central

O módulo da central, diferentemente das estações e atuadores, não se comunicará apenas com a rede *mesh*, mas também com o servidor central da aplicação. De acordo com a definição do produto, a central deve ser capaz de armazenar todos os dados coletados



pelas estações e enviá-los para a aplicação, onde o usuário poderá acessá-los. Além disso, também deve receber informações do servidor, como as configurações de irrigação e a localização das estações, a qual deve ser inserida pelo operário por meio do aplicativo.

Dentre as formas de conexão entre a central e o servidor, foram avaliados, inicialmente, o uso dos serviços do próprio agricultor em sua fazenda, como conexões cabeadas de internet (*Ethernet*) ou conexões sem fio (*Wi-fi*) locais. Entretanto, tendo em vista o maior alcance de redes móveis, também foram analisados os serviços de GSM, GPRS e 3G.

A vantagem de usar serviços móveis está em não demandar do cliente um acesso próprio, permitindo uma maior acessibilidade ao produto. Contudo, nesse caso, ainda seria necessário um chip SIM, envolvendo então uma mensalidade. Entre os serviços de GPRS e GSM, o primeiro apresenta funcionalidade mais interessantes para a proposta, considerando que já trabalha em pacotes de dados e alcança maiores taxas de transmissão. Já a rede 3G apresenta a maior taxa de transmissão entre as três, porém, é a que apresenta menor cobertura em áreas rurais.

Considerando os clientes que já possuem internet própria em algum lugar da fazenda, a rede *Mesh* permitiria a entrega dos dados coletados de pontos mais distantes para o local conectado, contando que haja nós suficientes entre eles e que a distância entre os nós não exceda os limites do módulo de comunicação. Neste caso, aproveitar a rede local se mostra mais vantajoso, considerando que o uso de redes móvel requer hardware adicional na central, como um módulo Sim800l para o GPRS, que custa na faixa de R\$40,00, além de um chip SIM e um plano de telefonia. Já para o acesso à redes locais, funcionalidades de acesso à internet são comumente disponíveis em SoCs (*Systems on chip*), como na ESP32 ou na Raspberry Pi, podendo ser aproveitadas.

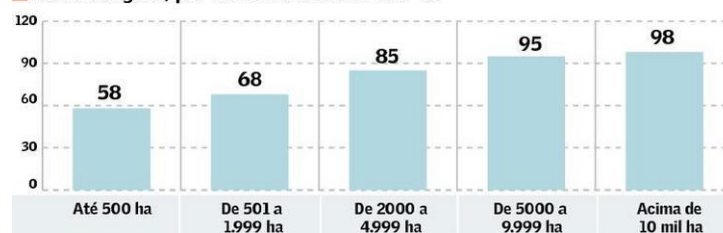
Segundo a matéria do jornal Valor Econômico ([ECONÔMICO, 2017](#)), uma pesquisa envolvendo três mil produtores realizada pela empresa Strider (empresa de tecnologias para o agronegócio), aponta que mais de 50% das fazendas, independente do tamanho, possuem acesso à internet em pelo menos um lugar. Essa porcentagem aumenta de acordo com o tamanho da fazenda chegando perto de 100% para fazendas de grande porte que são o público-alvo do produto, como pode ser observado no gráfico da figura 13.

Levando em consideração que serviços de telefonia móvel sofrem constantes alterações, mudando de uma geração para outra, e que isso envolve também uma substituição do *hardware*, o uso de um módulo como GPRS apresenta um risco potencial de perder o suporte e parar de funcionar, o que demandaria uma troca de todos os módulos centrais distribuídos. Essa situação não ocorre para o uso de internet local, onde melhorias do *hardware* são de responsabilidade do cliente e não afetaria o funcionamento do sistema RICC.

## Campo conectado

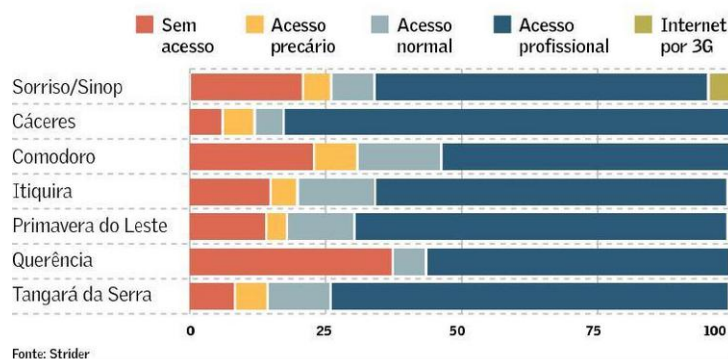
Presença da internet nas propriedades rurais brasileiras

### Acesso digital, por tamanho da fazenda - %



### Qualidade do acesso à internet

Em Mato Grosso, segundo produtores entrevistados - %



Fonte: Strider

Figura 13 – Sensor 034B. Fonte: (ECONÔMICO, 2017)

Portanto, olhando para o produto em longo prazo, o uso de redes locais promove uma maior facilidade tanto para a empresa quanto para o cliente e se mostra mais vantajoso em relação as outras alternativas. Por esses motivos, foi escolhido pelo uso da internet própria do cliente para a conexão com o servidor. A próxima etapa, é a escolha entre o uso de uma rede cabeada ou sem fio.

De acordo com o Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR (órgão ligado ao Comitê Gestor da Internet no Brasil), aproximadamente 79% da população rural que acessa a internet possui acesso com conexão cabeada (NIC.BR, 2017). Esse é um dado importante na decisão da forma de conexão com a internet.

A desvantagem de usar uma rede *Wi-fi* neste caso, se dá pela necessidade de inserção do SSID (nome da rede) e senha do usuário. Dependendo do processador escolhido, esses dados devem ser inseridos no código de programa, o que implicaria em questões de segurança. Além disso, a conexão cabeada é mais abrangente e possui a característica *plug and play*, não necessitando de uma reconfiguração sempre que a senha da rede fosse alterada. Assim, foi decidido pelo uso de conexões *Ethernet* cabeadas.

Este tipo de conexão da central não expõe um endereço de IP público para cada módulo, porém nosso servidor estará em nuvem pública. Dessa forma a comunicação deve ser iniciada e mantida pelas centrais sob sua própria demanda (através de *Websockets*)

para o estabelecimento e manutenção da conexão; e *Polling*, para requisições periódicas caso haja alguma interrupção. Tais funcionalidades demandam recursos de um sistema operacional.

A implementação do controle da conexão com a internet e utilização do protocolo HTTP envolve bastante complexidade de programação, principalmente se desenvolvida em linguagens de baixo nível como C. Outras soluções através de linguagens com maiores recursos de segurança e robustez não podem ser implementadas em microcontroladores comuns, dada a inviabilidade de execução de duas linguagens simultâneas.

Além disso, como conversado com o professor Bruno César Ribas (que ministra a disciplina de Fundamento de Sistemas Operacionais), gerenciar a conexão com a internet, stack TCP e enviar requisições HTTP, realizando paralelamente o processamento e recebimento dos dados da estação pela rede *mesh*, é uma tarefa que demanda uma elevada capacidade de processamento do hardware.

Ainda que possível a implementação desse sistema em um microcontrolador, como a ESP32 usada pelas estações, tal solução requer um nível de otimização de código e uma quantidade de testes e adaptações que inviabilizaria o desenvolvimento do projeto para o tempo da disciplina. Por esses motivos, optou-se pela utilização de um sistema operacional embarcado.

Nesta fase de prototipagem, a adoção da placa *Raspberry Pi modelo 3B* como o *hardware* para a central se mostra interessante, considerando a disponibilidade e conhecimento da placa pelo grupo. Suas especificações foram listadas anteriormente na tabela ???. Além do preço, que para o protótipo não é relevante (considerando que o grupo já a possui), sua outra desvantagem é o consumo energético. Entretanto, como a central estará conectada com a rede elétrica da fazenda, este quesito passa a ser menos prejudicial ao produto. Assim, a placa Raspberry Pi modelo 3B foi escolhida como o processador para a central.

## 2.4 Funcionamento geral do sistema eletrônico

### 2.4.1 Diagrama de blocos do sistema eletrônico

### 2.4.2 Diagrama lógico do sistema eletrônico

### 2.4.3 Controle da irrigação

## 2.5 Esquemáticos dos circuitos

Uma vez que foram definidos todos os componentes e circuitos eletrônicos necessários, seus comportamentos esperados e fluxos de dados entre as partes, pode-se elaborar

suas conexões físicas. A seguir são mostrados os esquemáticos dos circuitos para cada um dos módulos do sistema, bem como projetos preliminares das placas de circuito impresso.

### 2.5.1 Estação

Os circuitos da estação ficarão concentrados em uma única placa, que abrigará o microcontrolador e os circuitos de condicionamento para os sensores de temperatura do solo e direção do vento. Os sensores e o módulo transceptor possuem posições específicas ao longo da estação (conforme mostrado na descrição da estrutura). Tais componentes interfacearão com a placa principal por meio de conectores e cabeamento.

A ESP32 é acoplada a placa por meio de um soquete, para que facilite a troca em caso de defeito e possibilite também o aproveitamento deste componente em outros projetos. As ligações necessárias entre pinos são feitas por meio das trilhas impressas na placa. A figura 14 indica os pinos utilizados do microcontrolador, que desempenham as funções de comunicação SPI e I2C (com o transceptor e o sensor BME280) e interface com os sensores.

Figura 14 – Ligação dos pinos no microcontrolador

Por fim, a partir do esquemático completo, apresentado ao fim deste relatório em anexo, foi elaborado o *layout* da placa de circuito impresso, onde pode-se observar as trilhas, o posicionamento de todos os componentes, entre soquetes, conectores e circuitos auxiliares de condicionamento. O desenho da placa é apresentado na figura 20.

Figura 15 – *Layout* da placa de circuito impresso para estação

### 2.5.2 Central

O circuito presente na central é mais simples comparado ao existente nas estações. Este circuito é composto por dois componentes: (i) *Raspberry Pi 3B* e (ii) transceptor nRF24L01p. As conexões possibilitam a comunicação SPI entre estas duas partes e o controle do funcionamento transceptor pela *Raspberry Pi*. A figura 16 mostra tais ligações.

Figura 16 – Esquemático do circuito da central

A implementação deste circuito consiste da fabricação de um *shield*, cujo *layout* é mostrado na figura 17

Figura 17 – *Layout* da placa de circuito impresso para central

### 2.5.3 Atuador

O circuito dos atuadores também concentra-se em uma única placa, que abriga o microcontrolador e possibilita sua interface com o módulo transceptor e o módulo relé para acionamento da carga. Novamente, a ESP32 é acoplada à placa por meio de um soquete e as ligações necessárias entre pinos são feitas por meio das trilhas impressas na placa. O esquemático deste circuito é apresentado na figura 18

Figura 18 – Esquemático do circuito do atuador

O projeto da placa de circuito impresso partiu de modificações no projeto da placa das estações, vistos que os circuitos apresentam semelhanças (ligações entre controlador e módulo de comunicação). O desenho da placa é apresentado na figura 19.

Figura 19 – Esquemático do circuito do atuador

Figura 20 – *Layout* da placa de circuito impresso para central

## 2.6 Plano de construção

Estação

- PCB

Central

- PCB

Atuador

- PCB

## 2.7 Plano de teste

O sistema eletrônico do RICC, depois de construído, deve ser testado para que seja avaliado seu funcionamento. Os procedimentos a seguir descritos serão realizados com o objetivo de verificar a conformidade entre o sistema implementado e o projetado. Busca-se, assim, viabilizar a integração entre os subsistemas do produto.

### 2.7.1 Teste do sistema de sensoriamento

Teste individual dos sensores:

- Teste da saída dos sensores para mudanças forçadas no ambiente
- Leitura da saída com o microcontrolador

Teste conjunto dos sensores com o microcontrolador:

- Leitura de todos os sensores e formação dos pacotes
- Análise dos pacotes salvos

### 2.7.2 Teste do sistema de comunicação

Os custos para a construção de uma estação são elevados. Porém, são necessários alguns nós para a validação do funcionamento da rede *mesh*. Desta forma, será feita apenas uma estação completa, com as partes estruturais e os sistemas de energia e de sensoramento. Outras duas estações serão simuladas. O nó da central é único no sistema e também será construído. Por fim, também será implementado o sistema completo de um atuador.

As estações simuladas são compostas por um microcontrolador e um transceptor. Nelas, serão implementados os algoritmos de comunicação, mas os pacotes de dados (que seriam fornecidos pelos sensores) estarão previamente gravados na memória. Assim, a dinâmica da rede *mesh* poderá ser verificada sem que sejam gastos recursos com a construção de outra estação completa.

Criação de pacotes de dados padrão para o teste da rede

Teste da comunicação de um pacote entre diferentes nós

Teste da rede com vários pacotes a serem enviados para a central

Teste da forma com que a central processa e armazena múltiplos dados

## 3 Energia

Este capítulo apresentará a composição dos sistemas elétricos do projeto RICC e será dividido em três grandes seções referentes a cada um dos módulos do sistema.

A primeira abordará o dimensionamento do sistema fotovoltaico e dos componentes envolvidos na alimentação dos equipamentos eletrônicos da estação de medição. Assim, apresentados os cálculos, esquemáticos e simulações construídas para o projeto do sistema.

A segunda apresentará o dimensionamento do módulo atuador que será responsável por acionar remotamente o sistema de irrigação. Será dado enfoque no dimensionamento e simulações referentes a fonte de alimentação do sistema que foi projetada e será construída pelo próprio grupo.

Por fim, será apresentado o sistema de alimentação da central de comando. Vale ressaltar que o projeto da fonte foi realizado de modo a atender ambos os sistemas (Atuador e central) e de modo a ter sua saída regulada conforme a necessidade do sistema.

### 3.1 Sistema Fotovoltaico *Off-grid*

Todo o embasamento teórico necessário para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados foi apresentado no ponto de controle 1, assim como, um dimensionamento preliminar do sistema visando fornecer uma ideia inicial de custos.

Nesta etapa, será realizado o dimensionamento refinado do sistema apresentando todos os cálculos necessários, justificativa de escolha de componentes, alterações em relação ao primeiro dimensionamento e simulações computacionais validando os dados.

O objetivo principal da análise atual é definir os diagramas elétricos e definir o processo de construção do subsistema de alimentação da estação de medição atentando-se para a integração com os componentes eletrônicos e estruturais do projeto.

Todas as características climáticas necessárias para o dimensionamento do sistema fotovoltaico serão utilizadas levando em consideração que a estação encontra-se instalada no distrito federal.

Neste trabalho serão usados os símbolos de fase e neutro para indicar respectivamente positivo e negativo nos diagramas unifilares apresentados. Além disso, todo cabeamento em vermelho será positivo e todo o cabeamento em preto será negativo.

### 3.1.1 Estruturação do sistema

O sistema de alimentação fotovoltaico seguirá a seguinte estruturação:

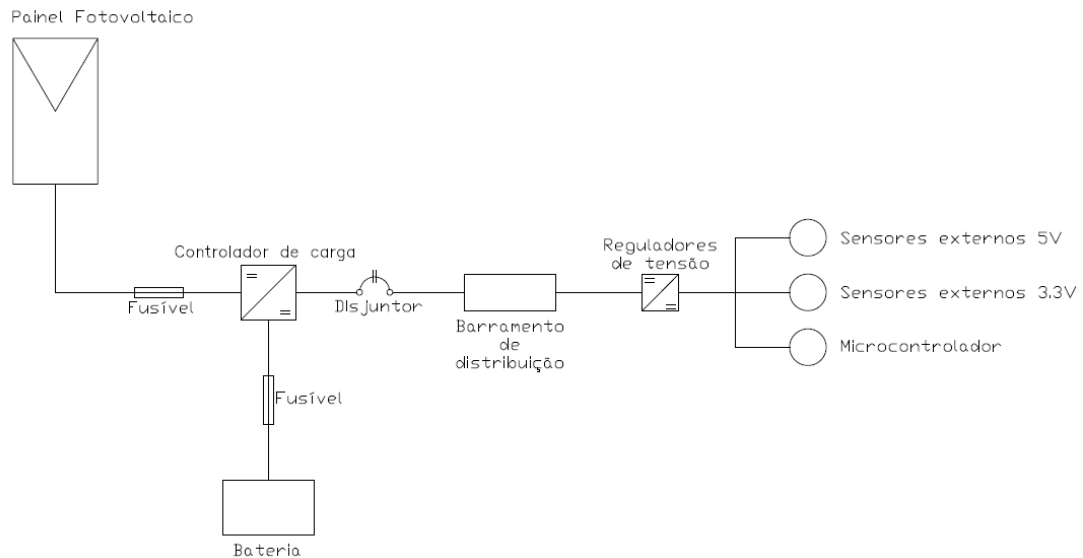


Figura 21 – Esquemático do sistema fotovoltaico. Fonte:Do Autor

A estruturação presente na figura 21 mostra um sistema *Off-grid* genérico que será dimensionado e ajustado para se adequar as características do projeto. Assim, todo o capítulo consiste no dimensionamento de seus componentes de modo a finalizar o esquemático.

Para que o sistema atenda ao projeto, ele deve ser capaz de suprir a demanda de todos os componentes da estação, assim como, suprir as perdas de energia do sistema que serão encaradas como cargas adicionais neste trabalho.

Deste modo, o dimensionamento do sistema teve início com o levantamento de carga da estação, que pode ser visto na tabela abaixo:



Tabela 13 – Levantamento de Cargas

Componente	Quantidade	Corrente (A)	Corrente total	Tensão (V)	Consumo (W)	Consumo diário (Wh/dia)
Sensor de umidade do solo capacitivo	3	0,005	0,015	5	0,075	1,8
Sensor de umidade e temperatura do ar	1	0,00071	0,00071	3,3	0,002	0,056232
Sensor de temperatura do solo	1	0,047	0,047	5	0,235	5,64
Sensor wattímetro	1	0,005	0,005	3,3	0,017	0,396
Pluviômetro	1	0,05	0,05	3,3	0,165	3,96
Anemômetro	1	0,05	0,05	3,3	0,165	3,96
Transceptor RF	1	0,0126	0,0126	5	0,063	1,512
Regulador de tensão	4	0,005	0,02	5	0,100	2,4
Led alta intensidade	2	0,03	0,06	2,1	0,126	1,512
Resistor led	2	0,03	0,06	1,2	0,072	0,864
Led difuso 3mm cores	2	0,02	0,04	2,1	0,084	2,016
Resistor led	2	0,02	0,04	1,2	0,048	1,152
Microcontrolador da estação	1	0,24	0,24	3,3	0,792	19,008
			0,54031	TOTAL	1,944	44,28

Para o cálculo do consumo diário de energia de cada sistema foi utilizada a seguinte equação:

$$E = P.t \quad (3.1)$$

Sendo E a energia demandada diariamente pelo componente, P sua potência de trabalho e t o número de horas de funcionamento diárias.

Foi considerado a potência nominal média indicada no datasheet do componente para realização dos cálculos. Além disso, considerou-se o tempo de funcionamento de 24 h por dia para os sensores com exceção dos leds de alta intensidade que serão acionados apenas durante a noite (12 h por dia).

De posse do consumo diário de energia, passou-se para estimativa das perdas no sistema de modo a permitir o dimensionamento dos componentes.

### 3.1.2 Perdas do sistema

Para o dimensionamento do sistema todas as perdas de energia serão consideradas como cargas que precisam ser supridas pelo sistema fotovoltaico. O esquemático abaixo apresenta as perdas consideradas.

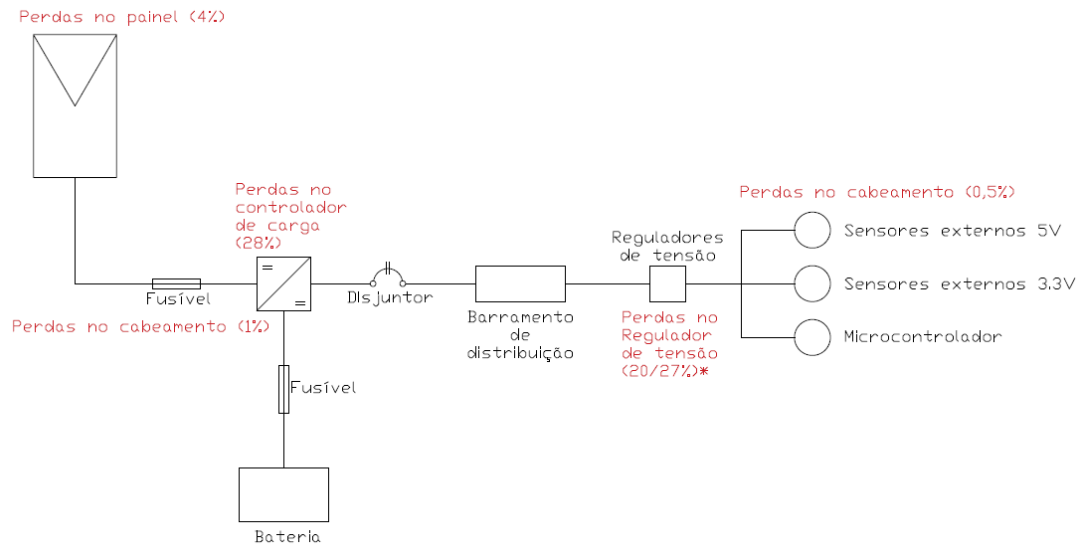


Figura 22 – Esquemático de perdas de sistema fotovoltaico. Fonte:Do Autor

O esquemático apresenta as principais perdas do sistema em relação a seus componentes, para melhor explicação dos valores adotados será apresentado uma breve explicação de cada um e a metodologia de definição dos valores de cada um.

### 3.1.2.1 Perdas no painel

As principais perdas de energia referentes aos painéis fotovoltaicos são provenientes da orientação do módulo, sombreamento, acúmulo de sujeira e mismatch.

Como o projeto contará apenas com uma placa fotovoltaica, não haverá perdas por mismatch já que estas estão relacionadas ao descasamento de dois ou mais módulos. Além disso, não haverá perdas por sombreamento, pois o equipamento será instalado em campo aberto e será mais alto que a cultura em questão. Por fim, será indicado no procedimento de montagem da estação que o painel deve ficar direcionado para o norte e com a inclinação condizente com a latitude segundo a tabela 14, de modo que não serão consideradas perdas provenientes da orientação do painel.

Tabela 14 – Angulação dos painéis. (GAZOLI, 2012)

Latitude geográfica do local	ângulo de inclinação recomendado
0 °C a 10 °C	10 °C
11 °C a 20 °C	latitude
21 °C a 30 °C	latitude + 5 °C
31 °C a 40 °C	latitude + 10 °C
mais de 40 °C	latitude + 15 °C

Desta forma a única perda considerada no painel será proveniente do acúmulo de poeira ou outros dejetos. Esta perda pode chegar a 15% da energia produzida em locais

secos, sendo a limpeza periódica indispensável. Em termos médios, o acúmulo de poeira provoca perdas de 4% ao ano. (ZORRILLA-CASANOVA, 2013).

Como as condições específicas de operação da estação não são definidas já que ela pode atuar em diversas plantações, será assumido o valor médio de 4% de perdas devido a acúmulo de poeira. Além disso, será indicado no manual de manutenção que os painéis devem ser limpos para manter a eficiência do sistema.

### 3.1.2.2 Perdas no controlador de carga

Como definido no relatório anterior, será utilizado um controlador de carga de PWM para realizar o controle da bateria. Este controlador transmite a energia proveniente dos painéis para a bateria através de pulsos cíclicos que podem atingir frequências de centenas de ciclos por segundo. Desta forma, ela consegue manter a tensão das baterias em um nível mais constante e reduzir o tempo que os painéis permanecem desacoplados da bateria, consequentemente aumentando a eficiência do sistema. (SAAD, 2012).

Porém, sua eficiência é limitada pela tensão de operação da bateria. Por exemplo, considere um painel fotovoltaico de 90 Wp com tensão nominal de 17,06 V e corrente nominal de 5,28 A (referência do painel sinosola SA90-64P). Caso seja utilizado um controlador de carga PWM de 12,5 V (Tensão de saída para bateria) a potência transmitida será de  $12,5V * 5,28$  totalizando 66 W, ou seja, apenas 73,3% da potência será transmitida para a bateria.

O valor das perdas no controlador de carga foi calculado utilizando o mesmo método apresentado acima com os valores de referência do modelo de painel e do controlador escolhido e com todos os cálculos detalhados na seção de dimensionamento do controlador.

Como os controladores PWM apresentam eficiências que variam de 70 a 75 % em média foi utilizado um valor inicial de 70 % de rendimento de modo a calcular a potência dos módulos fotovoltaicos, escolher um modelo e depois dimensionar o controlador para ele de modo a obter a eficiência real do controlador para esta situação. Em seguida, foi realizado mais uma interação aplicando a real eficiência do controlador e analisando se o painel ainda era o mais indicado para a situação.

### 3.1.2.3 Perdas no regulador de Tensão

O regulador de tensão é um dispositivo que realiza a conversão DC/DC da tensão disponibilizada pela bateria para a tensão de operação dos sensores e componentes eletrônicos. No projeto, será utilizado o módulo regulador de tensão LM2596, este módulo consegue trabalhar em uma ampla faixa de tensões de entrada e ser regulado para uma tensão específica de saída.

Este módulo é um conversor CC-CC Buck com dispositivo de comutação semi-

condutor chaveado, o que aumenta sua eficiência em relação aos modelos de regulador lineares. Assim, o componente foi escolhido levando em conta sua maior eficiência, custo de aquisição e padronização do sistema, pois como ele pode ser regulado para obter uma saída específica a partir da entrada de 12V da bateria, pode-se utilizá-lo em todos os pontos de regulação da estação.

A porcentagem de perdas foi definida de acordo com o datasheet do componente e suas curvas de eficiência. Quanto maior a diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída do regulador, menor será a eficiência da conversão. Por isso, são apresentados dois valores de perdas no regulador sendo o de 20% para a regulação de 12V para 5V e o de 27% para a regulação de 3.3 V. Tais regulações e especificações serão abordadas mais profundamente no decorrer do capítulo.

#### 3.1.2.4 Perdas no cabeamento

Todos os sistemas de cabeamento foram dimensionados de modo a se manterem dentro do limite máximo de queda de tensão estipulado de 1,5%.

Esse limite será subdividido em duas partes para os circuitos de alimentação e circuitos de distribuição. Essa divisão foi considerada apenas para o cálculo da queda de tensão nos trechos do circuito e não existe fisicamente.

Será considerado circuito de alimentação o cabeamento que conecta a placa fotovoltaica ao quadro e o cabeamento que conecta a bateria ao quadro. Estes cabeamentos foram projetados de modo a apresentarem perdas de até 1%.

Por fim, será considerado circuito de distribuição todo o cabeamento que parte do quadro e visa alimentar os sensores e demais componentes da estação. Este circuito também foi dimensionado de modo a apresentar perdas de até 0,5%.

### 3.1.3 Dimensionamento do Pannel Solar

Os painéis fotovoltaicos são as estruturas responsáveis por gerar a energia que abastecerá todos os componentes da estação de medição. Deste modo, eles são dimensionados para atender a demanda de energia diária mais as perdas inerentes ao sistema.

$$E_C = \sum(C.t) + Perdas \quad (3.2)$$

Sendo  $E_c$  a energia consumida diariamente, C a potência do equipamento e t o tempo de uso. As perdas são dadas pela equação:

$$Perdas = \sum(C.t.\eta) \quad (3.3)$$

Com  $\eta$  sendo a porcentagem de perdas a qual a energia está exposta.

Como apresentado no início do capítulo o consumo de energia dos equipamentos eletrônicos é de 44,28 Wh/dia e as perdas totais do sistema variam entre 53 a 60%. Assim, a energia consumida diariamente é de:

$$E_C = 44,28 + (11,35.0,53) + (32,93.0,6) = 70.05 \frac{Wh}{dia} \quad (3.4)$$

Na equação 3.4 a primeira parcela de perdas se refere aos componentes alimentados em 5v e a segunda aos componentes alimentados em 3,3v.

Em seguida é necessário obter os dados de potência solar para efetuar o cálculo da potência do painel. Como foi definido que o estudo de caso será realizada considerando uma plantação no distrito federal foram obtidos os dados de irradiação mensal deste local através do CRESESB.

Tabela 15 – Irradiação solar média em Brasília. (CRECESB, 2019)

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal (kWh/m <sup>2</sup> dia)												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano horizontal	0 °C N	5,42	5,74	5,05	5,06	4,83	4,7	4,95	5,77	5,7	5,59	5,08	5,44	5,28
Ângulo de latitude	16 °C N	5,01	5,5	5,1	5,46	5,56	5,61	5,83	6,47	5,91	5,45	4,75	4,98	5,47

A partir dos dados de irradiação é possível calcular as horas de sol pleno diárias através da equação:

$$HSP = \frac{I}{1 \frac{kW}{m^2}} \quad (3.5)$$

Sendo HSP o número de horas de sol pleno e I a irradiação solar. Para sistemas isolados, deve-se escolher o menor valor de irradiação proveniente da tabela no ângulo de interesse e assegurando que o sistema conseguirá abastecer a carga mesmo no mês com menor incidência solar. No caso do trabalho, esse valor será igual a 4,75 kWh/m<sup>2</sup> dia.

De posse destas informações é possível calcular a potência de pico do sistema.

$$P_p = \frac{E_c}{HSP} = 14,748 W_p \quad (3.6)$$

Como não há modelo comercial de placa fotovoltaica nesta medida, foi escolhido utilizar o modelo comercial imediatamente superior de 20 Wp. Por fim, optou-se pelo painel fotovoltaico da marca Yingli modelo YL020P-17b. (SOLAR, 2019)

A energia gerada por um módulo fotovoltaico varia de acordo com sua temperatura de operação, pois conforme exposto no primeiro ponto de controle o aumento da tempe-

ratura do módulo promove a diminuição da tensão de saída da placa consequentemente reduz a potência gerada.

Para calcular a redução da potência do painel devido a temperatura é necessário conhecer as variáveis da placa e a temperatura média a qual ele trabalhará. Assim, a tabela 16 apresenta a variação das grandezas do módulo segundo a temperatura e a tabela 17 apresenta a temperatura média para o distrito federal.

Tabela 16 – Coeficientes de variação térmica da placa solar

Grandezas	Coeficientes de variação
Coeficiente de Temperatura da Potência(Pm)	-0,45 %/°C
Coeficiente de Temperatura da Corrente(Isc)	0,06 A/°C
Coeficiente de Temperatura da Voltagem(Voc)	-0,37 V/°C

Tabela 17 – Temperatura média mensal. (DATA.ORG, 2019)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	21.9	21.9	21.7	20.8	19.6	18.9	19.9	21.3	22.3	22.1	21.7	21.3
Temperatura mínima (°C)	17.1	17	16.7	15.3	13.5	12.5	13.3	14.8	16.7	17.2	17.1	16.1
Temperatura máxima (°C)	26.7	26.9	26.7	26.3	25.7	25.3	26.5	27.9	27.9	27	26.3	26.5

A como no caso da irradiação, deve-se utilizar o mês com maior temperatura máxima de modo a garantir que o sistema consiga suprir a carga durante todos os períodos do ano. Assim, será utilizado o valor de 27,9°C como temperatura máxima.

A temperatura média da célula fotovoltaica em operação vai ser sempre superior à temperatura ambiente devido ao efeito fotovoltaico e as perdas Ôhmicas. De modo geral, pode-se calcular a temperatura do módulo através da seguinte equação:

$$T_{mod} = T_{amb} + kt.G \quad (3.7)$$

Sendo  $T_{mod}$  a temperatura na superfície do módulo,  $T_{amb}$  a temperatura ambiente,  $kt$  a constante térmica para o módulo que pode ser adotada como 0,03°C e  $G$  é a irradiância média de teste sobre o módulo que pode ser adotada como 1000 W/m<sup>2</sup>.

Assim a temperatura do módulo é:

$$T_{mod} = 27,9 + (0,03.1000) = 57,9^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

Com a temperatura de operação do módulo é possível descobrir a queda da potência produzida em relação a temperatura de testes utilizando os coeficientes de variação apresentados.

$$P_{real} = P.(1 + C_p.(T_{mod} - T_{test})) \quad (3.9)$$

Sendo  $P_{real}$  a potência real gerada pelo módulo,  $P$  a potência de teste que para o modelo escolhido é de 20 W,  $C_p$  é o coeficiente de variação da potência em função da temperatura e  $T_{test}$  é a temperatura de teste do módulo que é adotada como 25 °C.

Assim, a potência real gerada pelo módulo é de:

$$P_{real} = 20 \cdot (1 + (-0,45/100) \cdot (57,9 - 25)) = 17,04W \quad (3.10)$$

Deste modo, é possível concluir que o painel fotovoltaico apresentará uma potência maior do que a potência consumida, mesmo no mês com maiores temperaturas no ano, assegurando o suprimento de energia para a estação.

Por fim, é possível utilizar os dados de irradiação mensal e de temperatura média para determinar a geração de energia do sistema. A figura 22 apresenta a relação entre geração e consumo no decorrer do ano.

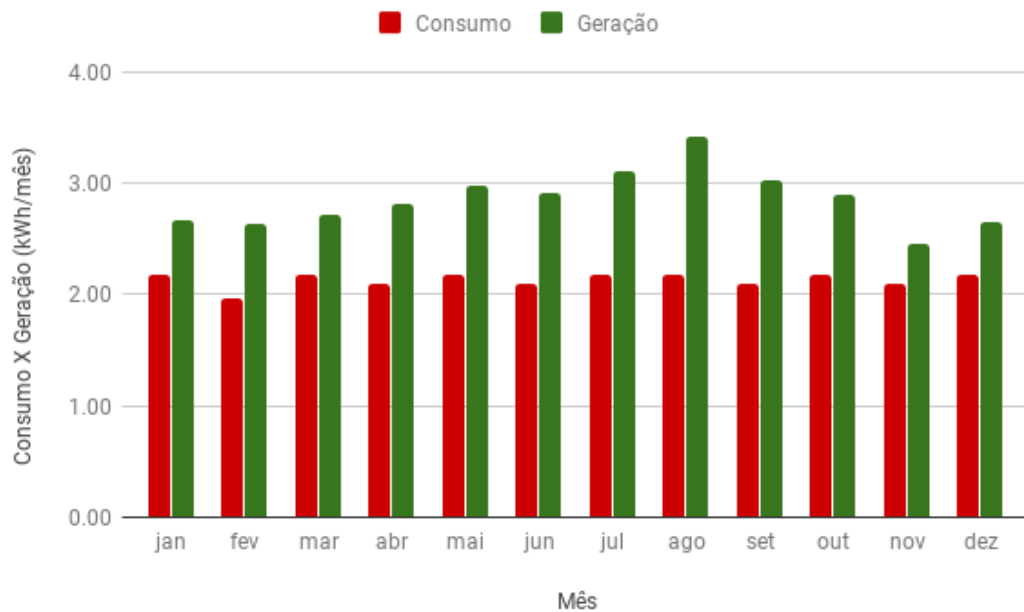


Figura 23 – Geração x Consumo. Fonte:Do Autor

É possível observar que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico é superior a energia consumida em todos os meses do ano. Esse fato ocorre porque o modelo comercial de 20W é maior do que o necessário para a alimentação do sistema. Contudo, o modelo diretamente inferior de 10 W não consegue suprir a demanda energética de modo que é necessário usar o modelo previsto.

Vale ressaltar que a energia adicional permitirá que as baterias sejam carregadas mais rapidamente e tornará o sistema mais robusto já que conseguirá absorver perdas maiores de energia sem comprometer a alimentação das cargas.

### 3.1.4 Dimensionamento da Bateria

O sistema de baterias será responsável por armazenar a energia excedente produzida durante o dia para ser utilizada em momentos de pouca ou nenhuma geração. Para dimensionar a bateria necessária ao projeto é utilizada a seguinte equação:

$$Bat_{c20} = \frac{(C_c + Perdas).N}{\eta.V} \quad (3.11)$$

Sendo  $Bat_{c20}$  a capacidade da bateria em Ah,  $C_c$  o consumo diário dos equipamentos da estação,  $N$  o número de dias de autonomia,  $\eta$  a profundidade de descarga da bateria e  $V$  a tensão da bateria.

As perdas apresentadas no dimensionamento da bateria não são as mesmas utilizadas no dimensionamento dos painéis, já que as perdas por acúmulo de sujeira e eficiência do controlador de carga não se aplicam. Desta forma, a bateria enxerga apenas cerca de 21 a 28% de perdas que são provenientes da eficiência do regulador e das perdas nos cabos.

Como requisito de projeto, foi definido que o sistema apresentará autonomia de três dias. Além disso, para o projeto de PI2, foi decidido que será usado 100% de capacidade de descarga já que se trata de um protótipo apenas e não é necessário que ele tenha uma vida útil muito longa. Por fim, será utilizado baterias de 12 V, pois estas são mais fáceis de comprar e em geral mais baratas que as de tensões superiores.

Assim, a capacidade da bateria para o projeto será de:

$$Bat_{c20} = \frac{(44,28 + (11,35.0,21) + (32,93.0,28)).3}{12} = 13,97Ah \quad (3.12)$$

A capacidade encontrada é difícil de ser encontrada em modelos comerciais de modo que serão utilizadas duas baterias de 7 Ah conectadas em paralelo. A conexão em paralelo permite que ambas as baterias colaborem enviando corrente ao circuito e dessa forma criando uma capacidade conjunta de 14 Ah que é aproximadamente o valor necessário.

Segundo o manual das baterias da Unipower, quando é utilizado uma profundidade de descarga de 100% a vida útil da bateria é de cerca de 200 ciclos. Para o caso de aplicação real do produto seria aplicado uma profundidade de descarga de 50% aumentando a vida útil para mais de 600 ciclos. (UNIPOWER, 2019)

Esta consideração foi informada a estrutura de modo que a estação consiga comportar a nova bateria (Bateria do caso comercial) sem precisar de nenhuma mudança estrutural.

A bateria escolhida para ser usada no projeto será a bateria estacionária selada VRLA 12V 7Ah UP1270SE da Unipower. As baterias serão ligadas através do esquemático



24.

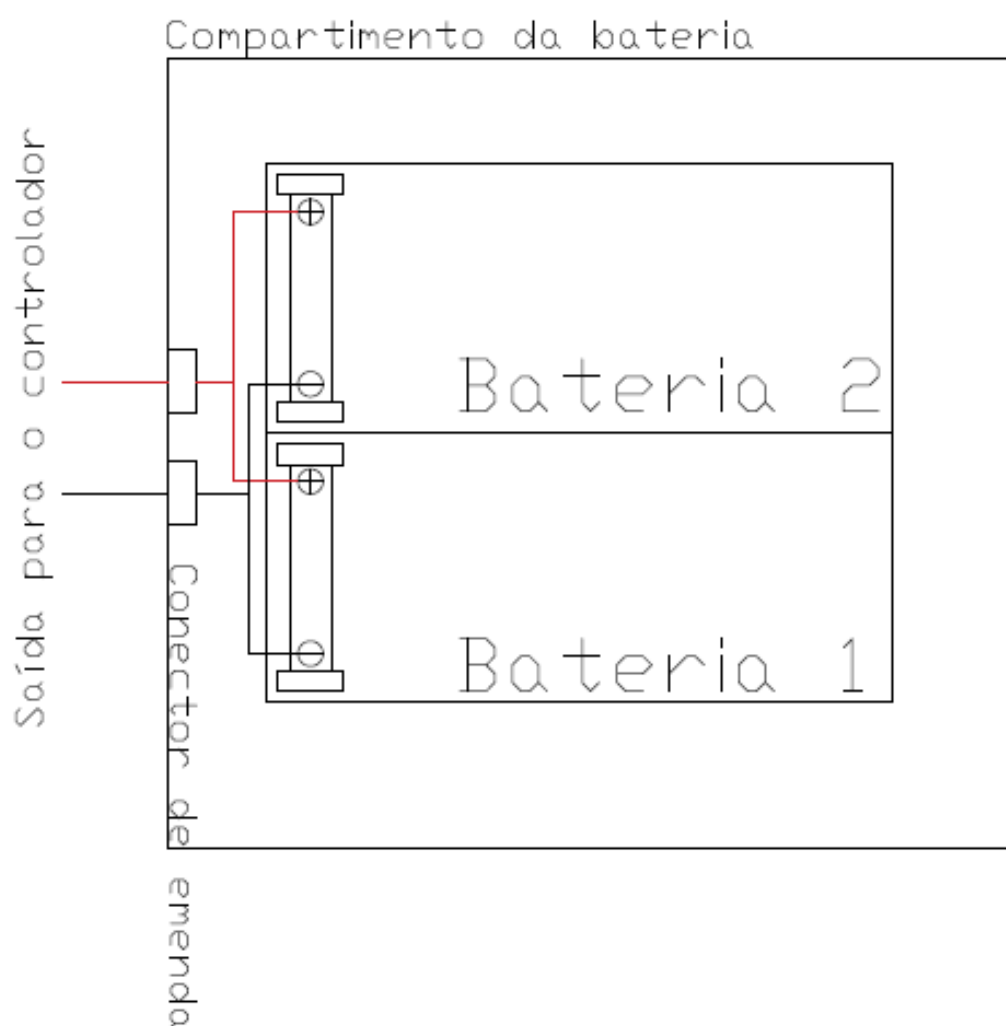


Figura 24 – Conexão do banco de baterias. Fonte:Do Autor

Serão utilizados conectores de emenda para fios de modo a realizar a conexão das duas baterias em paralelo com o controlador de carga. Esse tipo de conector substitui a conexão manual dos cabos sendo mais confiável e reduzindo a resistência de contato de modo a reduzir as perdas no cabeamento.

Além disso, serão usados terminais de luva fêmea para realizar a conexão entre os fios e os terminais da bateria.

### 3.1.5 Dimensionamento do Controlador de carga

Para o dimensionamento de um controlador de carga deve-se levar em conta a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos e a tensão de operação do sistema de bateria. Assim, é possível calcular a corrente de trabalho do componente e escolher o modelo que melhor atenda a necessidade do projeto.

Dessa forma, temos:

$$C_o = \frac{P_g}{V} = \frac{20}{16,6} = 1,2A \quad (3.13)$$

Sendo  $C_o$  a corrente de operação,  $P_g$  a potência gerada pelos painéis e  $V$  a tensão dos painéis. Além disso, deve-se calcular a corrente demandada pela carga e a corrente de curto circuito do painel de modo a assegurar que o controlados aguente todas as correntes que possa ser exposto.

No caso do projeto, os sensores e componentes elétricos demandam uma corrente total de 0,4552 A. Além disso, o manual do painel aponta que sua corrente nominal de operação é de 1,2 A e sua corrente de curto circuito é de 1,31 A de modo que o controlador deve suportar a máxima corrente que pode passar por ele (1,31 A).

Comercialmente o modelo de controlador de carga com menor corrente de operação apresenta corrente de 5 A o que é suficiente para o projeto e permitirá um sistema robusto e com menos probabilidade de queima do controlador.

O controlador de carga escolhido para aplicação foi o modelo Epsolar Landstar LS0512E 5A 12V. Ele apresenta a tecnologia PWM e atende os critérios expostos no ponto de controle 1, além disso, é compatível com a placa e com a bateria escolhida, apresenta rapidez na entrega e custos compatíveis com o orçamento do projeto.

Por fim, a eficiência deste controlador é calculada utilizando as características do painel escolhido. A placa apresenta tensão nominal de 16,6 V e corrente nominal de 1.2 A o que totaliza sua potência nominal de 20 W, como o controlador PWM reduz a tensão enviada pelo painel de modo a carregar a bateria, temos que a potência entregue pelo controlador é de 14.4 W, ou seja, apenas 72 % da potência de pico do painel.

### 3.1.6 Dimensionamento do Quadro de Proteção

O quadro de proteção da estação seguirá o seguinte esquemático:

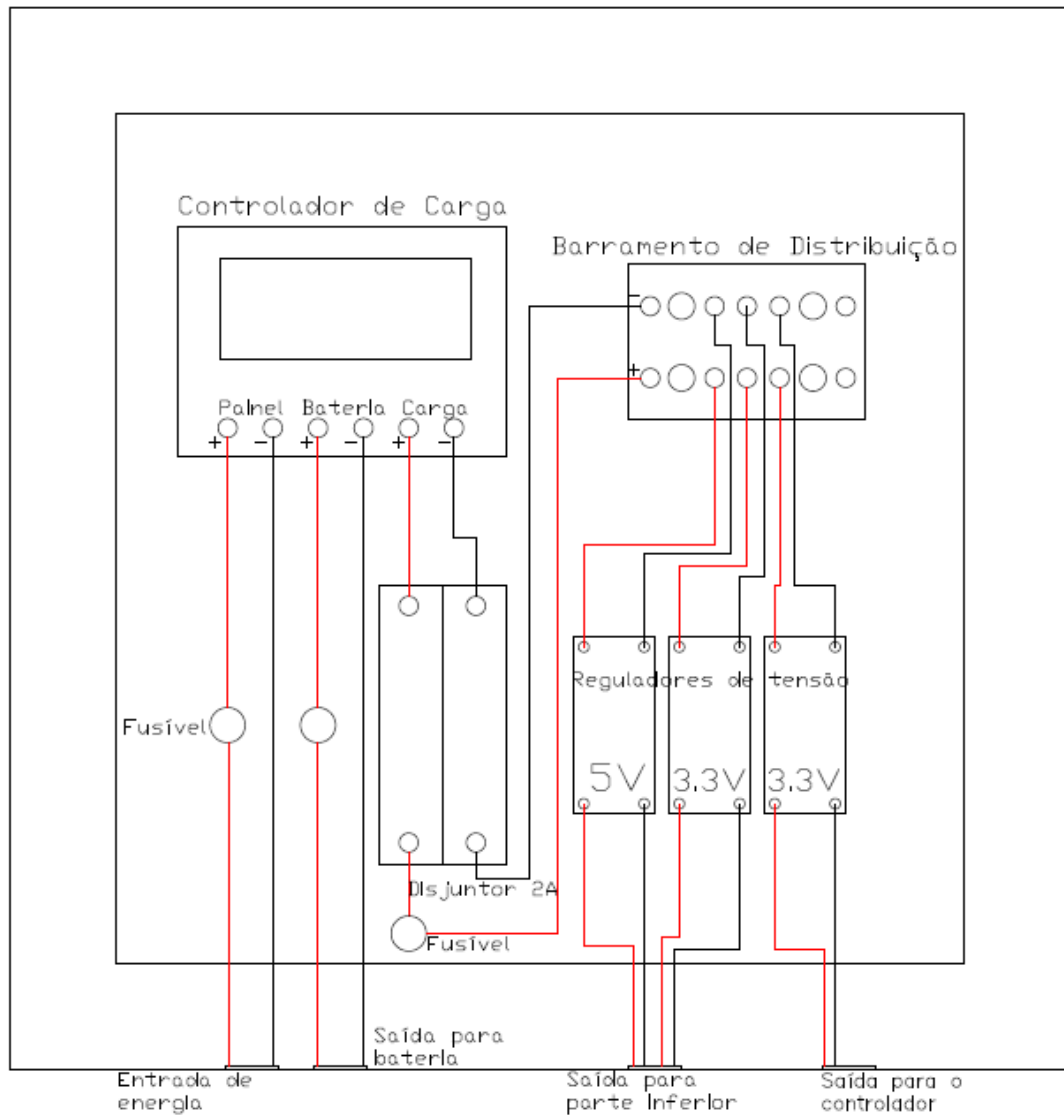


Figura 25 – Esquemático do quadro de proteção. Fonte:Do Autor

O quadro foi projetado de modo a proteger o controlador de carga, deste modo há um fusível entre os painéis solares e o controlador e um entre a bateria e o controlador. Além disso, haverá um disjuntor entre o controlador de carga e o barramento de distribuição para proteger os dispositivos eletrônicos e servir de chave de secção para desenergizar os componentes e permitir sua manutenção em segurança.

Para o dimensionamento dos dispositivos de proteção foi levado em consideração a corrente máxima que poderá fluir por cada circuito e a corrente máxima do controlador de modo a garantir sua proteção. Ainda, utilizou-se um coeficiente de segurança de 25 % sobre o valor máximo de corrente conforme exposto como parâmetro de segurança no ponto de controle 1.

A corrente máxima que pode fluir no circuito entre a placa fotovoltaica e o controlador é de 1,31 A, utilizando o fator de segurança e adotando o componente comercial

mais próximo do resultado obtido foi adotado um fusível de 2A. Este fusível estará conectado ao circuito através de um porta fusível 5x20 AS-06 de modo a garantir melhor conexão e facilitar a substituição do fusível em caso de falha.

Para o circuito entre a bateria e o controlador também foi adotado um fusível de 2A conectado ao circuito através de um porta fusível de 5x20 AS-60. Esse valor foi escolhido de modo a padronizar os fusíveis de proteção e evitar erros futuros de utilização, além de evitar que a corrente que passe pelo controlador de carga seja muito alta e venha causar danos. Dos componentes do sistema, as baterias são as únicas capazes de gerar correntes altas o suficiente para queimar o controlador de carga, assim, ao utilizar esse fusível em um nível de corrente mais baixa garantiremos a proteção do controlador.

Para proteção dos componentes eletrônicos será usado uma combinação de disjuntor em série com fusível. Esta estrutura será usada, pois a corrente total que flui para os sensores é muito baixa para um disjuntor conseguir atuar como dispositivo de proteção. Assim, o disjuntor funcionará como uma chave de seccionamento desenergizando os componentes e permitindo sua manutenção segura enquanto que o fusível funcionará como dispositivo de proteção evitando que sobrecorrentes queimem os componentes.

Para a escolha destes componentes, foi considerada a corrente total dos componentes eletrônicos de 0,54 A, assim como, um coeficiente de segurança de 1,25. Deste modo o modelo comercial de fusível que melhor atende a aplicação é um fusível de 0,7 A. Em seguida, pesquisou-se modelos de disjuntores para serem usados e optou-se pela utilização de um disjuntor bipolar de 2 A curva C.

Foi escolhido utilizar um disjuntor no lugar da chave seccionadora pela disponibilidade do componente e por seu custo. Durante as pesquisas realizadas, foi difícil encontrar chaves seccionadoras de 2 A, sendo estas projetadas para correntes maiores e consequentemente tendo um maior custo que o disjuntor escolhido (o valor médio da chave encontrada foi cerca de duas vezes mais alto que o do disjuntor). Por fim, o disjuntor apresenta a vantagem de evitar a formação de arcos elétricos durante sua abertura o que é mais uma vantagem em sua utilização.

Após os dispositivos de proteção, o controlador de carga se liga ao quadro de distribuição energizando 6 barramentos distintos que podem ser utilizados para alimentar as cargas. No caso do projeto, apenas quatro deles serão utilizados, sendo os demais deixados em *stand-by* e disponíveis para mudanças futuras no projeto.

O controlador de carga fornece energia em cerca 12 V, que é a tensão nominal da bateria, porém os componentes eletrônicos não podem ser alimentados neste nível de tensão. Desta forma, há um estágio de reguladores de tensão na saída do barramento de distribuição visando abaixar o nível de tensão e permitir a alimentação das cargas.

Os reguladores escolhidos para o projeto serão módulos reguladores buck LM2596

com dispositivos semi-condutores chaveados. Estes módulos apresentam eficiências de conversão superiores aos antigos modelos lineares, além de serem mais robustos e aceitarem uma ampla gama de tensões de entrada produzindo saídas específicas de acordo com a definição de seu *duty-cycle*.

Ainda, foi consultado o datasheet do módulo de modo a obter as curvas de eficiência de conversão de energia e a partir delas foi encontrado a porcentagem de perdas expostas na seção de perdas no sistema.

As cargas foram subdivididas em três subconjuntos de acordo com seu posicionamento físico na estrutura e com seu nível de tensão. Sendo assim, foram divididas em componentes superiores, inferiores e centrais de modo que escolheu-se usar três reguladores de tensão sendo um para cada subgrupo. Este arranjo aumenta a robustez do sistema, pois se um regulador parar de funcionar os demais continuarão e reduz a perda de energia em conexões e derivações por tornar os circuitos mais específicos e diretos.

Por fim, todos os componentes ficarão localizados dentro de um quadro de comando IP65 localizado na estrutura. Este quadro permitirá a proteção dos componentes de intemperies e sua organização já que conta com uma placa de montagem para fixação dos componentes e ordenação da fiação. Este mesmo quadro será utilizado como estrutura para o atuador apresentado posteriormente.

Os componentes serão presos a placa de montagem através de trilhos Din 35 mm ou diretamente na placa por meio de parafusos Inox 304 (A2) phillips M2 e 5 mm de comprimento quando possuírem suporte próprio. (Caso do controlador de carga e reguladores). No caso do componente não apresentar encaixe em trilho din ou suporte para parafuso, será usado braçadeiras de fixação para prender os componentes.

### 3.1.7 Dimensionamento do Cabeamento

O dimensionamento do cabeamento foi dividido em 6 trechos distintos. Conforme exposto na seção de perdas haverá a divisão entre circuito de alimentação e circuito de distribuição para o cálculo da queda de tensão.

O dimensionamento de condutores pode ser realizado de diversos modos, como por exemplo, o método de corrente admissível exposto na ABNT NBR 5410 e o método da queda de tensão admissível no condutor. Neste projeto, como as correntes são relativamente baixas quando comparadas as aplicações da NBR 5410, será empregado o método da queda de tensão admissível que pode ser calculada pela equação:

$$S = \rho \cdot \frac{\Delta S \cdot I}{\Delta V} \quad (3.14)$$

Sendo  $\rho$  a resistividade do fio sendo adotada como  $0,0179 \Omega mm^2/m$  para o caso

de condutores de cobre,  $\Delta S$  a distância do condutor,  $I$  a corrente que flui pelo condutor e  $\Delta V$  a queda de tensão que se deseja que no caso do projeto foi estipulada em 0,5%.

A tabela 18 apresenta a queda de tensão encontrada para cada seção analisada, assim como, a bitola comercial que será utilizada em cada trecho. Para definição da bitola comercial levou-se em conta um fator de segurança de 1,25, além de critérios econômicos e facilidade na aquisição do material.

Tabela 18 – Queda de tensão por trecho de cabeamento

Cabeamentos	Distância	Corrente	Queda de tensão planejada	Bitola do condutor	Bitola do condutor comercial ( $mm^2$ )	Queda de tensão real (%)
Placa ao quadro	1	1,31	1,00%	2,34	2,5	0,94%
Quadro a bateria	0,6	2,00	1,00%	2,15	2,5	0,86%
Quadro ao micro controlador	0,4	0,35	0,50%	0,50	1	0,25%
Quadro/sensores superiores 5V	0,7	0,02	0,50%	0,04	0,5	0,04%
Quadro/sensores superiores 3,3V	0,7	0,21	0,50%	0,52	1	0,26%
Quadro/sensores inferiores 5V	1	0,08	0,50%	0,28	0,5	0,28%

Assim, todos os trechos se enquadram dentro dos limites de queda de tensão estipulados na seção de perdas.

Para evitar maiores dissipações por efeito joule nas conexões, serão usados conectores de ementada em todas as bifurcações de circuitos, além de conectores adequados de modo a permitir um maior acoplamento com os sensores.

Por fim vale ressaltar que há quatro circuitos de distribuição na tabela e apenas 3 no diagrama unifilar, isso ocorre por que o circuito para os sensores de 5V se subdivide na metade alimentando tanto os sensores da régua quanto os superiores.

Além do cabeamento de força foi dimensionado o cabeamento de comando do circuito que visa conectar as saídas de sinal dos sensores ao microcontrolador. A tabela 19 apresenta a dimensão dos condutores e a quantidade por sensor.

Tabela 19 – Quantidade de condutores de comando por sensor

Cabeamento de comando	Quantidade de condutores	bitola comercial ( $mm^2$ )
Sensor de umidade do solo	1	0,14
Sensor de temperatura do solo	2	0,14
Sensor de umidade e temperatura do ar	2	0,14
Anemômetro	4	0,14
Pluviômetro	2	0,14
wattímetro	2	0,14
Transceptor	5	0,14

### 3.1.8 Esquemático do sistema

Agora, de posse de todos os componentes dimensionados no decorrer do capítulo é possível completar o esquemático apresentado na figura 21. A figura 26 apresenta o diagrama unifilar do sistema.

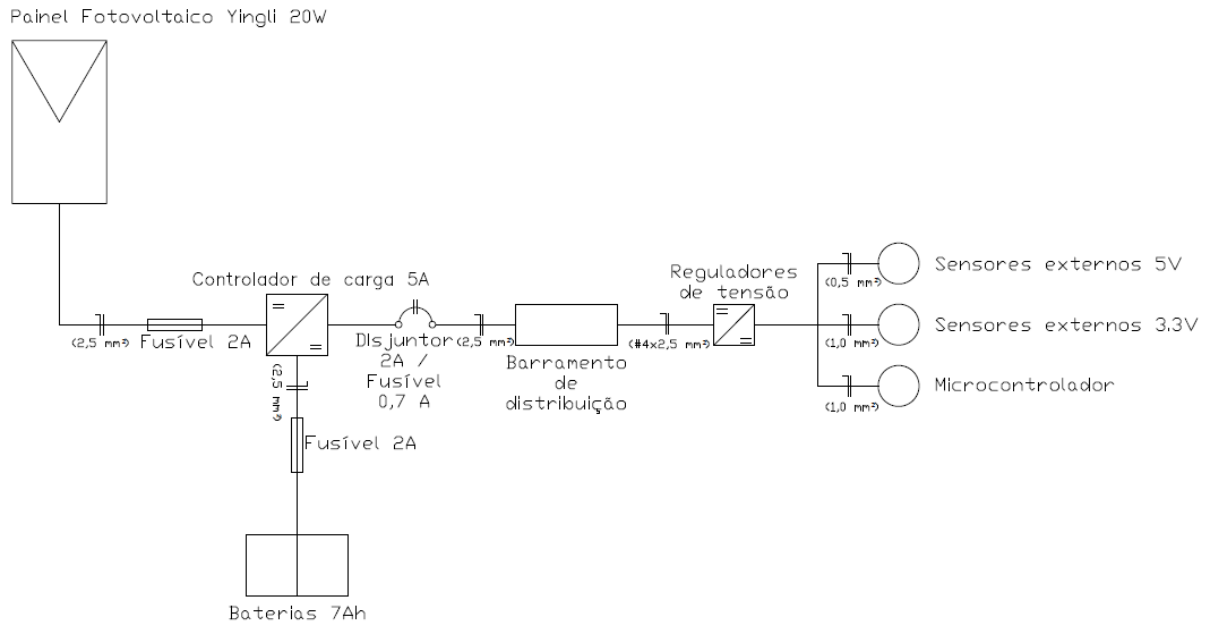


Figura 26 – Diagrama Unifilar. Fonte:Do Autor

Este diagrama será a base de construção de todo o sistema fotovoltaico e todos os demais diagramas apresentados ou utilizados serão derivações ou detalhamentos dele.

### 3.1.9 Simulações

O PVsyst foi desenvolvido pela Universidade de Genebra (Suíça) e engloba diversos níveis de complexidade permitindo ao usuário trabalhar desde um estágio inicial de representação, com o conceito pré-projeto até um detalhado sistema de simulação de forma completa, podendo este ser simulado para situação de conexão ou não à rede elétrica e também para sistemas fotovoltaicos destinados ao bombeamento de água. Para o projeto condições o software será utilizado para a simulação do sistema fotovoltaico autônomo. (MELO, 2018)

Para iniciarmos a simulação do sistema, precisamos indicar ao programa a localização onde será instalado o sistema fotovoltaico. Conforme mencionado, o estudo de caso para o projeto considerará uma plantação no DF, portanto o local designado será Brasília-DF. Com a escolha do local também é atrelado a determinação da base de dados de irradiância que para o PVsyst usará, no caso do projeto foi usado o Meteonorm 7.1 para a obtenção dos dados meteorológicos. A figura abaixo mostra os valores de irradiação global obtidos da base de dados adotada pelo PVsyst e vale ressaltar que os valores utilizados são diferentes dos valores utilizados no cálculo teórico já que as bases de dados apresentam resultados ligeiramente diferentes.

	<b>Global Irrad.</b> kWh/m <sup>2</sup> .day	<b>Diffuse</b> kWh/m <sup>2</sup> .day	<b>Temper.</b> °C	<b>Wind Vel.</b> m/s
January	5.35	2.45	22.9	2.30
February	5.83	2.40	22.7	2.01
March	5.50	2.55	22.4	2.00
April	5.16	2.09	22.1	2.00
May	4.84	1.71	20.8	1.81
June	5.01	1.25	19.3	1.90
July	5.30	1.17	19.6	2.00
August	5.91	1.34	21.1	2.29
September	6.09	1.97	22.7	2.40
October	5.28	2.50	23.8	2.30
November	4.78	2.41	22.2	2.30
December	4.96	2.74	22.5	2.30
<b>Year</b>	<b>5.33</b>	<b>2.05</b>	<b>21.8</b>	<b>2.1</b>

Figura 27 – Valores da radiação solar mensal segundo o PVsyst. Fonte:Do Autor

Nas configurações para a simulação pode-se alterar os parâmetros Albedo, que é definido como um coeficiente da fração da irradiação incidente global refletida no solo em frente a um plano inclinado. Este efeito acontece durante o cálculo da transposição da irradiação horizontal em um plano inclinado, logo o albedo é nulo no plano horizontal e aumenta conforme a elevação da inclinação. O PVsyst apresenta uma tabela de valores usuais para o albedo.

O valor usado será o de 0,20, valor padrão adotado pelo PVsyst. Na prática, exceto para planos verticais, esse valor não assume grande importância pois o componente albedo é relativamente fraco na irradiação global incidente.

No programa foi adicionado a orientação, inclinação e o tipo de estrutura de fixação do módulo fotovoltaico. O módulo fotovoltaico será instalado na estação em um plano inclinado fixo, com uma inclinação de 16°C e orientado para o norte geográfico. A figura 28 detalha o que foi citado.



Tabela 20 – Valores usuais para Albedo

Valores usuais para o Albedo	
Ambientes Urbanos	0,14-0,22
Gramma	0,15-0,22
Gramma molhada	0,26
Neve	0,82
Neve derretida	0,55-0,75
Asfalto Seco	0,09-0,15
Asfalto molhado	0,18
Concreto	0,25-0,35
Telha cerâmica	0,33
Alumínio	0,85
Aço Galvanizado Novo	0,35
Aço Galvanizado Antigo e sujo	0,08

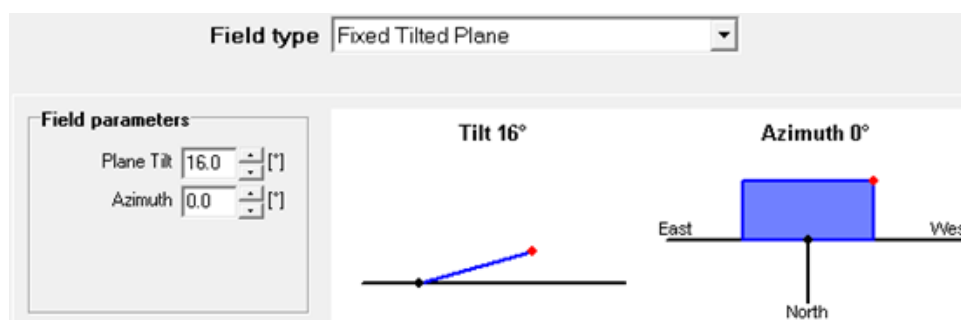


Figura 28 – Inclinação, orientação e tipo de fixação do módulo FV. Fonte:Do Autor

Com base nesses parâmetros inseridos, o programa nos informa que as perdas devido a orientação ótima são de 0,0 %, indicando que a orientação e inclinação do módulo está adequada, e o fator de transposição (FT) é de 1,06. Este indicador é definido como a razão entre a irradiação incidente no plano do painel e a irradiação no plano horizontal, mostrando se há ganho ou perda na produção de energia ao inclinar o painel fotovoltaico.

Ao PVsyst também foi inserido o consumo das cargas diário dos equipamentos presentes na estação, conforme o levantamento de carga feito anteriormente. A Figura 29 mostra o consumo diário das cargas da estação e o seu consumo mensal.

Number	Appliance	Power	Daily use	Hourly distrib	Daily energy
0	Lamps (LED or fluo)	0 W/lamp	0.0 h/day		0 Wh
0	TV / PC / Mobile	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
0	Domestic appliances	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
0	Fridge / Deep-freeze	kWh/day	24.0 h/day		0 Wh
0	Dish- & Cloth-washers	0.0 W aver.	2.0 h/day		0 Wh
1	Carga da estação	2 W/app.	24.0 h/day	OK	44 Wh
0	Other uses	0 W/app.	0.0 h/day		0 Wh
Stand-by consumers		0 W tot	24 h/day		0 Wh
<b>Total daily energy</b>					<b>44 Wh/day</b>
<b>Total monthly energy</b>					<b>1.3 kWh/month</b>

Figura 29 – Consumo diário das cargas da estação inseridos no PVsyst. Fonte:Do Autor

No PVsyst também foi indicado os componentes do sistema fotovoltaico autônomo, com base no dimensionamento teórico já realizado. O PVsyst possui uma base de dados com vários componentes de sistemas fotovoltaicos, como módulos, controladores, baterias e dentre outros. Esse banco de dados possui um enfoque maior em componentes para sistemas fotovoltaicos *On-grid*, devido ao grande volume de painéis FV de potências nominais elevadas que são direcionados a sistemas conectados a rede.

Por conta disso, os modelos escolhidos de módulo fotovoltaico, bateria e controlador de carga para o sistema não estão presentes no banco de dados do PVsyst. Logo, para esses três componentes, optou-se em pegar três modelos semelhantes existentes no PVsyst e alterar alguns de seus parâmetros e características nominais, visando torna-los mais próximos dos modelos escolhidos para o projeto. Esses modelos com as características modificadas foram salvos no próprio banco de dados do programa para serem usados na simulação. As figuras a seguir ilustram como os componentes são selecionados no PVsyst.

Specify the Battery set			
Sort Batteries by: <input checked="" type="radio"/> voltage <input type="radio"/> capacity <input type="radio"/> manufacturer			
Sonnenschein	12V 14Ah	Pb Sealed AGM	Solar S12/17 G5 (mod)
Lead-acid			
1	<input checked="" type="checkbox"/> Batterys in serie	Number of batterys	1
1	<input checked="" type="checkbox"/> Batterys in parallel	Number of elements	6
Battery pack voltage			12 V
Global capacity			14 Ah
Stored energy (80% DOD)			0.1 kWh
Total weight			3 kg
Nb. cycles at 50% DOD			1475
Total stored energy during the battery life			138 kWh

Figura 30 – Selecionando o modelo de bateria no PVsyst. Fonte:Do Autor

The screenshot shows the 'Select the PV module' and 'Select the control mode and the controller' windows in PVsyst. In the first window, 'Available Now' is selected, 'Sort modules by' is set to 'power', and 'All Manufacturers' is chosen. The selected module is '20 Wp 14V Si-poly JS 20' by 'Yingli Solar'. Sizing voltages are shown as  $V_{mpp}(60^{\circ}C) = 14.1\text{ V}$  and  $V_{oc}(-10^{\circ}C) = 24.0\text{ V}$ . In the second window, 'Universal controller' is selected, and 'Steca' is chosen. The 'Direct coupling of PV array to battery' option is selected. The 'Operating mode' is set to 'Direct coupling'. The 'Series' is '12V 5A 5A PR 0505 (modificado)'. The 'Number of controllers' is '1'.

Figura 31 – Selecionando o modelo do módulo fotovoltaico e controlador no PVsyst. Fonte:Do Autor

Com a determinação dos parâmetros descritos anteriormente, a simulação é executada no PVsyst e os principais resultados são apresentados. A Figura 32 mostra alguns resultados mensais obtidos da simulação:

**Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 20 Wp**

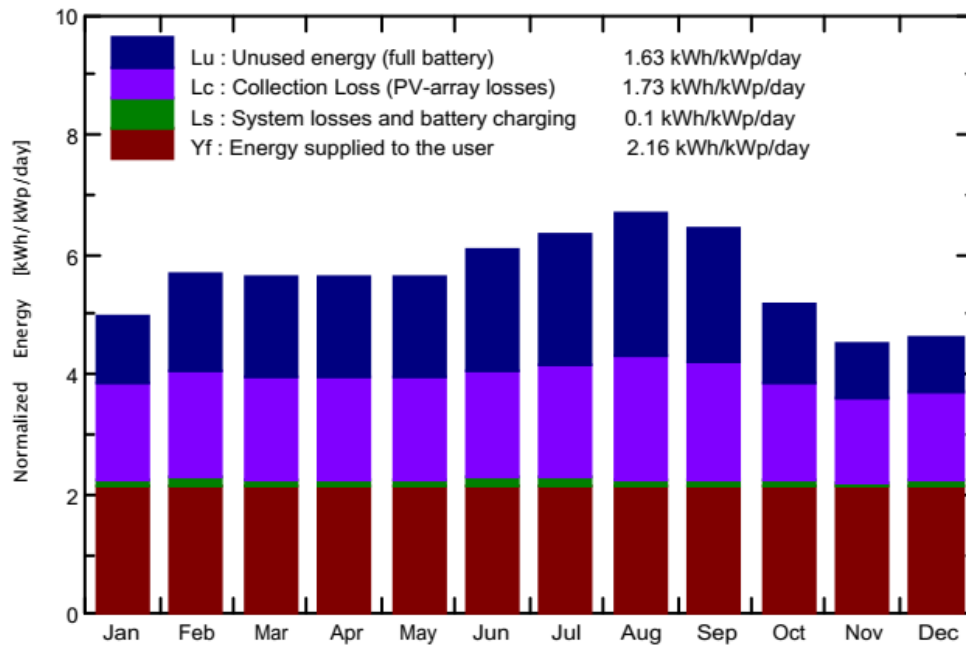


Figura 32 – Produção normalizada pela potência nominal. Fonte:Do Autor

Onde  $Y_f$  é o valor de energia produzido fornecido a carga, cujo o valor médio é de  $2,16\text{ kWh/kWp}$  por dia. Já  $L_s$  representa as perdas do sistema e de carga da bateria, e seu valor médio diário é de  $0,10\text{ kWh/kWp}$  por dia.  $L_c$  é o valor que descreve as perdas de coleta do módulo, e é a diferença entre a energia incidente no plano do painel e a energia produzida pelo módulo em seus terminais, onde o seu valor médio é de  $1,73\text{ kWh/kWp}$  por dia. E a variável  $L_u$  corresponde a energia não utilizada, que é a energia produzida e disponível nos terminais do módulo, mas que não pode ser usado por conta de o sistema

está saturado, com a bateria carregada. O valor médio de  $L_u$  é de  $1,63kWh/kWp$  por dia.

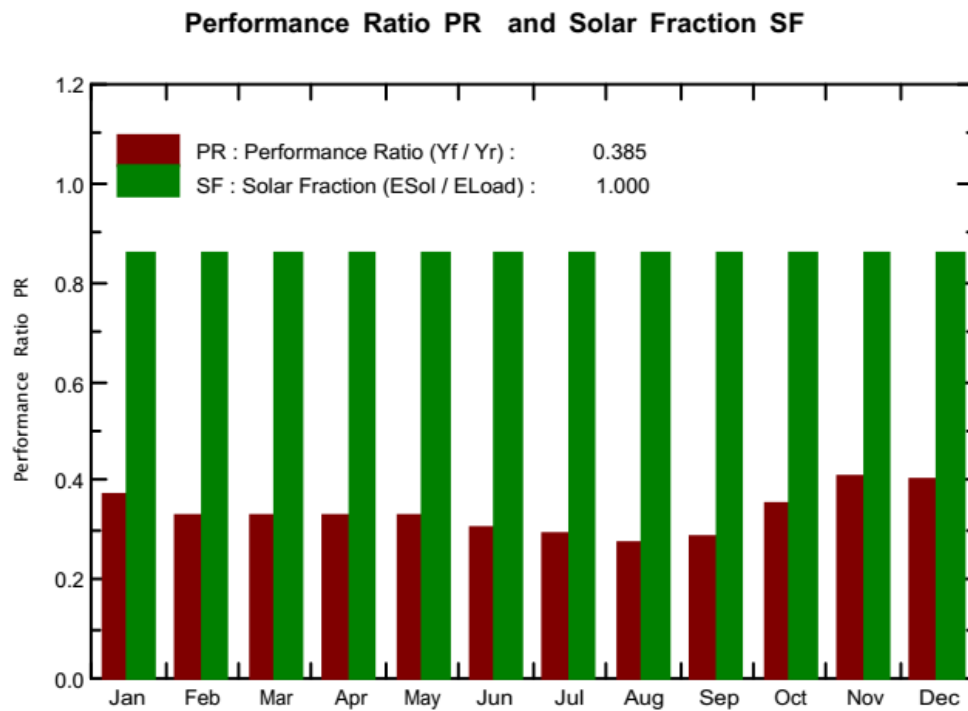


Figura 33 – Taxa de desempenho e fração solar. Fonte:Do Autor

A fração da energia solar (SF) é a razão entre a energia fornecida a carga pela energia demandada pela carga. O valor médio para a fração solar é 1,0, indicando que o sistema autônomo simulado consegue atender a carga exigida pela estação durante os meses. Além disso o gráfico da figura ?? mostra a taxa de desempenho (PR) do sistema, que é a eficiência global do sistema em relação a potência nominal instalada e a energia incidente, e apresenta variações durante os meses cujo o valor médio é de 0,385 ou 38,5%. Idealmente a taxa de desempenho tinha que apresentar um valor médio maior, superior a 0,70, mas devido o valor obtido para a fração solar, as perdas no controlador de carga e as perdas nos reguladores de tensão fazem com que a taxa de desempenho do sistema seja baixa.

As informações obtidas das duas últimas figuras podem ser concentradas e resumidas em uma única Tabela 21

Tabela 21 – Principais resultados da simulação. Fonte do Autor

Principais resultados da simulação				
Produção do sistema	Energia disponível	28,37 kWh/ano	Produção específica	1418 kWh/kWp/ano
	Energia utilizada	15,77 kWh/ano	Energia não utilizada	11,89 kWh/ano
	Taxa de desempenho	38,49%	Fração solar (SF)	100%

A Tabela 22 também mostra os balanços e resultados importantes no levantamento de um ano.

Tabela 22 – Balanços e resultados principais. Fonte do Autor

	GlobHorkWh/m <sup>2</sup>	GlobEffkWh/m <sup>2</sup>	EAvailkWh	EUnusedkWh	EMisskWh	EUserkWh	ELoadkWh	SolFrac
Jan	165,8	149,2	2,114	0,709	0	1,339	1,339	1
Fev	163,3	153,5	2,179	0,884	0	1,21	1,21	1
Mar	170,4	168,7	2,409	1,01	0	1,339	1,339	1
Abr	154,8	164	2,34	0,994	0	1,296	1,296	1
Mai	150	169,1	2,431	1,033	0	1,339	1,339	1
Jun	150,3	177,4	2,563	1,199	0	1,296	1,296	1
Jul	164,2	191,8	2,753	1,339	0	1,339	1,339	1
Ago	183,1	202,8	2,894	1,486	0	1,339	1,339	1
Set	182,8	188,2	2,676	1,329	0	1,296	1,296	1
Out	163,7	155,6	2,207	0,817	0	1,339	1,339	1
Nov	143,5	129,9	1,847	0,531	0	1,296	1,296	1
Dez	153,8	137,2	1,957	0,563	0	1,339	1,339	1
Ano	1945,7	1987,3	28,37	11,895	0	15,768	15,768	1

Onde:  $Glob_{Hor}$  é a irradiação global no plano horizontal,  $Glob_{Eff}$  é a irradiação global efetiva nos coletores depois das perdas ópticas, devido à por exemplo sombreamentos próximos e distantes, a sujeiras no painel, e a efeitos de incidência que causam diminuição da irradiância na cobertura de vidro das células fotovoltaicas;  $E_{Avail}$  é a energia solar disponível, que é a energia produzida pelo painel mais a energia não utilizada no sistema;  $E_{Unused}$  é a energia não utilizada quando a bateria está cheia;  $E_{Miss}$  é a diferença entre  $E_{Load}$  e  $E_{User}$  ( $E_{Load} - E_{User}$ ), sendo  $E_{Load}$  a energia requerida pela carga e  $E_{User}$  a energia fornecida pelo sistema a carga; e SolFrac a fração solar.

Da tabela anterior podemos observar que a quantidade de energia não utilizada pelo sistema, de cerca de 11,895 kWh, é considerável e se deve a escolha da bateria, pois visando uma economia nos custos optou-se por escolher uma bateria que atende-se bem a demanda da carga, e se negligencio a quantidade de energia que poderia ainda ser aproveitada e armazenada pelo sistema caso fosse escolha uma bateria com uma capacidade de carga maior.

Da tabela nota-se também que a quantidade anual de energia da irradiação  $Glob_{Eff}$  é maior do que a energia da irradiação  $Glob_{Hor}$ , isso mostra que para o ângulo de inclinação e orientação escolhidos para o módulo, o aproveitamento da irradiação é melhor, pois para determinadas épocas do ano a irradiação global aproveitada no plano inclinado do módulo é maior do que no plano horizontal, no qual não é recomendado a instalação do módulo.

### 3.1.10 Modo de construção

Está seção destina-se a detalhar algumas partes do processo de construção do subsistema de alimentação *off-Grid* da estação de medição. O projeto seguirá os esquemáticos e diagramas apresentados na seção de dimensionamento, assim como, os modos de construção citados de modo que esta seção apresentará os detalhes finais do processo de construção ainda não abordados no decorrer do capítulo.

### 3.1.10.1 Ocupação dos eletrodutos

Todo o cabeamento que interconectará os componentes do sistema utilizará os perfis estruturais como eletrodutos. Como os perfis estruturais conectam todas as partes da estrutura e são ocos por dentro (espaço interno de 28,6 x 28,6 mm) foi escolhido passar os fios em seu interior, protegendo o cabeamento e reduzindo os custos com aquisição de eletrodutos. As bordas do furo de entrada e saída dos fios no perfil serão revestidas por polímero de modo a evitar laterais afiadas que possam danificar o isolamento do condutor. Por fim, será utilizado braçadeiras para evitar a movimentação dos cabos dentro dos perfis.

O cabeamento de força sairá em apenas um circuito do quadro e só se ramificará próximo aos sensores que for alimentar de modo a reduzir o número de condutores em cada seção do perfil.

Para confirmar que será possível passar todos os condutores com segurança pelo perfil foi calculado a ocupação de cada seção. A figura 34 apresenta as respectivas seções de eletroduto analisadas e a tabela 23 apresenta o número de condutores por trecho do circuito e a ocupação do trecho.

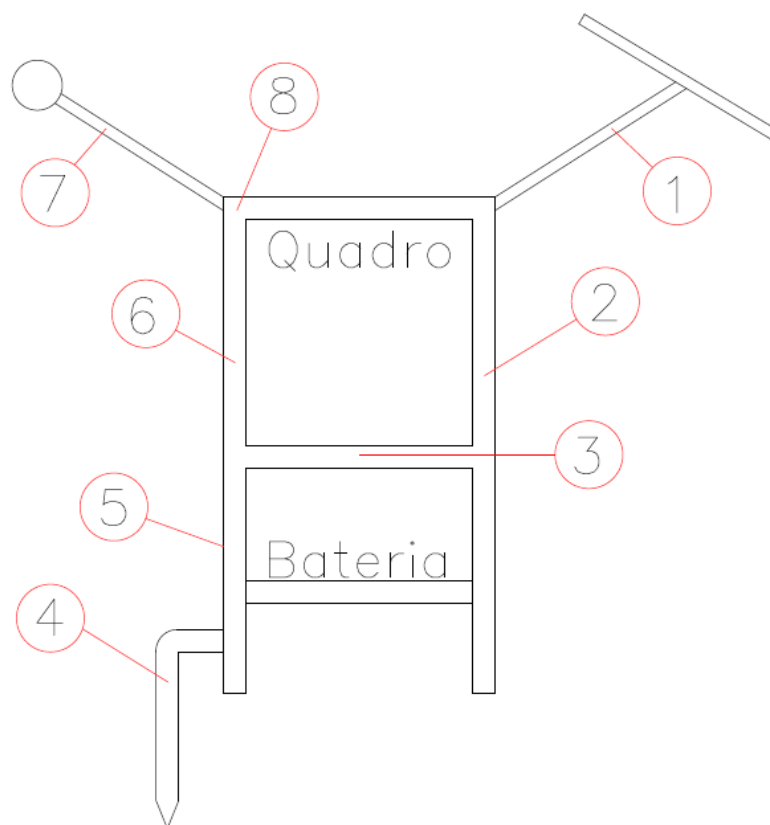


Figura 34 – Esquemático de seções de eletroduto. Fonte:Do Autor

Segundo a NBR 5410 a ocupação máxima em eletrodutos com três ou mais condutores é de 40% espaço total do eletroduto. Assim, todos os trechos apresentam ocupação

Tabela 23 – Taxa de ocupação das seções do perfil

Trecho	Qntd. cabos de força	Bitola do condutor ( $mm^2$ )	Área real do condutor ( $mm^2$ )	Qntd. cabos de comando	Bitola do condutor ( $mm^2$ )	Área real do condutor ( $mm^2$ )	Espaço total	Ocupação
1	2	2,5	9,68	0	0	0	23,51	2,87%
2	2	2,5	9,68	0	0	0	23,51	2,87%
3	4/4/4	0,5/1,0/2,5	2,19/3,2/9,68	20	0,14	0,4049	83,05	10,15%
4	6	0,5	2,19	5	0,14	0,4049	18,42	14,54%
5	2	0,5	2,19	5	0,14	0,4049	7,78	0,95%
6	2/2	0,5/1,0	2,19/3,2	15	0,14	0,4049	21,31	2,61%
7	2	1,0	2,19	4	0,14	0,4049	7,26	0,89%
8	2/6	0,5/1,0	2,19/3,2	11	0,14	0,4049	28,03	3,43%

inferior ao limite estabelecido na norma o que confirma que podem ser usados com segurança.

Para realização dos cálculos foram usados os valores encontrados no catálogo técnico dos fabricantes dos componenetes sendo a Megatron usada para os condutores de força e a marca tiaflex usada para os condutores de comando.

### 3.1.10.2 Emendas de condutores

Todas as ramificações de circuitos serão realizadas por meio de conectores de emenda tal qual apresentados na figura 35.



Figura 35 – Conector de emendas

Os circuitos de força sairão do quadro de distribuição em apenas dois cabos sendo um positivo e um negativo responsável por alimentar as cargas mostradas no diagrama unifilar. Ao chegar próximo aos sensores a serem alimentados as conexões criarão ramificações dos fios que se destinarão a cada sensor específico.

### 3.1.11 Protocolo de Teste

O processo de testes do subsistema de alimentação *off-Grid* consistirá na medição de seus parâmetros de operação de modo a verificar se o sistema está atendendo aos

parâmetros propostos.

Para realização dos testes serão utilizados dois multímetros e uma resistência de  $25\ \Omega$  (simula aproximadamente o comportamento dos componentes a serem alimentados) para medir as condições de operação do sistema. Deste modo serão realizados 4 testes.

1. Teste de geração: Será medido a potência gerada pelo painel no decorrer do dia verificando se a geração de energia está acontecendo nos níveis indicados pelo fabricante. Esse teste terá o objetivo de verificar se a geração está acontecendo conforme previsto em projeto.
2. Teste da bateria: Com a geração desconectada, será medida a potência disponibilizada ao circuito pela bateria de modo a avaliar se o sistema de baterias está funcionando e através do monitoramento da queda de tensão será estimado a autonomia da bateria comparando com o projeto.
3. Teste de operação continua: O sistema será deixado ao sol por um dia no qual funcionará ininterruptamente de modo que a geração, o nível de bateria e a potência dissipada na resistência de carga possam ser medidas e gerar dados de funcionamento que possam ser comparados com as simulações realizadas para a situação.
4. Teste dos reguladores de tensão: Será medida a tensão e a corrente na entrada e na saída do regulador de tensão de modo a verificar se a tensão está no nível certo de alimentação e para medir a eficiência real no caso do projeto para este componente.

## 3.2 Atuador

Um dos requisitos do projeto é realizar o acionamento do sistema de irrigação de forma automática caso o usuário decida por este modo. Assim, foi necessário projetar um módulo de acionamento remoto que atue no quadro de comando do sistema de irrigação e esteja em paralelo com o sistema atual de acionamento.

Foi analisada a viabilidade de realizar o acionamento das bombas através de um módulo comercial de acionamento remoto. Porém estes equipamentos possuem valores acima do orçamento de projeto, além de utilizarem módulos e protocolos prontos de comunicação dificultando a integração com o resto do sistema. Além do fato de que funcionam como uma caixa preta recebendo um input e tendo como saída um output fixo, de modo que não se entende bem como ocorre seu funcionamento interno.

Assim, optou-se pela construção de um módulo de acionamento próprio que ficasse localizado próximo ao quadro de acionamento da irrigação e fizesse parte da rede mesh, acionando ou desligando a irrigação conforme a necessidade.



### 3.2.1 Esquemático do módulo

O atuador será construído dentro de um quadro de comando tal qual o utilizado no projeto da estação. Será utilizado o nível de proteção IP65 nele, pois o sistema pode ser acoplado a diversos tipo de fazenda, logo é preciso garantir que os componentes internos estejam protegidos independente da estrutura física de onde seja instalado.

Assim, o sistema do atuador seguirá o esquemático apresentado na figura 36.

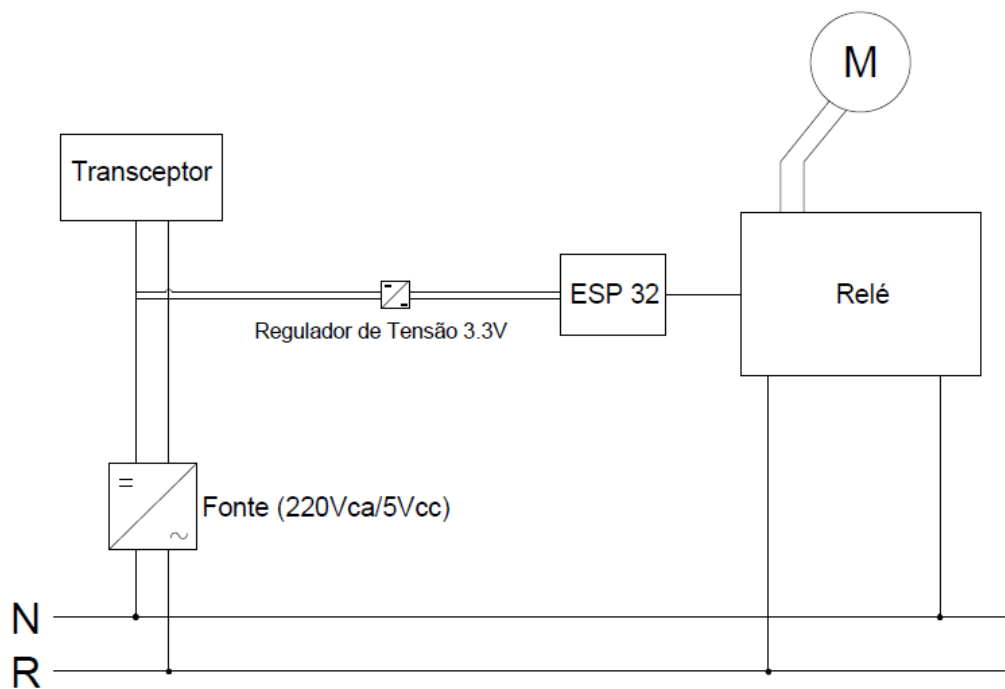


Figura 36 – Esquemático do atuador. Fonte:Do Autor

A fonte apresentada no esquemático será projetada e construída pela divisão de energia do projeto e deverá realizar o abaixamento da tensão de 220 V para 5 V, além de retificar o sinal convertendo-o de corrente alternada para corrente contínua. Outros fatores como ripple de funcionamento e parâmetros de projeto serão apresentados na seção seguinte.

O transceptor e o microcontrolador utilizados serão iguais aos presentes na estação de modo a atender os requisitos expostos na seção de eletrônica.

Além disso, o regulador de tensão utilizado será o módulo regulador buck LM2596 e será responsável por abaixar a tensão de 5 V da fonte para 3,3 V de modo a alimentar o microcontrolador. Assim, haverá uma padronização dos equipamentos utilizados na estação e no atuador facilitando a aquisição de materiais e posteriormente o escalonamento da produção.

Ainda, o microcontrolador realiza o acionamento do módulo relé ligando ou desligando a irrigação conforme o necessário. Como exposto no ponto de controle 1, o sistema deve ser alterado de acordo com as características do sistema de irrigação que se deseja partir ajustando os componentes para suportar as correntes e regimes de operação específicos da aplicação.

No caso do projeto, será utilizada uma bomba de poço artesiano modelo 1650 da HS para simular o sistema de irrigação, tal bomba não faz parte do projeto em si, mas será usada para demonstrar o funcionamento do sistema de acionamento a distância. Está bomba apresenta potência de 320 W e corrente nominal de 1,45 A.

Assim, o módulo relé a ser utilizado será de 220V e 10 A com alimentação de 3,3 Vcc. Este modelo apresenta uma corrente de operação superior a corrente nominal da bomba, porém é o equipamento comercial que melhor atende ao projeto e que pode ser comandado pelo microcontrolador de modo que será utilizado e promoverá o aumento da robustez do sistema.

Por fim, foi construído o diagrama unifilar do sistema de modo a guiar a construção. A figura 37 apresenta o diagrama traçado e a tabela 24 apresenta as grandezas utilizadas para o dimensionamento dos condutores.

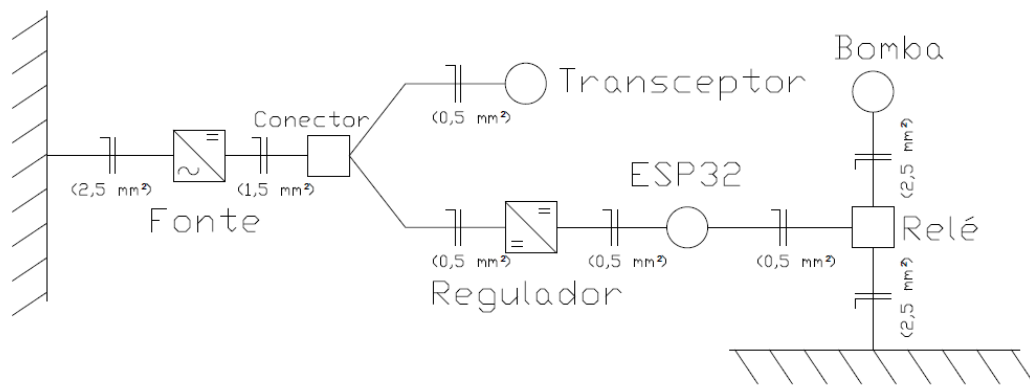


Figura 37 – Diagrama unifilar do atuador. Fonte:Do Autor

Tabela 24 – Dimensionamento dos condutores de força do atuador

Cabeamentos	Distância	Corrente	Queda de tensão planejada	Bitola do condutor	Bitola comercial (mm²)	Queda de tensão real
rede/fonte	1,5	0,35	1,00%	0,932	2,5	0,37%
fonte/conector	0,1	0,35	0,50%	0,124	1,5	0,04%
conector-transceptor	0,1	0,02	0,50%	0,006	0,5	0,01%
conector-regulador	0,1	0,33	0,15%	0,395	0,5	0,12%
regulador-esp	0,1	0,33	0,15%	0,388	0,5	0,12%
esp-relé	0,1	0,03	0,15%	0,030	0,5	0,01%
rede-relé	2	1,82	4,00%	1,627	2,5	2,604%
relé-bomba	2	1,82	4,00%	1,627	2,5	2,60%

### 3.2.2 Dimensionamento da fonte

### 3.2.3 Modo de construção

Será utilizado o mesmo modelo de quadro usado na estação para construção do módulo atuador. O quadro será responsável por abrigar todos os componentes e protegê-los de intempéries e outros dados que podem vir a sofrer. O esquemático abaixo apresenta a disposição dos componenetes na estrutura:

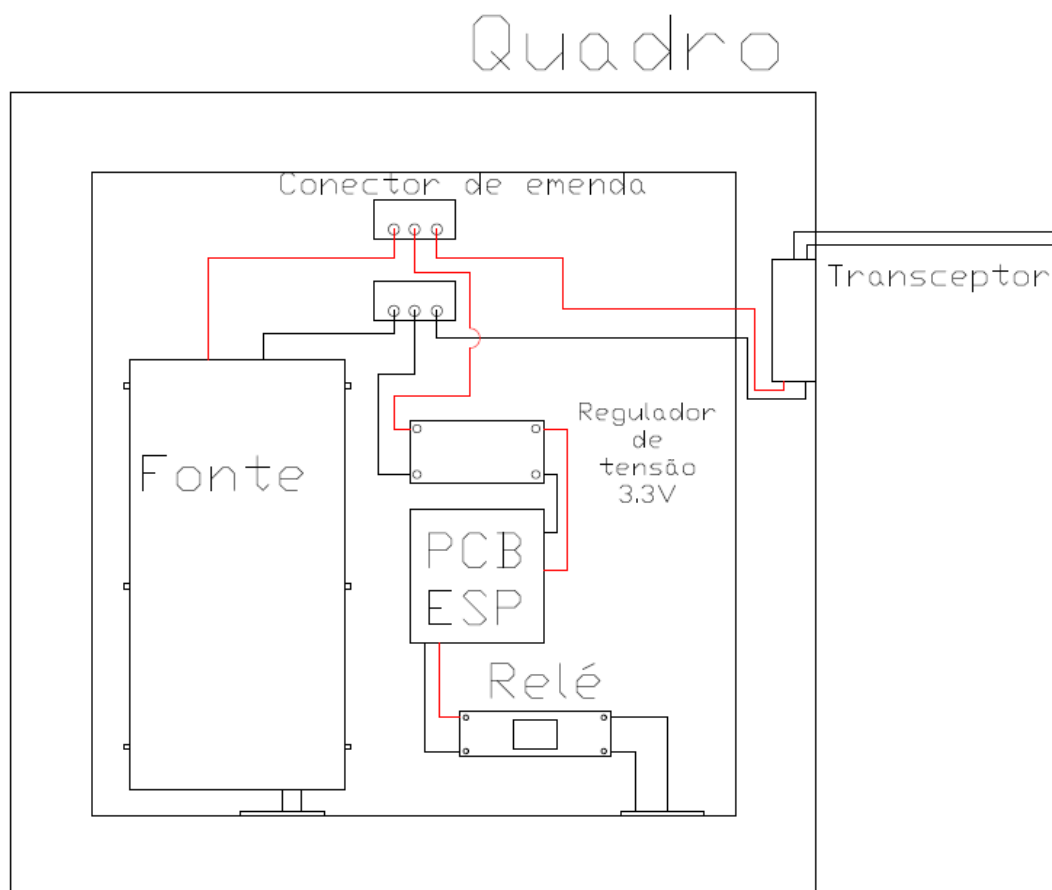


Figura 38 – Posicionamento dos componentes no quadro do atuador. Fonte:Do Autor

Para a fixação da fonte, da PCE e do módulo regulador de tensão serão utilizados parafusos Inox 304 (A2) com ranhura phillips e dimensões M2 e 5 mm de comprimento. Esta opção foi escolhida, pois os componentes já apresentam locais específicos para serem fixados.

Já os conectores de emenda e o transceptor serão fixados ao quadro por meio de braçadeiras de fixação.

Por fim, a antena do transceptor precisará ficar do lado de fora do quadro, de modo que será realizado a vedação em torno de seu furo de modo a evitar a entrada de água no quadro.

### 3.2.4 Protocolo de testes

Os testes do atuador serão realizados em parceria com a área de sistemas eletrônicos e visarão demonstrar que o módulo opera conforme o projetado. Para isso, serão usados um osciloscópio e uma lâmpada de Led para realizar os testes.

1. Teste da fonte: Antes de conectar os demais componentes ao circuito, será testado se a fonte contruída pelo grupo realmente atende aos parâmetros estipulados em seu projeto. Assim, será utilizado o osciloscópio para medir a saída da fonte e calcular os parâmetros de interesse.
2. Teste de acionamento: A lâmpada de led será ligada na saída do módulo relé como sendo a carga do sistema. Será enviado um sinal para o transceptor do atuador de modo a abrir o relé e ascender a lâmpada demonstrando o conceito por trás do acionamento do sistema de irrigação a distância.

## 3.3 Central

A central de comando será responsável por comunicar as informações medidas nas estações com a aplicação web de modo que será o único ponto do sistema com acesso obrigatório a internet.

### 3.3.1 Esquemático da central

Do ponto de vista da alimentação elétrica, a central será alimentada por uma fonte semelhante a dimensionada no capítulo do atuador seguindo o diagrama unifilar apresentado a baixo:

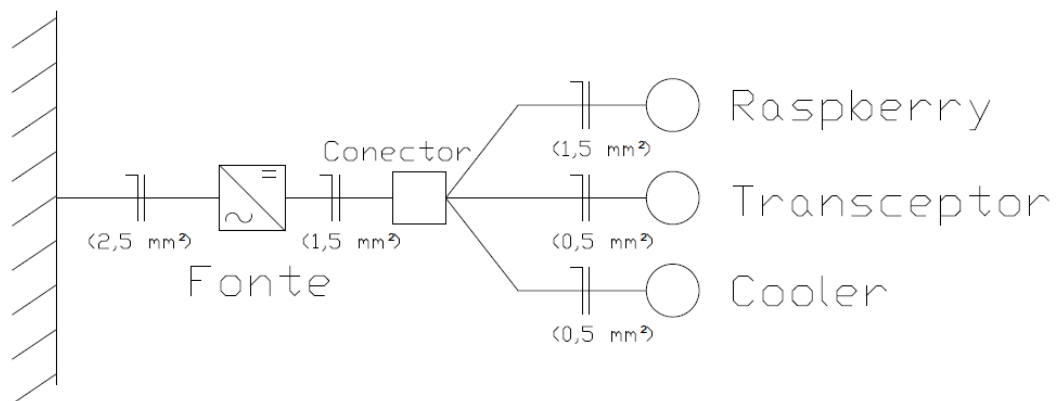


Figura 39 – Diagrama unifilar da central de comando. Fonte:Do Autor

A metodologia para dimensionar os condutores do sistema foi realizada da mesma maneira apresentada na seção de dimensionamento do cabeamento da instalação. Assim, a tabela 25 apresenta as grandezas utilizadas no dimensionamento.

Tabela 25 – Dimensionamento do cabeamento de força da central.

Cabeamentos	Distância	Corrente	Queda de tensão planejada	Bitola do condutor	Bitola comercial (mm <sup>2</sup> )	Queda de tensão real
Rede-Fonte	1,5	3,39	4%	2,274	2,5	3,64%
Fonte-conector	0,1	3,39	0,50%	1,213	1,5	0,40%
conector-raspberry	0,1	3,13	0,50%	1,119	1,5	0,37%
conector-transceptor	0,1	0,02	0,50%	0,006	0,5	0,01%
conector-cooler	0,1	0,25	0,50%	0,090	0,5	0,090%

### 3.3.2 Modo de construção

Para a central, será utilizado um quadro de comando de 30x20x20 cm com placa de montagem interna de modo a facilitar a organização dos componentes. O esquemático a seguir apresenta o posicionamentos dos componentes dentro do quadro.

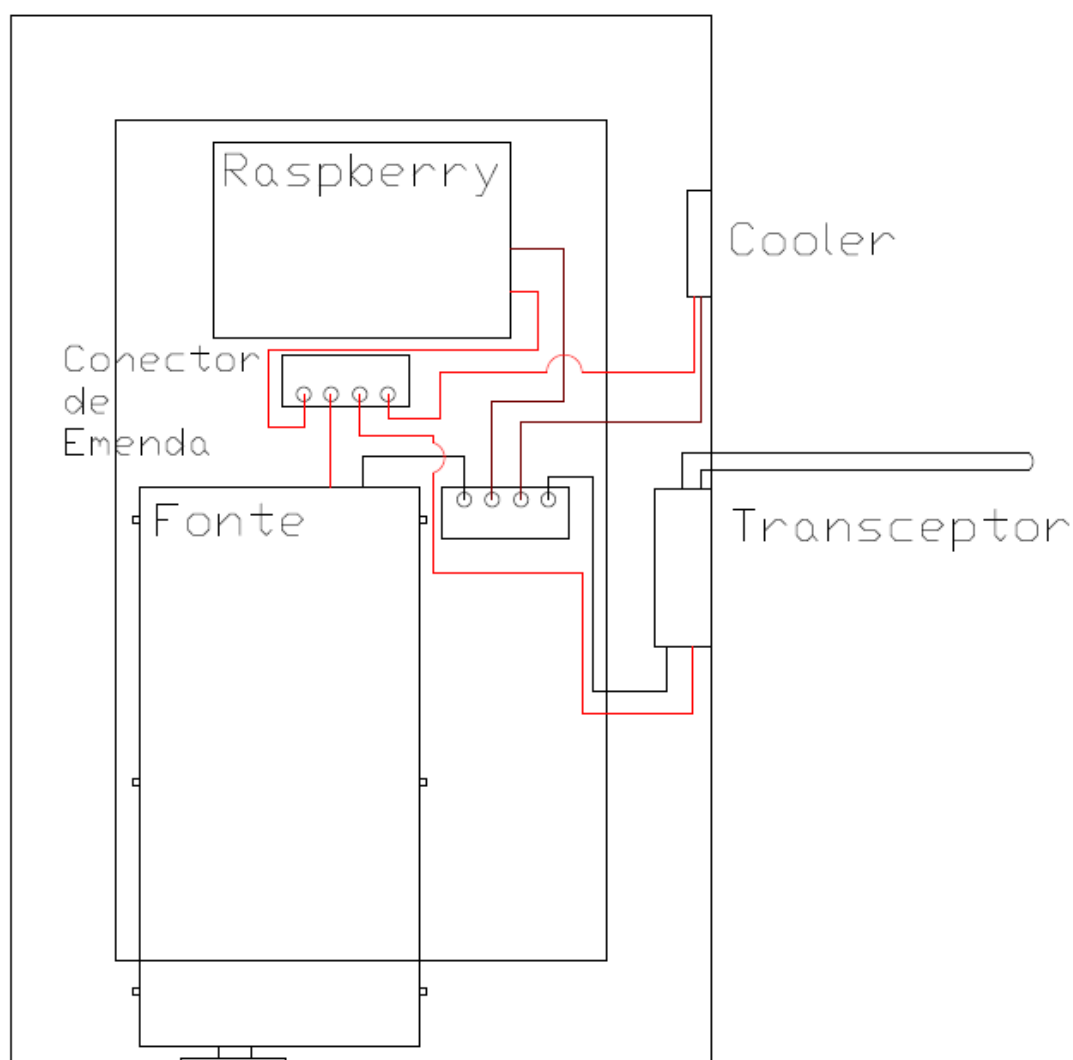


Figura 40 – Posicionamento dos componentes no quadro da central. Fonte:Do Autor

Os componentes serão fixados na placa de montagem através de parafusos Inox 304 (A2) com ranhura pphillips e dimensões M2 e 5 mm quando o componente possuir suporte individual. (fonte, raspberry e cooler). Os demais componentes serão fixados no quadro através de braçadeiras de fixação.

### 3.3.3 Protocolo de teste

Para testar o funcionamento da parte elétrica da central de comando, será usado um osciloscópio. O teste visará medir os parâmetros elétricos na saída da fonte e nos pontos de alimentação de cada componente de modo a analisar se a fonte cumpre seus parâmetros de projeto e se os componentes estão sendo alimentados de forma apropriada.

## 4 Software

### 4.1 Arquitetura de software

A Arquitetura proposta para este trabalho é baseada nos princípios de Micro Serviços. Estes são uma solução em forma de componentes de software menores e autônomos focados em tarefas específicas, para promover o reuso de software e bases de código de maior manutenibilidade e coesão com baixo acoplamento (NEWMAN, 2018).

Um problema comum em softwares monolíticos é o rastreamento de mudanças e a definição de fronteiras entre funções similares que geram código repetido espalhados pela aplicação, e podem dificultar a correção de bugs ou tornar implementações mais complexas (NEWMAN, 2018). Esse impacto na manutenibilidade do software e evolução do RICC é um ponto crítico na decisão desta arquitetura de acordo com os princípios da Gerência de Configuração e Evolução de Software (GERÊNCIA...), e o Princípio da Responsabilidade Única de Robert C. Martins.

Os Micro Serviços utilizam estes princípios de código para criação serviços independentes. Focando as divisões de um serviço em fronteiras de negócio. Então se torna óbvio onde um determinado código estará para uma funcionalidade específica. Mantendo um serviço dentro de suas responsabilidades escapamos das tentações de aumentar a complexidade do módulo e todas as dificuldades associadas com esta decisão (NEWMAN, 2018).

A arquitetura 41 aqui proposta, busca amplificar os seguintes benefícios para o projeto: Heterogeneidade de tecnologias; Resiliência do sistema; Escalabilidade; Facilidade de Implantação e Atualizações; Composição de serviços; e Otimização para Substituições.

A Heterogeneidade de Tecnologias é um ponto chave do trabalho, pois permite que a equipe utilize as ferramentas ideais para cada trabalho, otimizando pontos fortes de uma tecnologia sem a necessidade de estender suas atividades além de seu principal domínio. Onde por exemplo escolhemos o Framework Django REST para nossa API de dados e o Django para o servidor principal 41, não necessitando a fusão das tecnologias para cumprir um papel monolítico.

A Resiliência de um sistema está relacionada a falhas e problemas. Onde uma determinada falha não é capaz de criar uma cascata de falhas derrubando todo o sistema, assim, podemos isolar um problema e manter os outros serviços funcionando normalmente. Então, caso tenhamos uma falha no servidor de aplicação e processamento de informações, a API de dados continua disponível e isolada do problema para seus usuários.

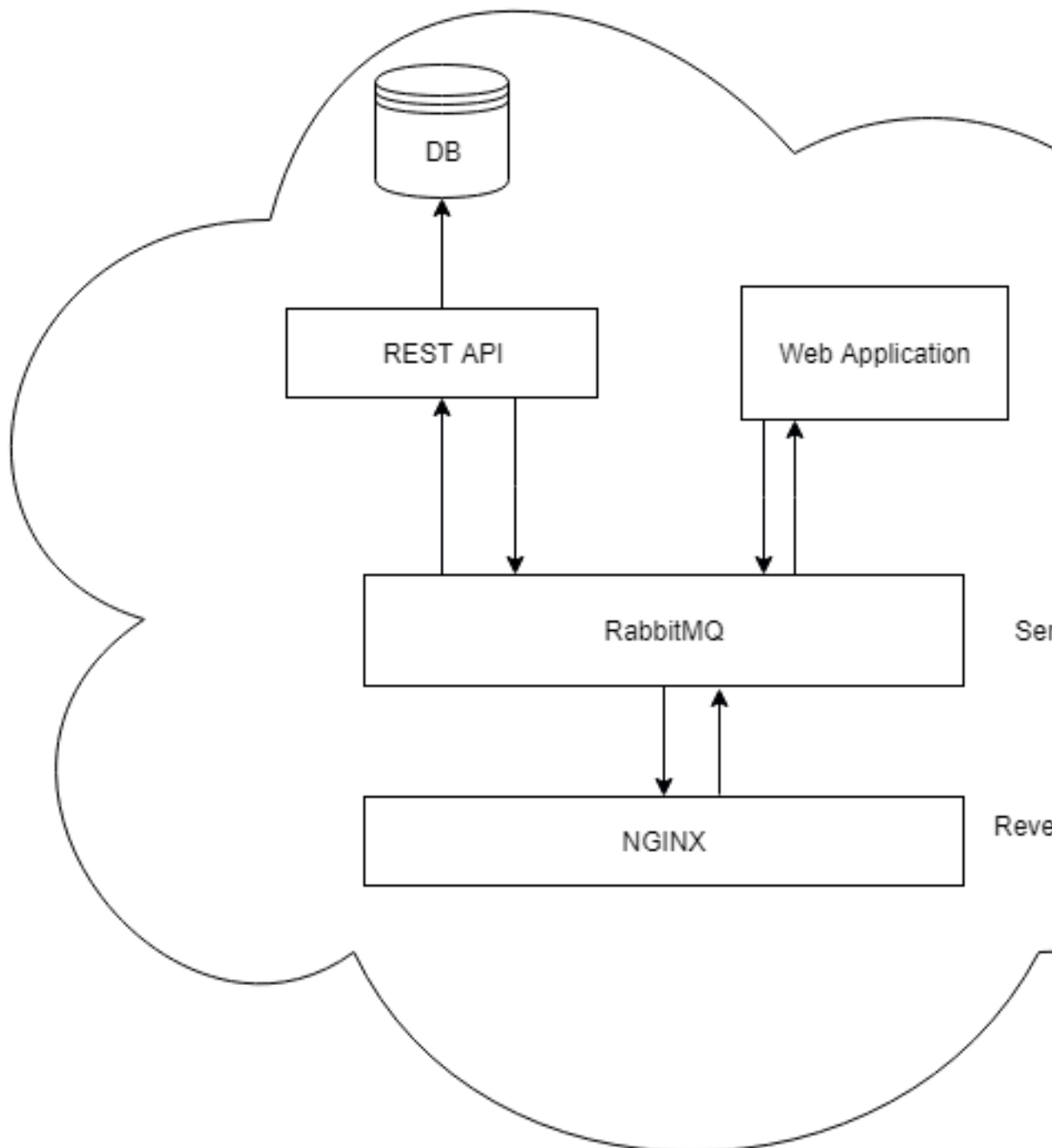


Figura 41 – Arquitetura do servidor.



Para nossa aplicação com grande armazenamento de dados dos sensores de estações e o processamento dos mesmos, a Escalabilidade monolítica não é uma opção, pois seria necessário escalar todos serviços juntos. Esta decisão de arquitetura permite evoluções nos módulos de armazenamento e processamento, sem necessariamente impactar nos outros serviços, economizando recursos dos servidores e financeiros para o projeto em casos de ajuste e escala.

Estas separações entre aplicações também buscam facilitar a Implantação e atualização destes serviços de forma independente. A infraestrutura disponível na FGA é instável e a mobilidade do sistema para outras nuvens e máquinas é ponto chave para a alta disponibilidade do software. Em casos de atualizações pontuais a serviços, não se torna obrigatório a atualização de todos os sistemas rodando, apenas dos impactados pelas correções.

Por último, temos as capacidades de Composição e a Otimização para Substituições. A utilização destes módulos separados que formam nosso sistema, permite e facilita o reuso destes serviços em outros contextos, e é característica fundamental para a equipe. Onde também é possível realizar substituições de uma ferramenta por outra que atenda a funcionalidade e o protocolo definido pelo serviço em substituição.

#### 4.1.1 Protocolos de comunicação

Segundo a RFC que o define, (NADA, a), o Protocolo de Transferência de Hipertexto (HTTP) é um protocolo a nível de aplicação para informações distribuídas, colaborativas e de hipermídia entre sistemas. Possui diversas tarefas além de seu uso com Hipertexto, através da extensão de seus métodos de requisição, códigos de erro e cabeçalhos. É também utilizado como um protocolo genérico de comunicação entre agentes e proxies para outros sistemas de internet.

O HTTP é um protocolo de Requisição e Respostas, onde um cliente envia uma requisição a um servidor na forma de um método de requisição, URI e versão do protocolo, seguido de uma mensagem contendo modificadores da requisição, informações do cliente e possivelmente um conteúdo em relação a conexão com o servidor. O Servidor responde com uma linha de status, incluindo o versão do protocolo da mensagem e um código de sucesso ou erro, seguido de uma mensagem contendo informações do servidor, entidade e possivelmente um conteúdo (NADA, a).

Como na maioria das conexões seguindo HTTP ela será iniciada pelo usuário buscando uma requisição que seja aplicada em um recurso do servidor. Em nosso contexto, o usuário criando a requisição serão os módulos centrais que estarão enviando dados dos sensores a serem salvos na API de armazenamento e esta comunicação será autenticada via tokens criptográficos nos cabeçalhos das requisições.

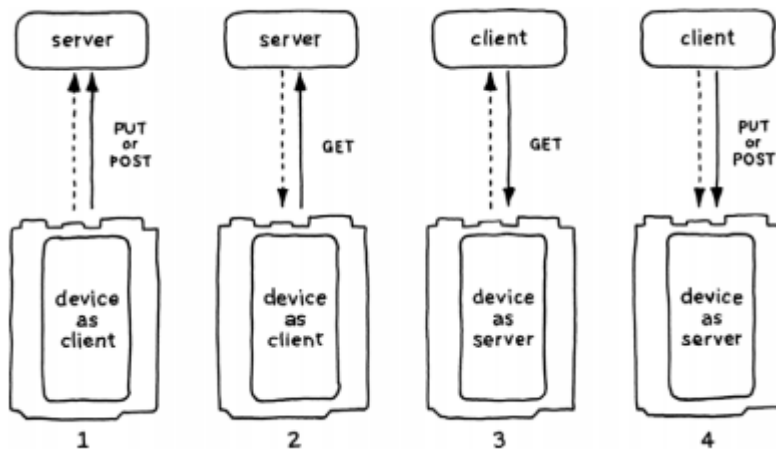


Figura 42 – Figura 4-5 retirada do livro (PFISTER, 2011)

As centrais utilizarão as requisições HTTP com os métodos POST para o envio de dados da sua rede para armazenamento remoto em nuvem e GET para a obtenção de recursos e polling periódico de atualizações com o servidor. (PFISTER, 2011). Estaremos então seguindo os padrões 1 e 2 da figura (??), pois não é viável que todas os módulos centrais possuam um endereço de IP público que seja acessível pelo servidor da aplicação para iniciar a comunicação.

Segundo (OHARA, 2007), o Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) é um padrão aberto de camada de aplicação para middlewares orientados a mensagens. Os pontos principais deste protocolo são message orientation, queuing, routing, reliability e security. Este protocolo permite que diferentes implementações de sistemas consigam se comunicar entre si, criando uma interoperabilidade de sistemas e consequentemente facilitando a escalabilidade de todo um ecossistema de software. Este protocolo classifica os sistemas em publishers e consumers, onde os primeiros publicam mensagens para os brokers (roteadores de mensagens), que em seguida são destinadas aos consumers. O broker de mensagens que utilizaremos será o RabbitMQ, uma tecnologia aberta, amplamente utilizada e testada para este tipo de protocolo.

## 4.2 Modelagem das aplicações

Nossa solução consiste em basicamente 5 módulos, divididos seguindo o Princípio da Responsabilidade Única de Robert C. Martins. Cada um destes módulos executará em diferentes dispositivos, para formar o ecossistema RICC. São eles:

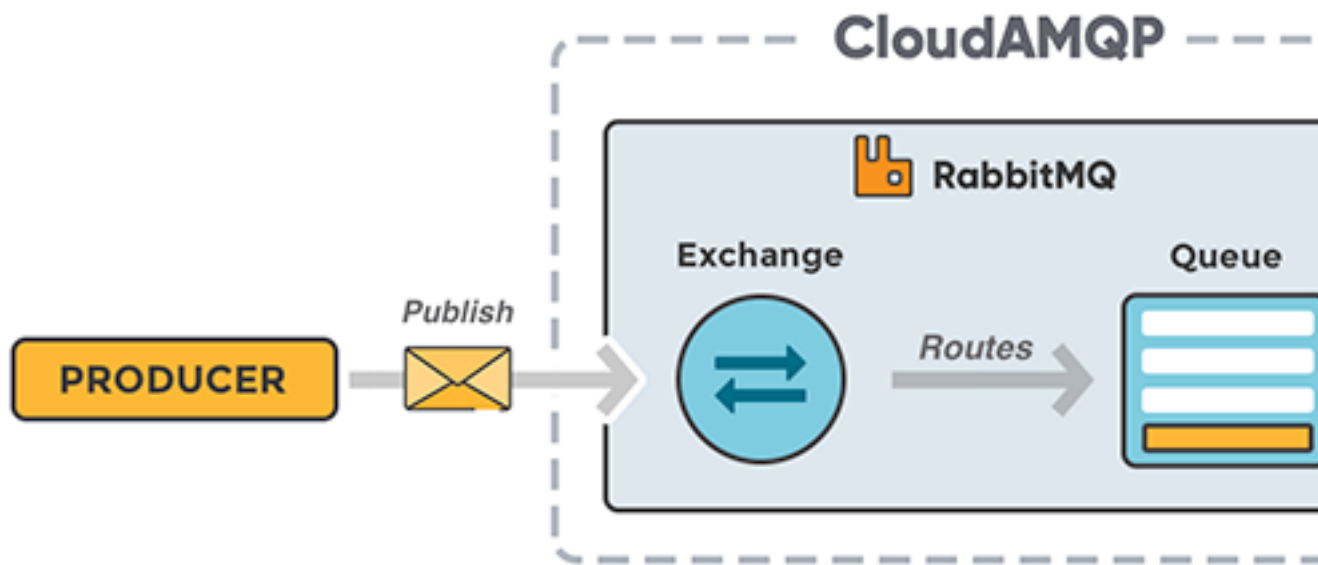


Figura 43 – Protocolo AMQP

#### 4.2.1 Aplicação Web

Aplicação que irá executar dentro de um navegador, possuindo todas as funcionalidades disponíveis para os usuários (visualizar dados, controlar a irrigação). Esta aplicação irá interagir com a API de consulta, tanto para receber os dados exibidos, quanto para enviar comandos para os sistemas de irrigação.

#### 4.2.2 Aplicativo mobile

Esta aplicação possuirá as mesmas funcionalidades da aplicação web, porém executará em dispositivos móveis, usufruindo de funcionalidades nativas de cada plataforma, como o sistema de notificações.

#### 4.2.3 API de dados

Este sistema ficará disponível em um servidor web, que terá a função de guardar dados de sensores genéricos, sendo facilmente extensível para novos tipos de dados. Possuindo esta única responsabilidade, melhorando a escalabilidade horizontal deste serviço.

#### 4.2.4 API de consulta

A API de consulta servirá como uma interface entre as aplicações utilizadas pelos usuários (Aplicação Web e Aplicação Mobile), além de ter o módulo de autenticação e criação de novos usuários.

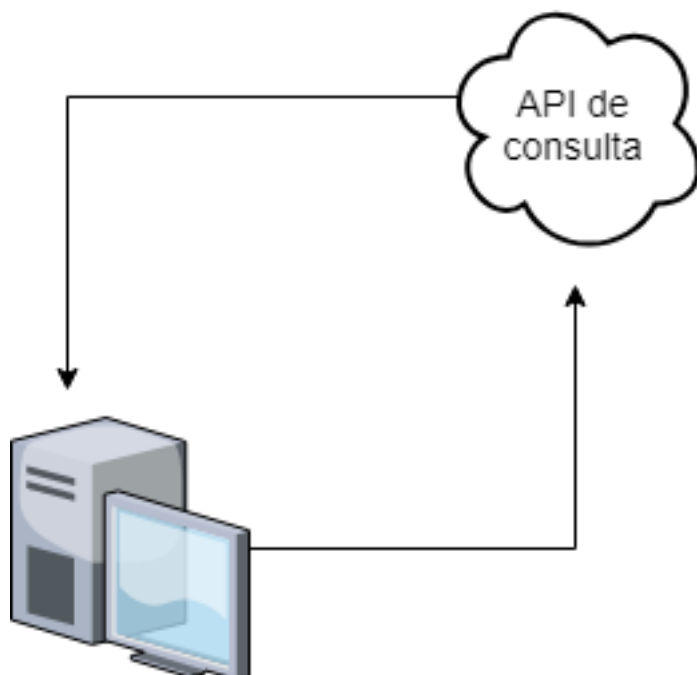


Figura 44 – Aplicação web

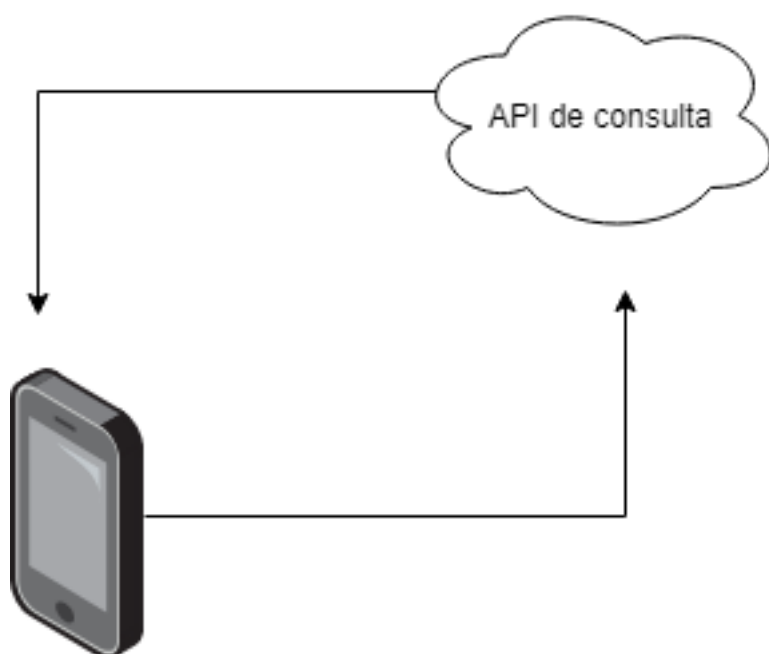


Figura 45 – Aplicativo mobile

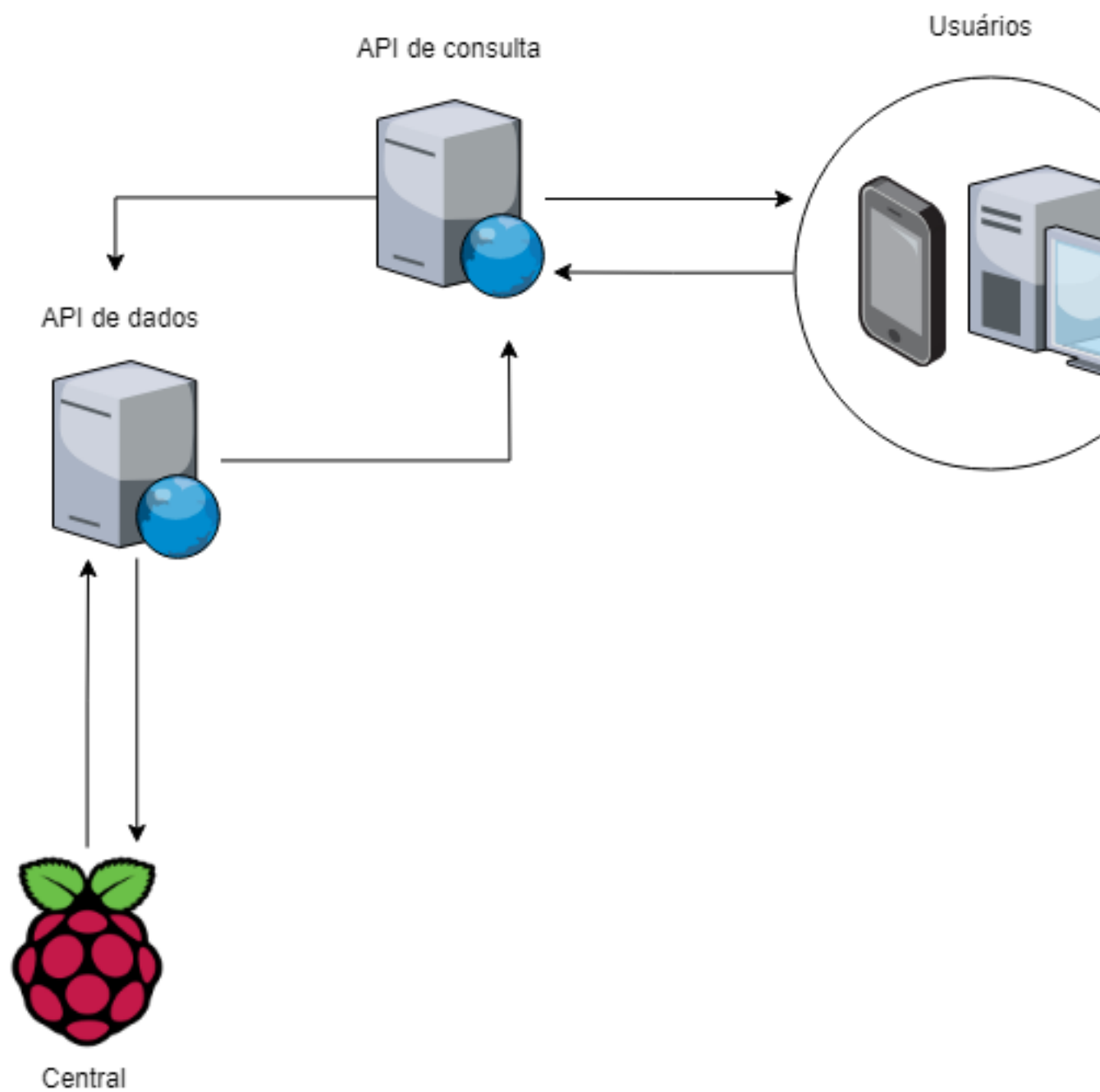


Figura 46 – Esquemático das API's

### 4.2.5 Central

O sistema central possuirá um sistema híbrido de linguagens, que servirá de gateway tanto para a os dados decorrentes da rede mesh serem transmitidos pela internet, quanto para transmitir as interações do usuário sobre os sistemas de irrigação, para a rede mesh. De acordo com a modelagem deste projeto, teremos diversas estações centrais espalhadas por diferentes redes de internet, tornando inviável um endereçamento de IP público para cada estação, assim, este tipo de endereçamento público será feito apenas para os servidores. Para que seja então possível receber informações periódicas do servidor em cada estação Central, será implementado um sistema de Polling/WebSocket com requisições de GET de acordo com o protocolo HTTP. De acordo com pesquisas do Chromium ([SPDY...](#)), este tipo de requisição possuem cabeçalhos que pesam entre 200 bytes e 2KB, assim, em média com um sistema de polling a cada minuto, teríamos um gasto aproximado de banda de 45MB mensais.

## 4.3 Casos de Uso

Os casos de uso descrevem em linguagem de alto nível as funcionalidades requeridas de cada sistema.

Tabela 26 – Atores

Ator	Descrição
Usuário	Usuário que utilizará o nosso sistema através do aplicativo
Estação	Sistema responsável por coletar os dados fornecidos pelos sensores e enviar estes dados para o sistema central
Atuador	Sistema responsável por ligar o sistema de irrigação e comunicar com o sistema central
Central	Sistema com acesso à internet, que será responsável por enviar os dados de todas as estações para o servidor
Servidor	Microserviços responsáveis por processar os dados coletados de estações e disponibilizar para os aplicativos
Apps	Aplicativos mobile e web que exibirá os dados, coletados pelo sistema

## 4.4 Diagramas

### 4.4.1 Diagramas de caso de uso

### 4.4.2 Diagrama de classe

### 4.4.3 Diagramas de sequência

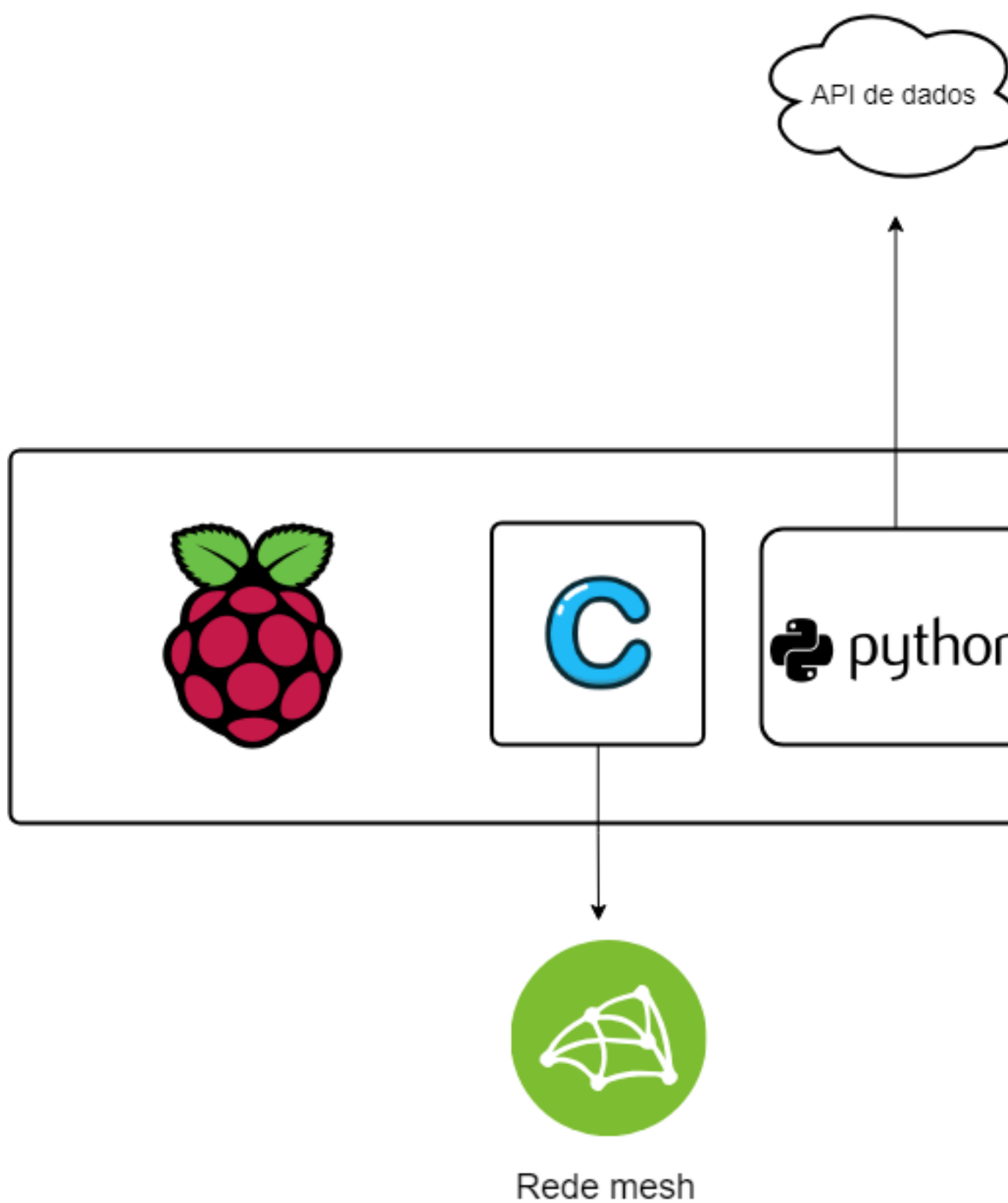


Figura 47 – Diagrama do sistema da central.

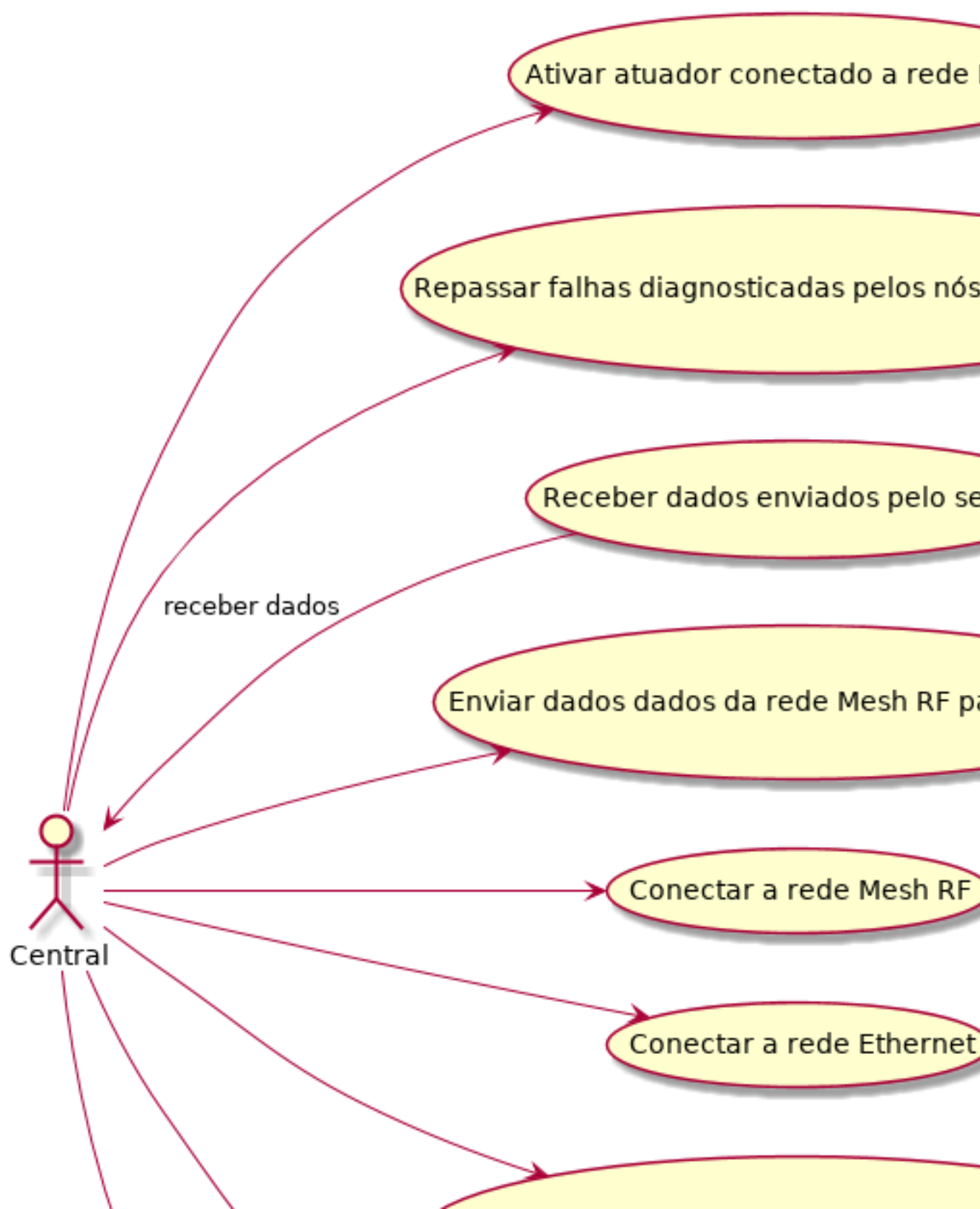
Tabela 27 – Casos de uso

#	Ator	Nome
UC01	Estação	Conectar a rede Mesh RF
UC02	Estação	Coletar dados dos sensores
UC03	Estação	Armazenar dados coletados dos sensores
UC04	Estação	Enviar dados para a Central
UC05	Estação	Ativar Atuador
UC06	Estação	Notificar falha de sensores
UC07	Atuador	Conectar a rede Mesh RF
UC08	Atuador	Ativar bomba de irrigação
UC09	Atuador	Desativar bomba de irrigação
UC10	Atuador	Informar estatus
UC11	Central	Conectar a rede Mesh RF
UC12	Central	Conectar a rede Ethernet
UC13	Central	Receber dados enviados pelos nós da rede Mesh RF
UC14	Central	Armazenar dados enviados pelos nós da rede Mesh RF
UC15	Central	Enviar dados da rede Mesh RF para o servidor
UC16	Central	Armazenar informações de configuração do usuário
UC17	Central	Receber dados enviados pelo servidor
UC18	Central	Enviar dados recebidos do servidor para a rede Mesh RF
UC19	Central	Ativar atuador conectado a rede Mesh RF
UC20	Central	Detectar falha de conexão em algum nó da rede Mesh RF
UC21	Central	Repassar falhas diagnosticadas nos nós, para o servidor
UC22	Servidor	Cadastrar novos usuários
UC23	Servidor	Logar novos usuários
UC24	Servidor	Receber dados das centrais
UC25	Servidor	Armazenar dados das centrais
UC26	Servidor	Criar notificações para usuários
UC27	Usuário	Efetuar cadastro
UC28	Usuário	Efetuar login
UC29	Usuário	Solicitar mudança de estado no atuador de irrigação
UC30	Usuário	Receber notificações sobre a plantação
UC31	Usuário	Configurar sistema de notificações
UC32	Usuário	Visualizar informações da Central
UC33	Usuário	Visualizar informações de cada Estação
UC34	Usuário	Visualizar informações de um atuador



Figura 48 – Diagrama de casos de uso de atuadores.





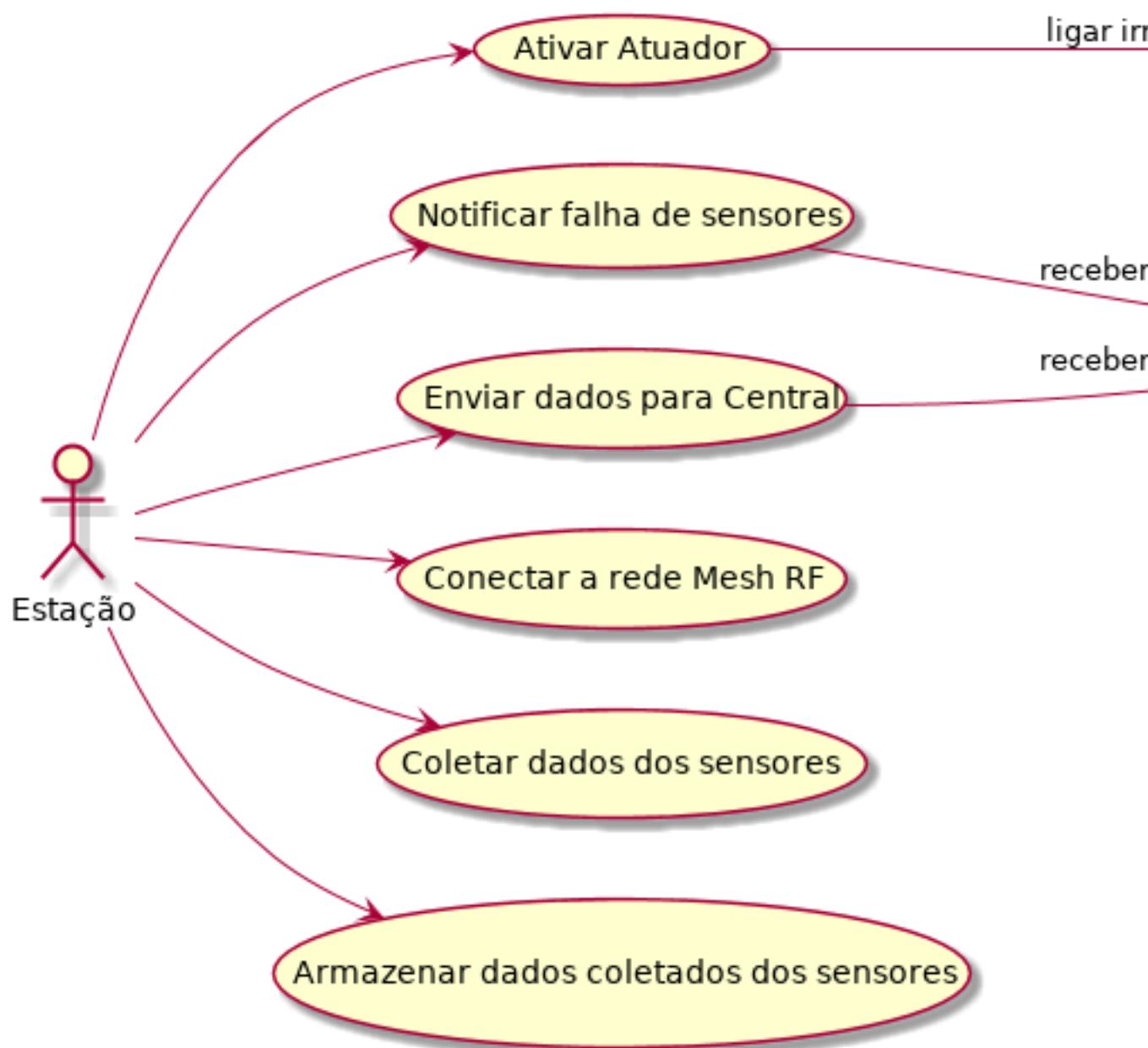


Figura 50 – Diagrama de casos de uso de estações.

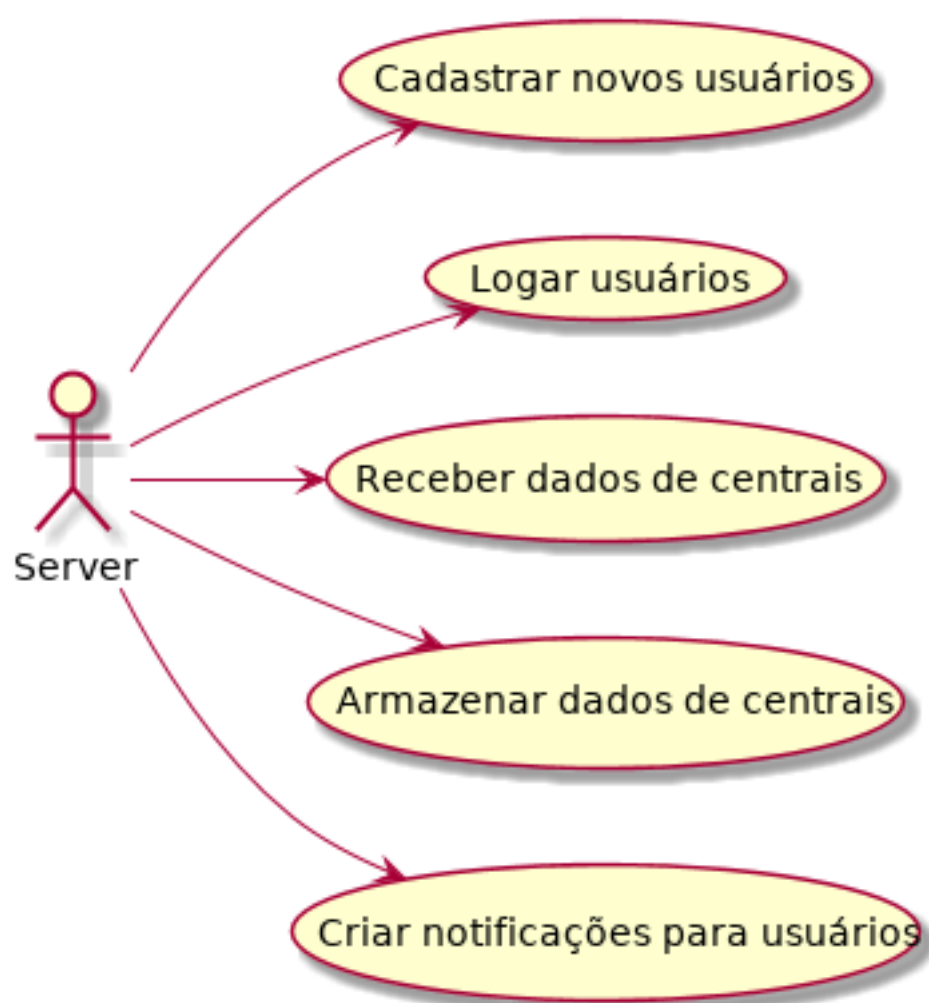
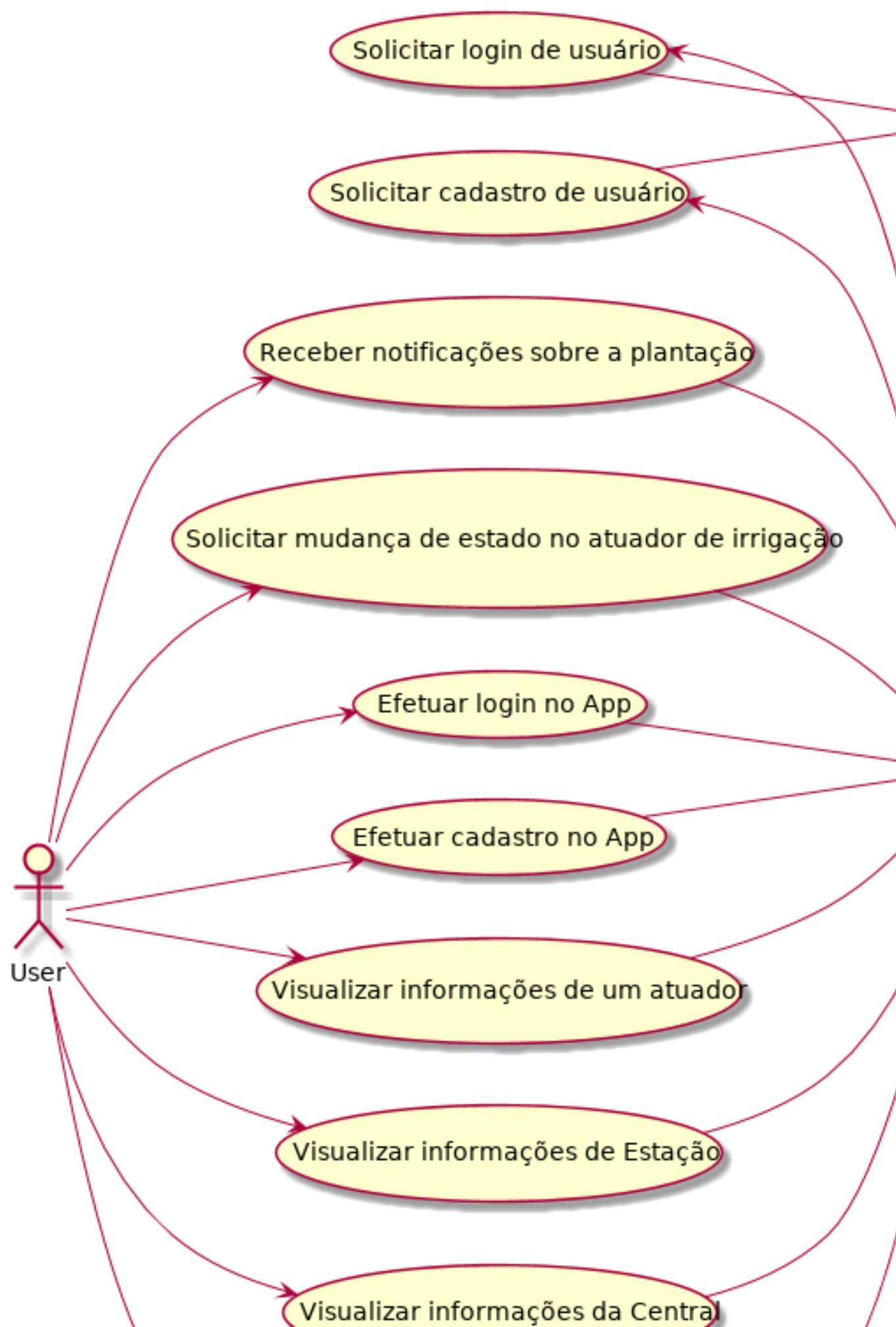


Figura 51 – Diagrama de casos de uso de servidor.



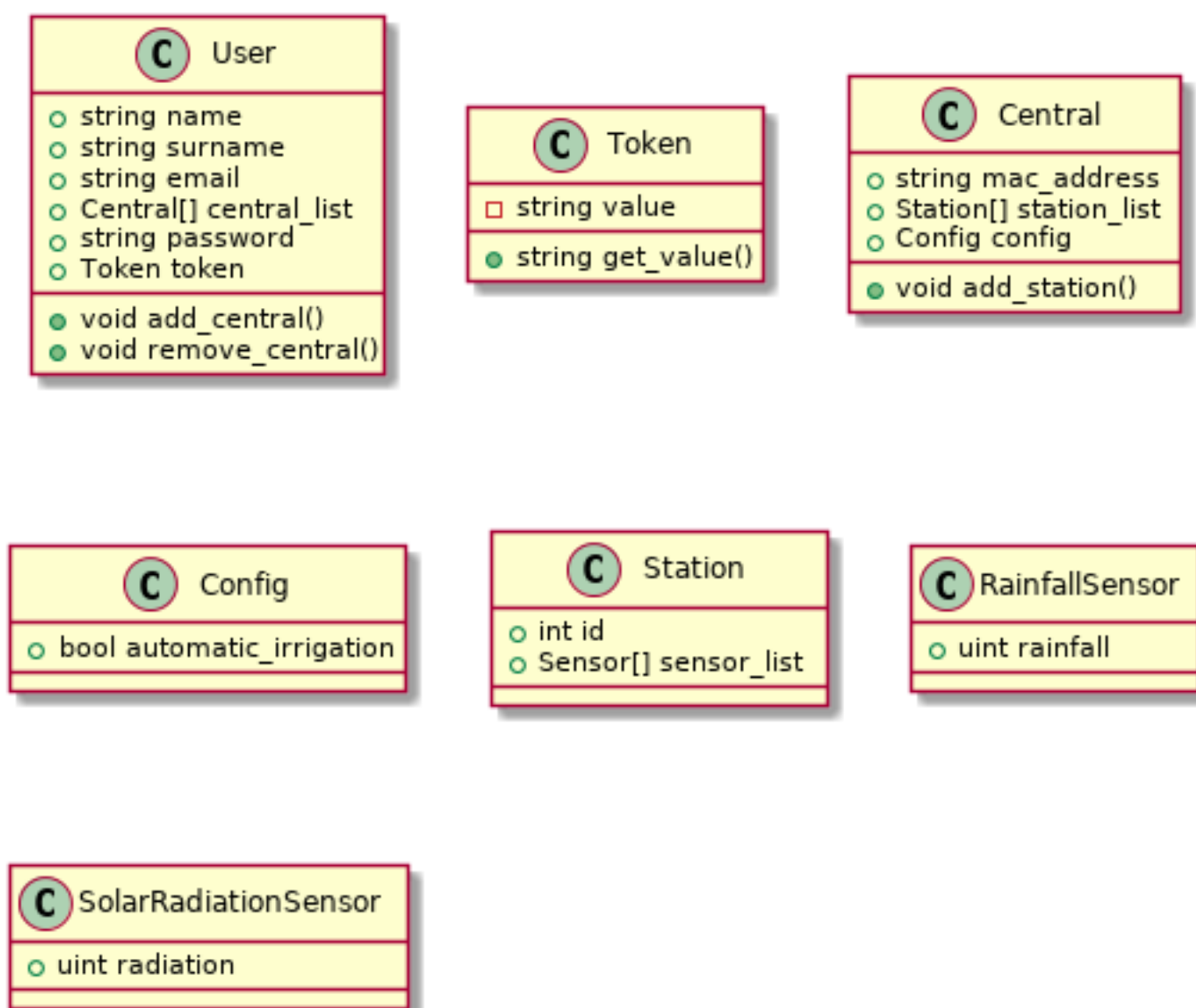


Figura 53 – Diagrama de classes do servidor.

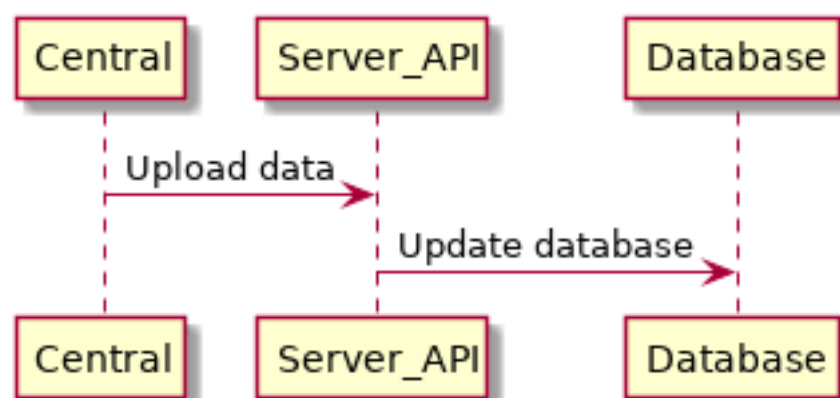


Figura 54 – Diagrama de sequência do servidor.

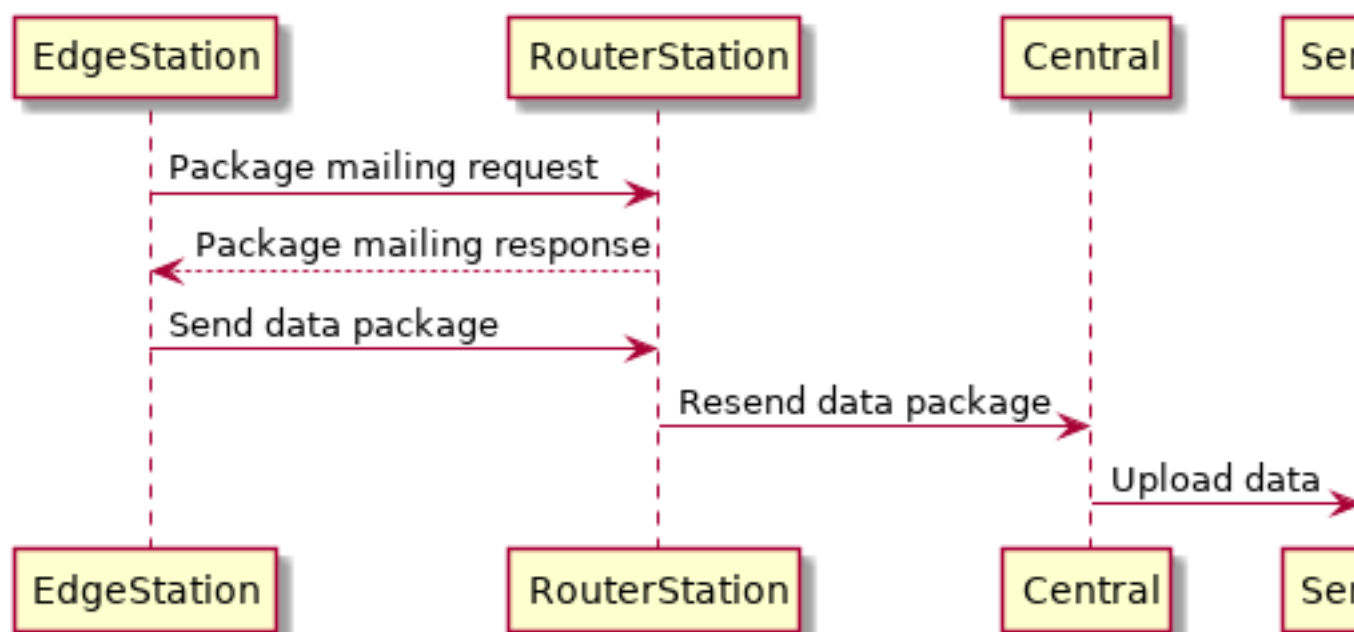


Figura 55 – Diagrama de sequência da estação.

## 5 Conclusões

Teste de citação para partes gerais ([ANA, 2017](#))

## Referências

- AGÊNCIA Nacional de Águas - ANA. Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2616.txt>>. Citado na página 80.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Citado na página 12.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- AMERICA, H. S. 2019. Disponível em: <<https://www.hydrologicalusa.com/products/rain-gauges/tb4-tipping-bucket-rain-gauge/>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 19.
- ANA, A. N. de Águas. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017 : relatório pleno*. Brasília, Brasil, 2017. Citado na página 94.
- BANG, A. Wireless ad-hoc networks: Types, applications, security goals. In: . [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 33.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E. *Manual de irrigação*. [S.l.]: Ed. UFV, 2006. ISBN 8572692428. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- BOGENA, H. R. et al. Effective calibration of low-cost soil water content sensors. *Sensors*, v. 17, n. 1, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/208>>. Citado na página 24.
- CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering an Introduction*. [S.l.]: John Wiley, 1991. Citado na página 9.
- CASAROLI, E. A. J. e José Alves Júnior e D. CalibraÇÃo do sensor capacitivo ec-5 em um latossolo em funÇÃo da densidade do solo. *REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG*, v. 26, n. 1, p. 80–88, 2018. ISSN 2175-6813. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/ojs/reveng/article/view/773>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 24 e 25.
- CRECESB. *Potencial Solar - SunData v 3.0*. 2019. Disponível em: <[Disponívelem:http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data](http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data)[Acessadoem:15deabrilde2019](#)>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 52.
- DATA.ORG climate. *Temperaturas em Brasília*. 2019. Disponível em: <[Disponívelem:https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/distrito-federal/brasilia-852/](https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/distrito-federal/brasilia-852/)[Acessadoem:15deAbrilde2019](#)>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 53.
- ECONÔMICO, V. *Lavoura sem internet limita avanço de precisão no campo*. 2017. Disponível em: <<https://www.valor.com.br/agro/4845284/lavoura-sem-internet-limita-avanco-de-precisao-no-campo>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 40 e 41.



- FARIAS, M. M. *Protocolo de roteamento para redes wireless mesh*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 2, 35, 36 e 37.
- FRISVOLD, G. B.; MURUGESAN, A. Use of weather information for agricultural decision making. *Weather, Climate, and Society*, v. 5, n. 1, p. 55–69, 2013. Citado na página 12.
- GAZOLI, M. V. J. Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações. São Paulo, Brasil, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 49.
- GERÊNCIA de Configuração e Evolução de Software. Disponível em: <[https://pt.wikiversity.org/wiki/Gerência\\_de\\_Configuração\\_e\\_Evolução\\_de\\_Software](https://pt.wikiversity.org/wiki/Gerência_de_Configuração_e_Evolução_de_Software)>. Citado na página 78.
- GOMMES, R. et al. Guide to agricultural meteorological practices. *World Meteorological Organization*, n. 134, 2010. Citado na página 12.
- GOWDA, P. H. et al. Et mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation science*, Springer, v. 26, n. 3, p. 223–237, 2008. Citado na página 12.
- GUERRA, A. F. et al. Método do tanque classe a para irrigação da soja, cultivar sambaíba, no cerrado. *Embrapa Cerrados-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005., 2005. Citado na página 13.
- HIERTZ, G. et al. Ieee 802.11s: the wlan mesh standard. *Wireless Communications, IEEE*, v. 17, p. 104 – 111, 03 2010. Citado na página 33.
- MELO, F. D. C. Energia fotovoltaica: Especialista técnico em energia solar fotovoltaica. *Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, 2018. Brasília, Brasil. Citado na página 62.
- MET ONE INSTRUMENTS. *034B WIND SENSOR OPERATION MANUAL*. [S.l.], 2001. Disponível em: <<https://metone.com/wp-content/uploads/pdfs/034b-wind-sensor.pdf>>. Citado na página 18.
- MET ONE INSTRUMENTS. *034B Wind Sensor - Datasheet*. [S.l.], 2018. Disponível em <<https://metone.com/wp-content/uploads/pdfs/034b-wind-sensor.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 18.
- NEWMAN, S. *BUILDING MICROSERVICES: designing fine-grained systems*. [S.l.]: OREILLY MEDIA, INC, USA, 2018. Citado na página 78.
- NIC.BR. *Campo conectado*. 2017. Disponível em: <<https://www.nic.br/noticia/na-midia/campo-conectado/>>. Citado na página 41.
- OHARA, J. Toward a commodity enterprise middleware. *Queue*, v. 5, n. 4, p. 48–55, 2007. Citado na página 81.
- OLIVEIRA, A. D. de; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C. Variáveis meteorológicas e estimativa da evapotranspiração num cultivo de soja no cerrado. *Boletim de Pesquisa*, 2011. Citado na página 12.

- PERRY, C. et al. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 96, n. 11, p. 1517–1524, 2009. Citado na página 12.
- PFISTER, C. *Getting started with the internet of things: connecting sensors and microcontrollers to the cloud*. [S.l.]: O'Reilly, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 81.
- P.R.COSTA, J. et al. Medida e estimativa da temperatura do solo (estudo de caso). *XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2010. Citado na página 11.
- RADI et al. Calibration of capacitive soil moisture sensor (sku:sen0193). *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, p. 1–6, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- ROBOT, D. 2019. Disponível em: <[https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Capacitive\\_Soil\\_Moisture\\_Sensor\\_SKU:SEN0193](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU:SEN0193)>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.
- ROMERO, R. et al. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural water management*, Elsevier, v. 114, p. 59–66, 2012. Citado na página 11.
- SAAD, M. C. Controlador de cargas e descargas de baterias, microcontrolado com pic, com aplicação em sistemas de fornecimento de energia em geral, incluindo sistemas fotovoltaicos. PUC - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro., 2012. Citado na página 50.
- SOLAR, Y. *Datasheet Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL020P-17b*. 2019. Disponível em: <[Disponível em: https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl020p-17b-20wp.html](https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl020p-17b-20wp.html)[Acessado em: 15 de Abril de 2019](#)>. Citado na página 52.
- SPDY: An experimental protocol for a faster web. Disponível em: <<http://dev.chromium.org/spdy/spdy-whitepaper>>. Citado na página 85.
- SU, S. L.; SINGH, D.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, Elsevier, v. 54, p. 92–105, 2014. Citado na página 12.
- TECH, P. 2019. Disponível em: <[https://pino-tech.eu/wp-content/uploads/2017/08/SoilWatch\\_10-650.jpg](https://pino-tech.eu/wp-content/uploads/2017/08/SoilWatch_10-650.jpg)>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.
- THOMA, C. M. N. V. M. *Avaliação de Desempenho de Redes Ad Hoc Utilizando Modelos de Mobilidade*. Dissertação (Mestrado) — CENTRO UNIVERSITÁRIO LA SALLE, 2011. Citado na página 36.
- UNIPOWER. *Manual Técnico Unipower*. 2019. Disponível em: <[Disponível em: https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf](https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf)[Acessado em: 15 de Abril de 2019](#)>. Citado na página 55.
- YANG JIAN-FENG MA, Z.-h. M. K. Hybrid routing protocol for wireless mesh network. In: *International Conference on Computational Intelligence and Security*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 34.

ZHAO, Y. et al. Study on precision water-saving irrigation automatic control system by plant physiology. In: IEEE. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. [S.l.], 2009. p. 1296–1300. Citado na página 11.

ZORRILLA-CASANOVA, J. e. a. Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules. *Progress in photovoltaics: Research and applications*, v. 21, n. n. 4, p. p. 790–796, 2013. Citado na página 50.